

**Titolo**

**METODOLOGIE DI ANALISI PROBABILISTICA DEL RISCHIO ASSOCIATO ALLA COSTRUZIONE ED OPERAZIONE DI UN DEPOSITO SUPERFICIALE DI RIFIUTI RADIOATTIVI**

Ente emittente: CIRTEN

**PAGINA DI GUARDIA**

**Descrittori**

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico  
 Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"  
 Argomenti trattati: Trattamento e stoccaggio dei rifiuti radioattivi

**Sommario**

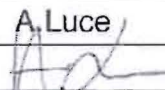
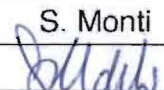
Nell'ambito di una valutazione di sicurezza che sia a supporto di una più ampia "analisi di rischio" dei depositi, è necessario, in primo luogo, individuare tutti i possibili processi ed eventi in grado di determinare il rilascio di radionuclidi dal deposito, quindi prendere in esame tutti i possibili "scenari" con le relative probabilità di accadimento e descrizione delle conseguenze radiologiche attese in termini di modelli matematici di simulazione. Il presente rapporto si pone come finalità l'acquisizione di competenze specifiche per identificare opportune metodologie di analisi di rischio (classiche e innovative) che siano di supporto all'esecuzione di studi relativi alle valutazioni di sicurezza per depositi di rifiuti radioattivi di tipo temporaneo, superficiale e geologico.

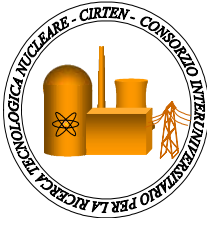
**Note**

Autori: M. Frullini, C. Rusconi, F. Manni

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	12.10.2010	NOME	A. Luce		S. Monti
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE	



**CIRTEN**  
**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO**  
**PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE**

**UNIVERSITA' DI ROMA 1**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ASTRONAUTICA, ELETTRICA ED ENERGETICA**

**METODOLOGIE DI ANALISI PROBABILISTICA DEL RISCHIO**  
**ASSOCIATO ALLA COSTRUZIONE ED OPERAZIONE DI UN DEPOSITO**  
**SUPERFICIALE DI RIFIUTI RADIOATTIVI**

**CIRTEN-UNIROMA1 RL 1159/2010**

**AUTORI**

**Prof. M. Frullini**

**Ing. C. Rusconi**

**Ing. F. Manni**

**ROMA, LUGLIO 2010**

## INDICE

<b>1. GENERALITA' SULLE VALUTAZIONI DI SICUREZZA DEI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI E FINALITA' DEL RAPPORTO .. pag</b>	<b>3</b>
1.1 LE VALUTAZIONI DI SICUREZZA DEI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI .....	3
1.2 ORGANIZZAZIONE E FINALITA' DEL RAPPORTO .....	6
1.3 BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 1.....	8
<b>2. GLI INDICATORI DI SICUREZZA NELLE VALUTAZIONI DELLE PRESTAZIONI DI UN DEPOSITO DI RIFIUTI RADIOATTIVI .....</b>	<b>9</b>
2.1 INTRODUZIONE .....	9
2.2 GLI INDICATORI DI SICUREZZA .....	10
2.3 L'UTILIZZO DEGLI INDICATORI DI SICUREZZA NELLA SCALA DEI TEMPI .....	20
2.4 SOMMARIO SUGLI INDICATORI DI SICUREZZA E SCALA DEI TEMPI .....	22
2.5 LA DOSE E IL RISCHIO COME INDICATORI DELLA SICUREZZA .....	22
2.6 CONCLUSIONI .....	27
2.7 BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 2 .....	29
<b>3. RASSEGNA DELLE PRINCIPALI METODOLOGIE DI ANALISI DI RISCHIO PER IMPIANTI INDUSTRIALI E LORO UTILIZZO PER IL SAFETY ASSESSMENT DEI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI .....</b>	<b>30</b>
3.1. INTRODUZIONE .....	30
3.2. L'IDENTIFICAZIONE DEI RISCHI E LA SELEZIONE DEGLI EVENTI CRITICI .....	30
3.3. PANORAMICA SULLE METODOLOGIE DELL'ANALISI DI RISCHIO .....	33
3.4 LE METODOLOGIE DI ANALISI DI RISCHIO PER I DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI ..	44
3.4.1. HAZOP .....	45
3.4.2. FMEA/FMECA .....	53
3.4.3 FTA – FAULT TREE ANALYSIS .....	81
3.4.4. ETA – EVENT TREE ANALYSIS .....	97
<b>4. L'APPROCCIO IAEA PER UNA METODOLOGIA DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DI DEPOSITI SUPERFICIALI – IL PROGETTO ISAM ...</b>	<b>104</b>
4.1. INTRODUZIONE .....	104
4.2. IL CAMPO DI APPLICAZIONE .....	105
4.3. I PRINCIPALI TEMI PRESENTATI .....	105
4.4. LA STRUTTURA DELLA METODOLOGIA .....	105
4.5. LO SVILUPPO E LA GIUSTIFICAZIONE DI SCENARI .....	117
4.6. L'APPROCCIO ALLA GENERAZIONE DEGLI SCENARI NEL PROGETTO ISAM .....	122
4.7. LINEE GUIDA DELL'APPROCCIO METODOLOGICO SECONDO ISAM .....	134
4.8. LO SVILUPPO FORMALE DI SCENARI GENERICI – LE COMBINAZIONI DEGLI STATI .....	135
4.9. GLI SCENARI PER L'INTRUSIONE UMANA .....	140
4.10. LA METODOLOGIA ENEA PER DEPOSITI SUL TERRITORIO ITALIANO .....	142

<b>4.11. BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 4 .....</b>	<b>148</b>
<b>5. LINEE GUIDA DELLA METODOLOGIA NIREX PER LA DEFINIZIONE DI SCENARI NELLE VALUTAZIONI DI SICUREZZA DI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI SUPERFICIALI E PROFONDI ...</b>	<b>150</b>
<b>5.1. GENERALITÀ SULLA METODOLOGIA NIREX .....</b>	<b>150</b>
<b>5.2. APPROCCIO ALLO SVILUPPO DELLA METODOLOGIA NIREX .....</b>	<b>155</b>
<b>5.3. L'ANALISI DEI FEP .....</b>	<b>158</b>
<b>5.4. SVILUPPO DI SCENARI .....</b>	<b>162</b>
<b>5.5. LO SVILUPPO DEL MODELLO CONCETTUALE .....</b>	<b>183</b>
<b>5.6. BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 5 .....</b>	<b>198</b>
<b>6. L'APPROCCIO BAYESIANO NELLE VALUTAZIONI DI SICUREZZA DI DEPOSITI SUPERFICIALI .....</b>	<b>199</b>
<b>6.1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>199</b>
<b>6.2 METODOLOGIA PER L'ELICITAZIONE .....</b>	<b>199</b>
<b>6.3 L'AGGIORNAMENTO BAYESIANO DEI PARAMETRI ELICITATI .....</b>	<b>204</b>
<b>6.4 STIMA DEI PARAMETRI ATTRAVERSO L'INFERENZA PROBABILISTICA BAYESIANA .....</b>	<b>207</b>
<b>6.5 I METODI BAYESIANI NEL PROCESSO DECISIONALE PER LA GESTIONE DEI DEPOSITI ...</b>	<b>210</b>
<b>6.6 BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 6 .....</b>	<b>212</b>
 <b>APPENDICE 1</b>	
 <b>APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA FMEA ALL'ANALISI DI SICUREZZA DI UN DEPOSITO TEMPORANEO DI RIFIUTI RADIOATTIVI .....</b>	<b>213</b>
 <b>APPENDICE 2 - LISTA IAEA (ISAM) DEI FEP Features Events and Processes .....</b>	<b>330</b>

## **1. GENERALITA' SULLE VALUTAZIONI DI SICUREZZA DEI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI E FINALITA' DEL RAPPORTO**

### **1.1 LE VALUTAZIONI DI SICUREZZA DEI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI**

Il criterio guida, nella gestione dei rifiuti radioattivi, è quello di isolare i rifiuti dalla biosfera per un

tempo sufficiente a garantire che ogni eventuale ritorno dei radionuclidi nell'ambiente non provochi livelli di esposizione inaccettabili per l'uomo o per altre specie biologiche. Questo obiettivo può essere raggiunto mediante strutture di contenimento tali da assicurare un adeguato isolamento per un periodo necessario e sufficiente ad assicurare il mantenimento dei meccanismi di ritardo nella fase di ritorno, inevitabile, dei radioisotopi verso la biosfera.

Pur condizionata dal tipo di rifiuti radioattivi da smaltire e dalla categoria di appartenenza, la decisione sulla scelta del tipo di deposito (temporaneo, superficiale o geologico profondo), sul suo progetto e sulla localizzazione del sito di smaltimento si deve basare sui risultati di opportune "valutazioni o analisi di sicurezza" che facciano uso di modelli matematici e codici di calcolo per la verifica degli obiettivi di confinamento e protezione voluti nel tempo.

Nell'ambito di una valutazione di sicurezza che sia a supporto di una più ampia "analisi di rischio" dei depositi, è necessario, in primo luogo, individuare tutti i possibili processi ed eventi in grado di determinare il rilascio di radionuclidi dal deposito, quindi prendere in esame tutti i possibili "scenari" con le relative probabilità di accadimento e descrizione delle conseguenze radiologiche attese in termini di modelli matematici di simulazione.

Il calcolo delle conseguenze sull'ambiente e sull'uomo, consentirebbe di stabilire se il deposito è "sicuro" (se cioè i rischi connessi alla sua gestione sono "accettabili"). Quindi, un'analisi di sensibilità dovrebbe fornire indicazioni su quali siano i parametri più importanti, tenendo conto delle incertezze che gravano sulla valutazione e che interessano tutti i livelli della metodologia (indicatore di sicurezza, modelli concettuali, modelli fisici, dati e parametri, modelli di esposizione, assegnazione delle probabilità agli scenari).

Il deposito e l'ambiente che lo circonda sono un sistema complesso, essenzialmente composto da:

- il deposito, che ospita i rifiuti con i relativi sistemi di contenimento e tecniche di assemblaggio e che prevede opportune barriere superficiali per rallentarne la loro diffusione verso la biosfera;
- la geosfera (il sistema geologico ospitante) ed il materiale che lo circonda, gli eventuali fluidi interstiziali, le sorgenti di acqua in profondità e le acque sotterranee;
- la biosfera (terreno, acque superficiali, atmosfera, ecosistema e mondo biologico, uomo ed attività umane)

Le caratteristiche idrogeologiche del sito devono essere tali da minimizzare la possibilità di lisciviazione dei rifiuti da parte della acque sotterranee e del ritorno delle acque eventualmente contaminate in superficie o comunque nella biosfera.

Le caratteristiche climatiche, geografiche e geomorfologiche del sito devono essere tali da escludere significativi processi di erosione, specie ad opera di acque meteoriche e superficiali. Si devono anche escludere possibilità di dissesti (frane) ed inondazioni.

Devono essere escluse le aree dove sono in atto significativi processi tettonici, sismici o vulcanici che possano compromettere il confinamento dei rifiuti. Le caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito di smaltimento devono essere omogenee e tali da rendere rappresentative le osservazioni ed analisi svolte su di esso.

Nella scelta del sito devono essere presi in considerazione gli usi del territorio, la presenza di attività pericolose, la presenza di opere suscettibili di modificare, a seguito di incidenti, le caratteristiche del sito stesso.

Ai fini del rispetto degli obiettivi di protezione sanitaria e della tutela dell'ambiente, devono essere previste sul sito di smaltimento e/o sul relativo deposito, opere ingegneristiche atte a prevenire o ritardare il contatto diretto fra rifiuti e ambiente ospitante, con conseguente possibile rilascio di radioattività. La progettazione di queste opere deve tendere ad evitare interventi di manutenzione.

Da ormai più di 40 anni, sono stati sviluppati da vari organismi internazionali (IAEA, NEA) e nazionali un gran numero di modelli di vario tipo (deterministico, probabilistico o combinazione dei due) dove è possibile inserire modelli via via più sofisticati per la simulazione dei meccanismi di degrado delle strutture e di rilascio dei radionuclidi dal deposito alla biosfera.

In gran parte di questi studi, si fa l'ipotesi che un deposito (superficiale o geologico) sia da considerarsi un sistema passivo; non ci si aspetta perciò un intervento dell'uomo nel lungo periodo. Il solo meccanismo plausibile per il trasporto dei radionuclidi sarebbe quindi quello dovuto ai movimenti dell'acqua. Oltre a questo tipo di processi, si devono prendere in considerazione eventi "anormali" quali: caduta di meteoriti, inondazioni, glaciamenti, vulcanismo; le probabilità di alcuni di essi sono considerate molto basse e per altre il rischio radiologico associato non sarebbe diverso da quello previsto per le condizioni "normali".

Un altro fattore da tenere presente è l'intrusione (insediamenti agricoli in prossimità del deposito, perforazioni per ricerca di risorse idriche ed energetiche, nuove costruzioni sul deposito) da parte di future generazioni la cui rappresentazione, in termini di modello analizzabile matematicamente, presenta grandi difficoltà. In tal senso, si può considerare che un tale scenario, pur restando oggetto di calcoli previsionali in sede di valutazione di sicurezza ed analisi di rischio del deposito, non dovrebbe destare preoccupazioni. Infatti, la doverosa responsabilità di esercitare un "*controllo*

*istituzionale nazionale ed internazionale*<sup>1</sup>” per almeno i primi 150 anni di vita del deposito minimizzerebbe la probabilità di intrusioni inavvertite e la condizione oggettiva che trascorsi 300 anni dalla chiusura definitiva di un deposito superficiale o sub-superficiale per rifiuti di bassa e media attività la radioattività decade a circa 1/1000 del suo livello iniziale sono due fattori che riducono il rischio di contaminazione per intrusione a livelli di sicura accettabilità. Un tale abbattimento, se non sono presenti in concentrazioni significative radionuclidi a vita media più lunga e se la concentrazione iniziale dei radionuclidi stoccati nel deposito è inferiore ad un determinato livello, comporta una riduzione pressoché totale della pericolosità potenziale del materiale confinato, che equivale al raggiungimento di livelli di radioattività confrontabili con il fondo naturale [1.1].

D'altra parte, la possibilità che nei primi 150 anni di vita del deposito si possa perdere il controllo istituzionale di quest'ultimo (perdita di “memoria sociale”, perdita di informazioni, impossibilità di controllo fisico del sito) implicherebbe un crollo repentino delle attuali capacità di gestione organizzata delle attività industriali di un sistema su larga scala (nazionale ed internazionale). Una tale situazione è ragionevolmente ipotizzabile solo in presenza di cause scatenanti (guerra su larga scala, epidemie su larga scala, cataclismi naturali su base continentale, glaciazioni) che comporterebbero livelli di danno ben più alti di quello valutabile per una intrusione accidentale in un deposito. Riguardo a questo aspetto, si può osservare che la struttura sociale di una moderna società civile ed industriale ed il complesso delle organizzazioni di controllo e di verifica della gestione delle attività industriali a basso e ad alto rischio costituiscono, rispetto al tema della perdita di controllo istituzionale del deposito, un sistema *virtuale* di difesa in profondità “multibarriera” molto più numeroso di quello fisico previsto dalle barriere superficiali di progetto del deposito stesso.

Se si escludono scenari catastrofici, a bassissima probabilità di occorrenza, il rischio principale verrebbe da un rilascio di radionuclidi che farebbe aumentare di poco, per migliaia e forse milioni di anni, i livelli di radioattività in acque sotterranee e superficiali nei pressi del sito. A seguito di perdita del contenimento per cause diverse si avrebbe, infatti, circolazione di acqua nel deposito con conseguente lisciviazione dei rifiuti e seguente migrazione dei radionuclidi nelle acque sotterranee. Un tale scenario, infatti, viene considerato lo scenario di riferimento o *scenario di base* per molte delle analisi di sicurezza sui depositi effettuate a livello internazionale, e solo in alcuni casi ed in tempi recenti si correde l'analisi con valutazioni su *scenari alterati* che prevedono futuri fenomeni intrusivi.

---

<sup>1</sup> Periodo in cui il sito su cui insiste il deposito è soggetto a vincolo di vigilanza e protezione fisica e a vincolo amministrativo. Il controllo è di tipo *attivo* se viene garantita la sorveglianza e la manutenzione, di tipo *passivo* se attraverso l'utilizzo di sistemi anti intrusione e di opportune segnalazioni il sito può essere abbandonato ma non può essere destinato ad altre attività antropiche. Indicativamente una soluzione può essere rappresentata, per un periodo di riferimento si 300 anni, da un controllo attivo per i primi 150 anni e da quello passivo per il periodo rimanente.

Ciononostante, i punti critici delle metodologie di analisi di sicurezza per l'accettabilità del rischio di smaltimento di rifiuti ad alta attività e a vita lunga sono:

- la necessità di prevedere fenomeni su scale di tempi non usuali, pone problemi di simulazione diversi (anche concettualmente) rispetto a quelli che la tecnologia è abituata ad affrontare;
- la necessità di prevedere il comportamento futuro di un deposito e di quantificare i rischi associati, dove i dati necessari per descrivere alcuni dei processi più importanti, sono molto scarsi (la maggior parte sono di tipo geologico o archeologico ed entrambe sono scienze abituate ad analisi più di tipo retrospettivo che revisionale con stime più qualitative che quantitative.
- la previsione di atti che possano compromettere l'integrità del deposito, da parte di future generazioni e per i motivi più svariati, non è trattabile in modo scientifico. Infatti, pur cercando di valutare scientificamente le conseguenze dei vari scenari ipotizzabili, non si può stimarne le probabilità relative, né essere certi di fare valutazioni corrette per quanto riguarda il "rischio accettabile"
- il calcolo delle conseguenze dipende da parametri non valutabili scientificamente, come la dimensione delle popolazioni coinvolte, le infrastrutture economiche, le riserve di acqua, le diete, le abitudini alimentari, ma anche la possibilità che vi siano in futuro disponibili metodi di cura delle malattie causate dalle radiazioni;
- in quasi tutti gli scenari che è possibile prendere in considerazione, gioca un ruolo molto importante l'intervallo di tempo, dopo la chiusura del deposito, trascorso il quale si ipotizza la perdita di isolamento, e questo influenza notevolmente la stima delle dosi;
- la scala dei tempi in gioco rende impossibile, allo stato attuale, una reale validazione della valutazione di sicurezza che è un fattore molto importante in tutte le analisi di sicurezza. La validazione, infatti, può essere fatta solo su scala (temporale e spaziale) ridotta e solo sui processi chimico-fisici di base.

## **1.2 ORGANIZZAZIONE E FINALITÀ DEL RAPPORTO**

Il presente rapporto si pone come finalità l'acquisizione di competenze specifiche per identificare opportune metodologie di analisi di rischio (classiche e innovative) che siano di supporto all'esecuzione di studi relativi alle valutazioni di sicurezza per depositi di rifiuti radioattivi di tipo temporaneo, superficiale e geologico.

Nel Capitolo 2 ci si è soffermati sulle caratteristiche dei diversi indicatori di sicurezza utilizzabili in fase di analisi di rischio del deposito, essenzialmente: dose, rischio ed indicatori ibridi. In



particolare ci si è soffermati nella descrizione delle problematiche in senso assoluto e relativamente alla scala dei tempi di riferimento per l'analisi.

Il Capitolo 3 presenta una rassegna sulle principali metodologie di analisi di rischio utilizzate nell'ambito delle valutazioni di sicurezza e impatto ambientale di impianti industriali ad alto rischio (Normative V.I.A. e Seveso I,II e III) con l'obiettivo di identificare quelle più idonee ad essere utilizzate, anche se solo come supporto, nel *safety assessment* dei depositi di rifiuti radioattivi. Strettamente collegata a questo capitolo, in Appendice 1 è stata relazionata un'applicazione della metodologia FMEA ( Failure Mode and Effect Analysis) ad un generico deposito *temporaneo* di rifiuti che rappresenta, per tipologia e modalità di gestione, la classe di depositi dove le metodologie trattate presentano maggiore efficacia applicativa.

Nel Capitolo 4 è stato affrontato il tema della *safety assessment* di depositi superficiali con riferimento alle tematiche rilevanti emerse a seguito delle conclusioni del progetto ISAM - *Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities*, sviluppato in ambito IAEA. In particolare, in questa fase, sono stati affrontati i due principali temi evidenziati dai lavori svolti a livello internazionale da diverse organizzazioni tecniche e di controllo: la configurazione delle liste FEP (Features, Events and Processes) e la definizione del concetto di scenari. A supporto di questo capitolo, in Appendice 2 è stata riportata una lista dettagliata delle FEP identificate a conclusione del progetto ISAM.

Nel Capitolo 5 si è scelto di presentare una metodologia per la definizione di scenari di riferimento nelle valutazioni di sicurezza di depositi superficiali e profondi definita ed adottata da NIREX per depositi in territorio inglese. Questa metodologia, pur inquadrandosi in quelle basate sul concetto di scenario, presenta degli elementi di novità soprattutto per quanto riguarda l'utilizzo di programmi di gestione di dati che facilitano la costruzione di scenari a partire dal *FEP data base* e fornisce indicazioni su tecniche di ricomposizione del rischio totale a partire da quello relativo ai singoli scenari.

Infine, nel Capitolo 6 sono state presentate alcune considerazioni sulle criticità delle metodologie di valutazione di sicurezza di depositi di rifiuti radioattivi basate sul concetto di scenario, nel tentativo di segnalare argomenti che richiederebbero futuri approfondimenti.

### **1.3 BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 1**

[1.1] ENEA, Task Force per il sito nazionale di deposito dei rifiuti radioattivi Atti del convegno “La sistemazione definitiva dei rifiuti radioattivi”. Milano, 11 ottobre 2000

## 2. GLI INDICATORI DI SICUREZZA NELLE VALUTAZIONI DELLE PRESTAZIONI DI UN DEPOSITO DI RIFIUTI RADIOATTIVI

### 2.1. INTRODUZIONE

I principi e i criteri per lo smaltimento in sicurezza dei rifiuti radioattivi investe problematiche che vanno oltre quelle normalmente considerate nel solo ambito della radioprotezione. Un importante principio, accettato senza discussioni, è che si debba assicurare per le generazioni future un analogo livello di protezione previsto per quelle attuali. Rispetto a questo caposaldo di ogni valutazione di sicurezza dei depositi di rifiuti radioattivi, indipendentemente dal tipo di deposito, ci sono difficoltà nel dimostrare la conformità con i criteri di sicurezza messi a punto per lunghe scale temporali a causa dell'aumento con il tempo dell'incertezza associata con i risultati dei modelli predittivi. Di contro, la radiotossicità dei rifiuti diminuisce con il tempo a causa del fenomeno di decadimento radioattivo.

Queste tendenze contrapposte, suggerirebbero il graduale venir meno delle caratteristiche di significatività e di dettaglio delle analisi quantitative quanto più avanti nel tempo si sposta l'orizzonte della valutazione delle prestazioni di contenimento del deposito. Tuttavia, si ritiene opportuno, svolgere comunque valutazioni sufficientemente lontano nel futuro rispetto all'istante in cui il deposito è *riempito, chiuso e sigillato* per garantire che qualsiasi picco nel potenziale impatto dell'impianto di smaltimento venga preso in considerazione.

I criteri generali per la protezione degli individui dagli effetti nocivi delle radiazioni ionizzanti sono state definiti dalle organizzazioni internazionali ormai da molti anni. Tali criteri si basano sul principio che ogni dose di radiazione può provocare un danno e perseguono l'obiettivo di limitare al massimo la probabilità che il danno raggiunga livelli considerevoli..

Così, come mostrato in dettaglio nel § 2.5, i limiti di dose vincolano il livello di rischio per la salute di un individuo rispetto all'interazione con tutte le sorgenti controllate di radiazioni ionizzanti, così come la dose vincola i limiti di esposizione da un'unica sorgente.

I criteri di sicurezza, basati sul rischio e sulla limitazione della dose da radiazioni sono comunemente accettati come la base principale per determinare l'accettabilità dei depositi di rifiuti radioattivi. Tuttavia, le lunghe scale temporali che riguardano le prestazioni di un deposito comporta che i rischi o le dosi future ai singoli non possono essere previsti con certezza dal momento che dipendono, tra l'altro, da ipotesi sull'integrità dei rifiuti a matrice, dalle caratteristiche di durabilità delle barriere ingegneristiche, dalla geologia, dalla dispersione delle acque sotterranee, dalle variazioni delle condizioni della biosfera e dai futuri stili di vita umana. Tutto ciò ha portato la comunità internazionale a considerare le *conseguenze radiologiche dei sistemi di smaltimento*

*valutate a lungo termine (espresse in termini di dose e di rischio) solo come indicatori di sicurezza in grado di essere confrontati con criteri.*

Per queste ragioni, è stato proposto che dose e rischio debbano essere integrati con altri tipi di indicatori di sicurezza che facciano meno affidamento su ipotesi circa le future evoluzioni delle condizioni del sistema e del contesto naturale.

In questa sezione verranno illustrati i vari indicatori di sicurezza e la loro applicabilità nelle diverse scale temporali significative per i diversi tipi di depositi di rifiuti radioattivi e che devono essere considerati nelle valutazioni della sicurezza di questo particolare tipo di impianto di smaltimento.

Poiché gli aggettivi *quantitative* e *qualitative* (valutazioni) vengono utilizzati in tutto il testo, è opportuno, per ragioni di chiarezza, fornire le seguenti definizioni:

- le *valutazioni quantitative* si basano su stime numeriche delle conseguenze e la valutazione è fatta sulla base di criteri numerici. Esempio di tale criterio sono il rischio o la dose.
- le *valutazioni qualitative* si basano su stime del potenziale pericolo che non sono definibili esatte o assolute e la valutazione viene effettuata sulla base di criteri che non possono essere numericamente definiti. Esempio di tale criterio sono il confronto con convenienti valori di riferimento desunti da livelli di radionuclidi presenti nell'ambiente naturale.

## **2.2 GLI INDICATORI DI SICUREZZA**

L'obiettivo generale di valutazione della sicurezza di un deposito deve essere quello di stimare l'impatto sulla salute umana e sull'ambiente dovuto alla sua messa in opera e alla sua gestione. Per raggiungere questo obiettivo, vengono utilizzati modelli matematici per simulare qualsiasi migrazione di radionuclidi dai rifiuti, attraverso le barriere artificiali, la geosfera, la biosfera e il contesto umano e ambientale. Questi processi sono illustrati nella Figura 2.1 Le incertezze sulla stima dell'effettivo impatto sulla salute umana sono tanto maggiori quanto più elevato è il numero di processi presi in considerazione.

E' possibile prendere come riferimento delle quantità intermedie dei flussi di migrazione previsti dalla geosfera alla biosfera o di concentrazione ambientale e utilizzare questi per fornire una misura di sicurezza del deposito. Tali indicatori, anche questi oggetto di incertezza, risultano utili solo se possono essere confrontati con dati di impatti già conosciuti (ad es., impatti relativi a processi naturali).

E' generalmente accettato che un'adeguata tutela dell'ambiente può essere desunta dal mantenimento del benessere degli esseri umani, e quindi il rischio e gli indicatori di dose in Figura 2.1 potrebbero anche utilizzati come indicatori ambientali. Tuttavia, le concentrazioni ambientali e i

flussi possono essere ritenuti indicatori più immediati per la valutazione dell'effettivo impatto ambientale.

Gli indicatori di sicurezza possono essere utili per una varietà di scopi. Ad esempio, essi possono fornire informazioni necessarie per:

- fornire una base per il confronto delle varie opzioni di deposito;
- prendere decisioni normative sulla sicurezza e concessione delle licenze di un deposito, definendo criteri di rispetto;
- prendere decisioni in materia di ingegneria, progettazione, costruzione e di ubicazione dell'impianto;
- aumentare la fiducia nelle prestazioni di sicurezza del deposito e nella capacità di effettuare valutazioni di sicurezza dell'impianto;
- fornire una base, un contesto ed una prospettiva per il confronto dei risultati con altre attività industriali;
- aiutare i decisori nella comunicazione con il pubblico.

Alcuni indicatori sono più adeguati nella scala di tempo breve e altri per il lungo periodo, ma nella maggior parte dei casi, sarà necessario l'utilizzo di più di uno per fornire informazioni soddisfacenti o per raggiungere un grado di fiducia sufficiente a prendere una decisione sul deposito.

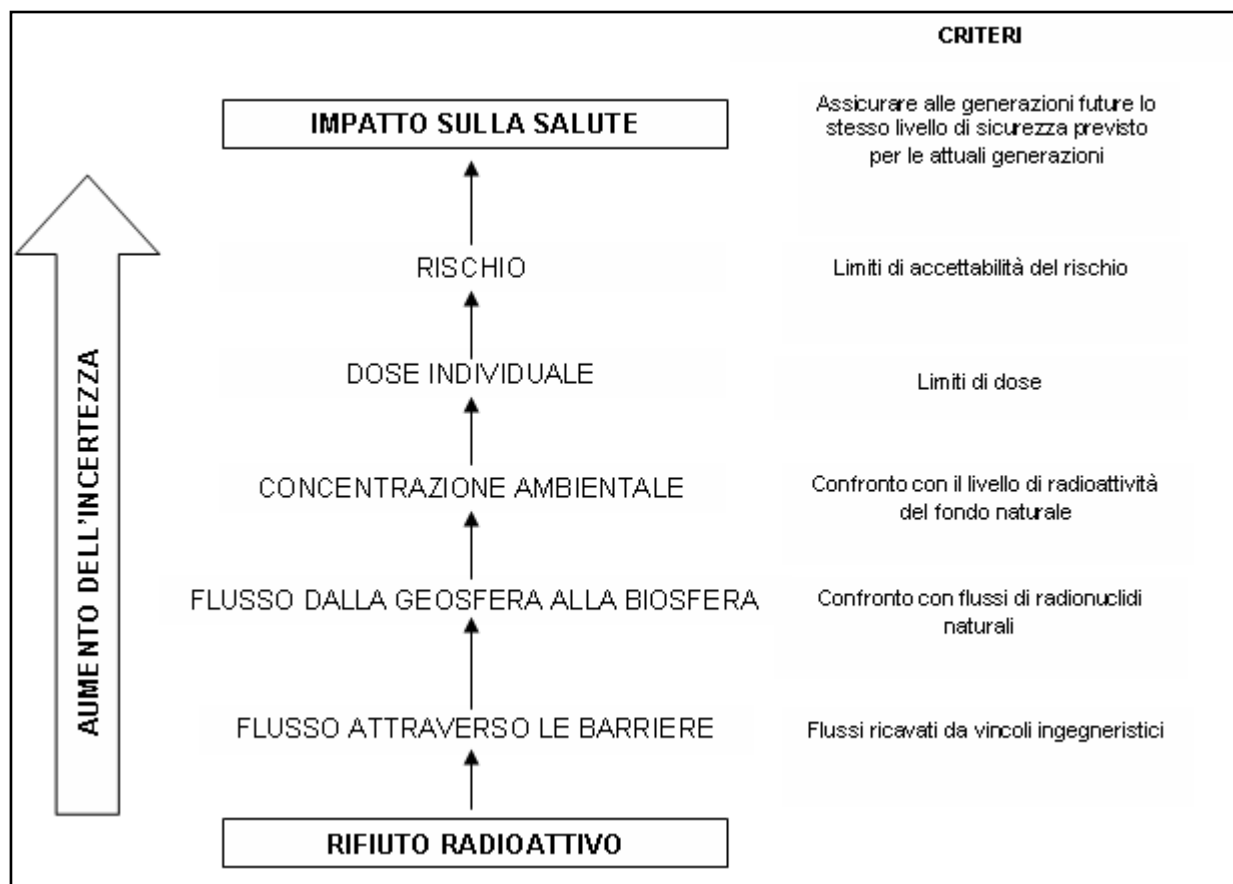


Figura 2.1

### **2.2.1 Caratteristiche richieste per gli indicatori di sicurezza**

Poiché gli indicatori di sicurezza possono variare ampiamente nelle loro caratteristiche e nella loro utilità, come base per giudicare la qualità di un indicatore sono proposte le seguenti caratteristiche :

*affidabile* - devono essere basati su principi ben stabiliti ed devono poter essere applicati in una vasta gamma di situazioni;

*rilevante* - devono riguardare direttamente la sicurezza e la funzionalità ambientale del deposito;

*semplice* - essi devono essere non troppo complessi altrimenti, a causa del lungo tempo e difficoltà per la stima, potrebbero essere meno utilizzati. Inoltre indicatori semplici possono facilitare l'aspetto della comunicazione;

*diretto* - gli indicatori dovrebbero essere quanto di più strettamente correlato con le proprietà caratteristiche di alcuni sistemi primari del deposito e dovrebbero comportare il minimo sforzo di calcolo per tradurre le informazioni disponibili nel formato voluto per l'indicatore stesso;

*comprensibile* - gli utenti devono sapere esattamente che cosa rappresentano gli indicatori e le modalità per determinarne il valore e questo si collega con esigenze di semplicità e immediatezza;

*pratico* - i dati, gli strumenti o modelli necessari per la stima degli indicatori dovrebbero essere disponibile e ben provati.

Appare evidente che nessuno indicatore può rispondere a tutte queste auspicabili caratteristiche. Tuttavia, come regola guida, devono essere evitati quegli indicatori con un gran numero di carenze rispetto alla lista di cui sopra. E' inoltre riconosciuto che, per ottenere una ragionevole e completa comprensione delle prestazioni del sistema deposito, si può rendere necessario l'utilizzo di alcuni indicatori indipendenti, ma complementari. In questo caso, tuttavia, una qualche cautela deve essere esercitata in modo che il totale sistema di indicatori non diventi troppo complesso, nella speranza di raggiungere una completa valutazione delle prestazioni. Un equilibrio tra la completezza e la semplicità è necessario.

### **2.2.2 Gli indicatori di sicurezza di tipo radiologico**

Lo scopo di depositi di rifiuti radioattivi è quello di isolare i rifiuti dalla biosfera. E' generalmente accettato che l'isolamento e il contenimento non può essere garantito in modo assoluto e che, in tempi geologici, prima o poi, una frazione dell'inventario dei rifiuti radioattivi possa essere rilasciato dal deposito, con una migrazione attraverso la geosfera e, infine, raggiungere la biosfera.

Nel caso dei depositi superficiali e sub-superficiali, destinati a contenere rifiuti a bassa e media attività, tale considerazione non rappresenta motivo di preoccupazione nella misura in cui le barriere presenti svolgano la loro funzione di contenimento per tempi comunque superiori a quelli necessari per il decadimento dell'inventario radioattivo a livelli comparabili con il fondo naturale.

Una valutazione delle prestazioni di un deposito comporta l'applicazione di modelli matematici che simulano i processi fisici e chimici che si verificano nei diversi compartimenti: deposito, geosfera e biosfera. Il risultato finale è di solito una stima della dose ricevuta da esseri umani che si suppone

possano restare esposti, in qualche modo, a radionuclidi rilasciati dal deposito. La dose, poi, può essere trasformata in un livello di rischio corrispondente attraverso l'applicazione diretta del fattore di rischio ICRP che tenga conto del rischio di esposizione.

Il principale svantaggio nell'uso della dose o del rischio, come indicatori di sicurezza, riguarda l'incertezza che circonda la loro stima. Questa incertezza è in gran parte associata con le incertezze relative al futuro stato della biosfera (essere umano e catena alimentare) e delle condizioni nella zona vicino alla superficie. Inoltre, questa incertezza aumenta con il periodo di tempo considerato.

Al tempo stesso, si rileva che vi è anche una notevole incertezza associata anche alla previsione del flusso di trasferimento dei radionuclidi attraverso il sistema multi-barriera e la geosfera, anche se questa incertezza affligge quasi tutti gli indicatori di sicurezza.

Nei paragrafi seguenti, discuteremo brevemente sui concetti di applicabilità del rischio e di dose a lungo termine nella valutazione della sicurezza di un deposito, rimandando al § 2.5 per una trattazione più dettagliata.

### **2.2.2.1 Il Rischio**

Diversi paesi hanno deciso di utilizzare il rischio individuale di effetti sulla salute (soprattutto cancro indotto dalle radiazioni) come indicatore primario delle prestazioni di confinamento dei radionuclidi da parte dei depositi.

Una tipica applicazione per limitare l'impatto di un deposito è di stabilire un limite numerico al rischio applicabile a qualsiasi individuo che possa venire interessato dalla presenza del deposito in qualsiasi momento.

Il rischio, in questo contesto è normalmente definito come il prodotto della probabilità di esposizione a una dose particolare e la probabilità che ciò abbia un particolare effetto sulla salute direttamente derivante da tale dose.

L'utilizzo del rischio come indicatore della sicurezza dello smaltimento delle scorie radioattive in un deposito presenta sia vantaggi che svantaggi. Un vantaggio è l'applicabilità generale dell'indicatore, in quanto il concetto di rischio è associato a tutte le attività umane e il rischio di una causa particolare, può essere paragonato facilmente con i rischi derivati da qualsiasi altra causa. Inoltre, la possibilità di un confronto tra diverse attività umane, consente di ottenere uno strumento molto efficace per la razionalizzazione delle decisioni in merito alla destinazione di risorse nella società moderna. Un altro vantaggio di usare il rischio come indicatore è che un unico parametro può contenere i risultati di tutti i tipi di scenario, sia gli scenari di evoluzione graduale o normali che hanno una probabilità vicina a uno, ma conseguenze basse che scenari catastrofici che hanno una bassa probabilità di accadimento, ma con conseguenze relativamente elevate.

Oltre al problema generale dell'incertezza, a lungo termine, un altro svantaggio di usare il rischio come indicatore della sicurezza per depositi di scorie radioattive è che i valori non sono molto utili

nell'illustrare e comunicare al pubblico la sicurezza di una determinata attività. Il rischio è un concetto difficile da spiegare all'opinione pubblica che presenta, in generale, la tendenza a prestare attenzione molto di più, se non esclusivamente, alle conseguenze di un evento piuttosto che alla probabilità con cui è prevista una tale evoluzione o al prodotto di questi due fattori.

#### **2.2.2.2 La Dose**

La *dose* da radiazioni è una misura dell'energia depositata dalla radiazione. Nel considerare l'effetto biologico delle diverse radiazioni sull'organismo umano si introduce la *dose equivalente*. Quando è possibile pesare adeguatamente la sensibilità dei tessuti umani al tipo specifico di radiazione si può parlare di *dose efficace*; questa ultima può essere direttamente correlata con la probabilità di subire un determinato danno. L'uso della dose come un indicatore di sicurezza per le prestazioni dei depositi è supportato da consuetudini tecniche e legislazioni nazionali ed internazionali. In ambito radioprotezionistico, la valutazione dei sistemi di protezione delle radiazioni si è sempre basato sulla limitazione delle dosi ai singoli individui potenzialmente esposti.

Tuttavia, dal momento che le dimensioni e la distribuzione futura della popolazione nelle vicinanze di un deposito non possono essere conosciute con precisione significativa, anche la dimensione del gruppo potenzialmente esposto (PGE) è un fattore da considerare nella valutazione della significatività di un evento.

Così, uno scenario di *intrusione* del tipo *perforazione* che espone alla contaminazione un equipaggio di perforazione di poche persone ha un peso diverso dallo scenario dove radionuclidi penetrano la catena alimentare con conseguente ingestione di un folto gruppo di persone. Questa considerazione pone il problema di valutare non solo le singole dosi, ma anche il numero di persone potenzialmente esposte. La ponderazione delle dosi sulla base delle dimensioni dei gruppi potenzialmente esposti è stato proposto in alcuni paesi, ma non in termini quantitativi.

Va comunque detto che allo scenario *perforazione* può essere associata una probabilità di accadimento trascurabile, almeno nella fase di controllo istituzionale attivo ed in questa fase può essere escluso dall'analisi di sicurezza di un deposito superficiale o sub-superficiale.

In altri settori della radioprotezione in cui viene utilizzata la dose come indicatore di sicurezza, affinché possa essere applicato il principio della *limitazione della dose*, le esposizioni alle radiazioni dovrebbero verificarsi con una probabilità elevata. Tuttavia, nel caso dei depositi di rifiuti radioattivi in cui, per scenari catastrofici, le dosi possono essere ricevute, ma con una bassa probabilità, il criterio del *limite di dose* non può essere direttamente applicato.

In alcuni paesi si giudicano alcuni scenari talmente improbabili da essere trascurati e i rimanenti scenari sono sottoposti a valutazioni di tipo conservativo, come se la probabilità di occorrenza fosse



unitaria. In questo modo, la dose può essere usata come un indicatore di sicurezza universale per i depositi di rifiuti.

Le soluzioni alternative sono quelle di applicare un indicatore di rischio, come descritto nella sezione precedente, nella valutazione degli scenari probabilistici e un indicatore di dose per lo scenario normale di rilascio graduale (metodo ibrido dose/rischio) o di utilizzare un indicatore di rischio come criterio di sicurezza per tutti gli scenari (vd. § 2.5).

### **2.2.3 Altri indicatori di sicurezza**

Il movimento di radionuclidi da un deposito all'ambiente umano è governato da processi di trasporto all'interno della barriera artificiali e naturali. Vi è una forte interrelazione tra le caratteristiche del sistema; infatti la combinazione di barriere inefficaci e grandi ratei di rilascio può causare flussi elevati di attività nella biosfera provocando alte concentrazioni in superficie. Così, le caratteristiche di questo tipo possono essere utilizzate come indicatori supplementari per la sicurezza del deposito, come mostrato in Figura 2.1.

In questo paragrafo, saranno discussi come indicatori di sicurezza di un deposito: le concentrazioni, i flussi attraverso le barriere e la biosfera, la radiotossicità e i tempi. Gli indicatori più rilevanti sono quelli che possono essere confrontati con i dati relativi a studi su fenomeni naturali e questo perché le previsioni per il futuro sono fatte estrapolando i dati e modelli sulla base di prove della evoluzione dinamica del sistema.

Va osservato che mentre la dose e il rischio sono indicatori di sicurezza già stabiliti a seconda dei casi e ben compresi dalla comunità scientifica e dagli esperti per l'uso in questo contesto, gli indicatori di sicurezza discussi di seguito ancora non godono dello stesso riconoscimento diffuso e per la loro applicazione è internazionalmente richiesta l'acquisizione di una maggiore esperienza.

#### **2.2.3.1 I flussi**

Il flusso è una misura delle prestazioni dinamiche del deposito, che descrive il tasso di movimento di una sostanza attraverso le interfacce o le barriere previste nel sistema. Può essere utilizzato come una misura diretta delle capacità di contenimento costituite dall'efficacia dei diversi ostacoli di varia natura interposti tra la sorgente radioattiva e l'ambiente esterno.

#### ***Flussi attraverso le barriere***

I flussi all'interno del sistema multibarriera di un deposito sono usati per stabilire gli indicatori delle prestazioni delle barriere e per fissare i corrispondenti criteri. Indicatori di questo tipo sono

strumenti molto utili per il progettista del deposito e per l'identificazione del sito di localizzazione, anche se è difficile stabilire un rapporto diretto tra flussi attraverso le barriere artificiali e sicurezza globale del deposito. I flussi possono essere basate sull'attività totale, o l'attività di nuclidi critici, e possono essere forniti come tassi di emissione ed in questo caso deve essere specificato il periodo di tempo su cui il calcolo del totale dell'attività deve essere effettuato.

### ***Flussi nella biosfera***

L'impatto dei radionuclidi su qualsiasi biosistema è governato, tra le altre cose, dal flusso di attività nel sistema. Le conseguenze radiologiche dipendono dalla conseguente livello di contaminazione ambientale e dalla potenziale esposizione umana nell'ambiente stesso e come già accennato, ci sono grandi incertezze nella valutazione di questi fattori nel lungo termine. L'utilizzo del flusso di radionuclidi può eludere alcune di queste difficoltà consentendo un confronto con il flusso di radionuclidi naturali nella biosfera.

La concentrazione di radionuclidi naturali in specifici comparti ambientali è il risultato della dinamica del trasporto di radionuclidi naturali nell'ambiente. I cicli naturali di trasporto di materia sono interessati da processi come l'erosione, la dissoluzione in acqua, flussi acquiferi, sedimentazione, ri-sospensione e trasporto dal vento, flusso continuo di radionuclidi naturali dalla terra verso il mare, attraverso fiumi e laghi. Tutto ciò comporta, inevitabilmente, una qualche esposizione degli esseri umani a tali flussi.

Confrontando i flussi di radionuclidi generati da un deposito con il flusso di radionuclidi naturali mediato su una vasta area e su lunghe scale temporali, vi è la possibilità di ottenere una misura relativa della rilevanza radiologica del flusso di radionuclidi dal deposito.

L'utilizzo dei flussi su recettori di grandi dimensioni, come i mari e gli oceani, come un indicatore di sicurezza rende il calcolo meno dipendente da ipotesi circa l'ambiente, i percorsi, e radiosensibilità (per i nuclidi comparabili). Qualsiasi proprietà di qualsiasi elemento della catena sorgente-uomo influenzerà le dosi dal deposito e dai flussi all'incirca allo stesso modo. Tali flussi sono più adatti come indicatori di impatto su grandi popolazioni a livello globale o in quanto la proprietà dei più grandi recettori non sono così variabili, a lungo termine, come quelle di laghi e fiumi. Tuttavia, questo indicatore di sicurezza non fornisce una misura della sicurezza delle persone su scala locale, cioè quelle che vivono in prossimità del deposito, e quindi si manifesta la necessità di essere usato insieme con un altro indicatore di sicurezza più localizzato.

Prima di applicare un flusso come indicatore, è necessario garantire che il flusso naturale misurato, venga valutato e descritto sulle stesse basi di valutazione del flusso calcolato dal deposito. Ad esempio, il flusso naturale potrebbe essere dominato da fenomeni di trasporto di particelle minerali ,

il che implica che i radionuclidi si trovano non in una forma facilmente assorbito dal biota. D'altra parte, nei calcoli di flusso da un deposito, è usuale assumere che i nuclidi siano in soluzione.

Nelle valutazioni di sicurezza il flusso, come indicatore dell'impatto sulla biosfera, ha il vantaggio di risultare come output dei calcoli di trasporto per il far-field, tuttavia occorre prestare attenzione nel definire la posizione di questo flusso. Di solito, il flusso viene valutato al confine di formazioni rocciose, o più in generale, al confine tra il far-field e la biosfera o l'ambiente accessibile.

Il flusso in biosfera ha trovato limitate applicazioni come indicatore. Una serie di problemi legati all'utilizzo di questo indicatore richiedono ulteriore attenzione:

- per quantificarlo in modo soddisfacente, deve essere concepito come indipendente da altri indicatori, ad esempio, la dose e il rischio;
- deve essere stabilito un metodo per trattare i radionuclidi artificiali dal deposito che non hanno analoghi radionuclidi naturali;
- in considerazione della variabilità dei flussi naturali locali, si rende necessario un metodo per ottenere un valore medio rappresentativo per il confronto con i flussi calcolati dal deposito

### **2.2.3.2 Il tempo**

Il tempo, può essere un importante e utile indicatore delle potenzialità di un deposito o dei suoi singoli componenti nell'isolare e contenere i materiali pericolosi. Ad esempio, il tempo può essere usato come un indicatore diretto:

- per mostrare l'efficacia di una barriera naturale o ingegneristica osservando o stimando il tempo impiegato da un particolare isotopo ad attraversarla o per descrivere il tempo necessario per trasmettere una certa quantità di tale elemento;
- del tasso relativo di movimento di elementi diversi e quindi la capacità della barriera di ritardarne il movimento rispetto a quello determinato dalle portate delle acque sotterranee;
- del potenziale isolamento del sistema naturale utilizzando l'età delle acque sotterranee profonde come un'indicazione del grado di miscelazione tra le acque profonde e superficiali;
- per descrivere il tasso di variazione dei parametri importanti del sistema naturale (pH, Eh, gradienti idraulici, ecc) o per descrivere l'evoluzione naturale di minerali (bentonite, formazioni argillose,...).

Citiamo infine il tempo di rilascio quale criterio determinante nella progettazione di depositi ingegneristici. Nelle valutazioni di performance di un deposito, il tempo di rilascio dei rifiuti è il tempo previsto, al termine del controllo istituzionale, oltre il quale si prevede che il radionuclide possa produrre detrimento alla popolazione. Relativamente al sito, il tempo di rilascio coincide con

la fine del controllo istituzionale e corrisponde all'assenza di impatto radiologico sul gruppo critico di riferimento.

### 2.2.3.3 La concentrazione ambientale dei contaminanti

La concentrazione di un contaminante in un determinato momento e luogo può fornire un indicazione indiretta del potenziale effetto sugli esseri umani e il loro ambiente. Facendo alcune ipotesi circa l'idrosfera superficiale, i percorsi di esposizione e le abitudini di un gruppo di popolazione umana, si può effettuare una stima della dose o del rischio sulla base delle informazioni sulla concentrazione. Tuttavia, le incertezze che si introducono riferendosi a tutte queste ipotesi possono essere superate utilizzando la concentrazione stessa come indicatore di sicurezza.

Se si considera come indicatore la concentrazione in uscita dalla geosfera, si dovrà considerare solo il fenomeno della diluizione nella geosfera. Analogamente, l'uso della concentrazione come indicatore per valutare le conseguenze di una intrusione da perforazione di pozzi, evita la comparsa delle incertezze che sorgerebbero nella stima della dose.

E' relativamente facile stabilire valori di riferimento per la valutazione delle concentrazioni, utilizzando radionuclidi naturali esistenti nell'ambiente, anche se vengono sviluppati degli "schemi di equivalenza radiologica" per i radionuclidi non naturali provenienti dal deposito. Un approccio suggerito è quello di presumere che i radionuclidi artificiali siano di comparabile radiotossicità con quella degli emettitori alfa naturali e che, quindi, la concentrazione di attività totale deve essere paragonata all'attività alfa naturale. In alternativa si possono effettuare confronti basati direttamente sulla radiotossicità, ad esempio, dividendo la concentrazione in Bq/L con i rispettivi valori del limite annuo di aspirazione (ALI), come specificato dalla ICRP [2.1].

### 2.2.3.4 Sommario sugli indicatori di sicurezza

	INDICATORE	VANTAGGI	SVANTAGGI
UOMO	Rischio	<p>Indicatore diretto di impatto sull'uomo</p> <p>Integra tutti i canali di esposizione dell'uomo</p> <p>Consente un confronto con altri pericoli</p> <p>Tiene conto della probabilità di esposizione</p>	<p>Possibili problemi di comunicazione</p> <p>Scarsa applicabilità per tempi molto lunghi</p> <p>Complessità computazionale</p> <p>Difficoltà nella stime delle probabilità</p>
	Dose	<p><u>Indicatore di impatto sull'uomo</u></p> <p>Ben stabilita e compresa</p> <p>Integra tutti i canali di esposizione dell'uomo</p>	<p>Non tiene conto della probabilità di esposizione</p> <p>Scarsa applicabilità per tempi molto lunghi</p>
AMBIENTE	Concentrazione Ambientale	<p>Concettualmente semplice</p> <p>Indipendente dal contesto umano</p> <p>Misura l'impatto ambientale locale</p>	<p>Assenza di comparazione per nuclidi artificiali</p> <p>Problemi di definizione del livello di riferim. generico</p>

	<b>Flusso nella Biosfera</b>	Indipend. da modifiche locali biosfera/uomo Misura impatti locali e globali	Difficoltà concettuali Problemi di definizione del livello di riferim. generico Assenza di comparazione per nuclidi artificiali
	<b>Flusso attraverso le barriere</b>	Indicatore delle prestazioni delle barriere	Non direttamente connesso alla sicurezza del deposito Distoglie attenzione agli obiettivi generali di sicurezza
	<b>Tempo</b>	Concettualmente semplice Indicatore delle prestazioni delle barriere	Non direttamente connesso alla sicurezza del deposito
<b>RIFIUTI</b>	<b>Radiotossicità</b>	Concettualmente semplice Indicatore della vita utile del deposito <sup>2</sup>	Incompleta e sensibile alle ipotesi

---

<sup>2</sup> È opportuno specificare che la tipologia di deposito è funzione della tipologia di rifiuto da smaltire ed in particolare della vita-media dei radionuclidi. Per i depositi superficiali e sub-superficiali possono essere presenti, purché in bassa concentrazione, anche radionuclidi a lunga vita. I 300 anni di vita utile del deposito, costituiscono un periodo di riferimento consolidato a livello internazionale come 10 volte la vita media del Cs-137 adottato quale radionuclide di riferimento per la stima dell'attività equivalente contenuta nei rifiuti.

## 2.3 L'UTILIZZO DEGLI INDICATORI DI SICUREZZA NELLA SCALA DEI TEMPI

La capacità di stimare i valori per i vari indicatori presentati nel § 2.5 varia in funzione del tempo di riferimento delle valutazioni di sicurezza di un deposito. Poiché l'incertezza aumenta continuamente con il tempo, è conveniente indicare specifici intervalli di tempo, e fornire un quadro generale sulla relativa utilità di ciascun indicatore in questi intervalli.

I tempi da considerare sono:

### **Deposito superficiale:**

- chiusura –  $10^3$  anni

### **Deposito geologico:**

a) chiusura –  $10^3$  anni

b)  $10^3$  anni –  $10^6$  anni

c) oltre  $10^6$  anni

Per quanto concerne i depositi superficiali e sub-superficiali, solo il primo intervallo temporale è significativo, mentre gli altri due assumono importanza nella scelta dei criteri di localizzazione dei depositi geologici, per i quali è importante sottolineare che la delimitazione tempi di  $10^4$  e  $10^6$  anni sono indicative e non deve essere interpretata come nettamente definita. I valori numerici degli indicatori per un impianto di smaltimento di rifiuti nucleari sono spesso stimati per mezzo di modelli matematici. L'affidabilità di questi modelli dipende, tra l'altro, dalla quantità e dalla qualità delle informazioni disponibili e diminuisce con l'aumentare del tempo di previsione. Pertanto, per valutazioni a lungo termine, la fiducia nei risultati diminuisce

Nei paragrafi seguenti vengono presentati possibilità e limitazioni per valutare la sicurezza a lungo termine dei siti di smaltimento finale attraverso l'uso di vari indicatori. Tuttavia, occorre precisare che la scelta sulla localizzazione del sito di smaltimento finale deve essere valutata sulla base di studi specifici sitologici che tengano conto delle specifiche caratteristiche dei rifiuti. Come approccio generale, le previsioni per il futuro devono essere fatte estrapolando dati e modelli sulla base di prove della evoluzione dinamica dei sistemi geologici e di altri sistemi naturali del passato. Vi è un crescente uso di *analogie di sistemi naturali* per sostenere i metodi di valutazione, per fornire valori di riferimento per il confronto con i valori degli indicatori calcolati e per fornire prospettive a lungo e lunghissimo periodo.

### **2.3.1 Scala dei tempi: chiusura – $10^3$ anni**

Nelle valutazioni di sicurezza si presume che il controllo istituzionale sul sito rimanga attivo per almeno diverse centinaia di anni dopo che l'impianto è stato sigillato.

Questa ipotesi, altamente auspicabile, ma difficile da dimostrare può essere ridotta alla condizione che almeno le informazioni sulla posizione del deposito vengano mantenute.

I grandi cambiamenti nel clima, di potenziale importanza, sono quelli che possono derivare da possibili effetti serra, il che potrebbe comportare alcune modifiche alle condizioni superficiali della geosfera come: al prosciugamento o straripamento di fiumi e laghi, ad una moderata variazione del livello del mare e ad erosioni costiere.

Significativi cambiamenti nei sistemi naturali in strati geologici profondi sono improbabili nella scala del tempo di  $10^3$  anni, a condizione che i siti si trovino in zone tettonicamente stabili.

In generale, si può presumere che la biosfera resti paragonabile a quella dei giorni nostri, cioè nella forma in cui è stata modellata dall'uomo dopo l'introduzione dell'agricoltura circa  $10^4$  anni fa. Non sembra irragionevole supporre che ci sarà un interesse comune e condiviso nel mantenere condizioni prossime a quelle attuali, cioè favorevoli al mantenimento e allo sviluppo dell'agricoltura sia su scala privata che industriale.

Ai fini della valutazione delle conseguenze di future azioni umane come, per esempio, l'intrusione in un sito di smaltimento, il livello futuro della tecnologia deve essere assunto almeno equivalente a quello esistente al momento. Un livello inferiore di tecnologia renderebbe meno probabile la possibilità tecnica di una intrusione. D'altra parte, una tecnologia migliorata suppone una maggiore conoscenza, una migliore conservazione di dati e la consapevolezza dei rischi dei depositi. Intrusioni umane deliberate (cioè con la conoscenza del luogo e della natura dei rifiuti) non sono ritenute oggetto di analisi in una valutazione della sicurezza. Tuttavia, almeno in linea di principio, si può tener conto della possibilità di intrusioni intenzionali o accidentali riducendo il rischio di una tale evenienza selezionando opportuni siti e progetti di deposito. Pur riconoscendo che esiste una notevole incertezza in questo periodo di tempo, è ragionevole tentare di effettuare stime quantitative degli indicatori da utilizzare. Il calcolo dovrebbe tener conto della gamma di diverse condizioni della biosfera fornendo indicazioni generali sulle prestazioni di contenimento e sulla sicurezza complessiva del deposito. Durante questo periodo gli indicatori di sicurezza radiologica saranno di primaria importanza, con gli altri indicatori che possono fornire un sostegno aggiuntivo per la migliore interpretazione delle influenze del contesto ed una indicazione di possibili impatti sull'ambiente stesso, su base attuale ed in prospettiva.

L'uso del concetto di *biosfere di riferimento* è un concetto emergente ed il suo utilizzo, in questo lasso di tempo, è destinato ad aumentare dal momento che risulta in grado di eliminare molte speculazioni sull'esatta natura dei futuri contesti ambientali. Questo concetto è stato introdotto come approccio standardizzato alla modellazione della biosfera proprio nel contesto della valutazione della sicurezza dei depositi di rifiuti radioattivi, principalmente perché la natura della futura biosfera associata ad un deposito dato, non può essere conosciuto. Il vantaggio del concetto è di fornire un approccio semplice, robusto e difendibile per rappresentare i futuri modelli di trasferimenti di esseri umani attraverso la biosfera. Inoltre, l'adozione di una biosfera di riferimento

potrebbero rendere il confronto delle diverse opzioni di smaltimento più semplice, consentendo di focalizzare l'attenzione solo su questioni geologiche.

## **2.4 SOMMARIO SUGLI INDICATORI DI SICUREZZA E SCALA DEI TEMPI**

- 1) A lungo termine, i migliori indicatori della sicurezza possono essere considerati il rischio e la dose.
- 2) Fermo restando quanto indicato al punto 1) le valutazioni di sicurezza a lungo termine risultano più efficaci combinando diversi indicatori di sicurezza, quali: il rischio, la dose, la concentrazione ambientale, il flusso attraverso le barriere.
- 3) Gli indicatori diventano particolarmente preziosi quando sono supportati da osservazioni su analogie di fenomeni naturali.
- 4) Nel periodo fino a circa  $10^3$  anni dopo la chiusura del deposito, la sicurezza si deve basare su valutazioni quantitative, utilizzando calcoli di dose/rischio supportati dal calcolo di altri indicatori di sicurezza (per depositi superficiali sub/superficiali e geologici).
- 5) Nel periodo compreso tra circa  $10^4$  anni a circa  $10^6$  anni dopo la chiusura del deposito, la sicurezza si deve basare su valutazioni di sicurezza sia quantitative che qualitative che riferiscano ad una combinazione di indicatori di sicurezza con l'accento che può soffermarsi sempre più verso valutazioni qualitative all'approssimarsi di  $10^6$  anni (solo per i depositi geologici).
- 6) Oltre i  $10^6$  anni scarsa credibilità può essere attribuita a valutazioni di sicurezza integrate (solo per i depositi geologici).

## **2.5 LA DOSE E IL RISCHIO COME INDICATORI DELLA SICUREZZA**

Lo scopo di questa sezione è quello di esaminare i diversi modi di impostare appropriati criteri di protezione radiologica di smaltimento dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività, concentrandosi soprattutto sulla loro definizione in termini di dose o rischio; presentando i vantaggi e gli svantaggi di ogni metodo, nel tentativo di raggiungere alcune conclusioni generali. Il documento riguarda solo il periodo post-chiusura di un deposito e discute solo i criteri che tentano di limitare il danno individuale senza considerare i rischi per la popolazione.

### **2.5.1 Le problematiche della dose**

L'esempio dello scenario dell'intrusione in un deposito sub-superficiale (scenario comunque a probabilità molto bassa) illustra alcune problematiche inerenti all'utilizzo della dose quale unico indicatore di sicurezza.



Se ci fosse intrusione umana nel deposito causata da perforazioni esplorative con analisi dei campioni in superficie, con una probabilità molto bassa ma diversa da zero, allora è concepibile che per i gruppi potenzialmente esposti possano superati i limiti di esposizione.

Come mostrato nell'equazione (1), il limite di dose può essere visto come un limite alla possibilità di contrarre un cancro indotto dalle radiazioni

$$(\text{dose}) \cdot (\text{fattore di rischio}) = (\text{probabilità di subire danni biologici}) \quad (1)$$

In questa equazione si presuppone che l'individuo riceverà la dose. Se non è certo che l'individuo riceverà la dose, la probabilità di contrarre un cancro indotto da radiazioni deve essere inferiore. Pertanto, deve essere tenuta in conto la probabilità che la dose sia ricevuta. L'equazione diventa allora:

$$(\text{dose}) \cdot (\text{fattore di rischio}) \cdot (\text{probabilità di ricevere la dose}) = (\text{probabilità di subire danni biologici}) \quad (2)$$

Questo vuol dire che, nel campo degli effetti stocastici, la possibilità di subire danni biologici per un individuo esposto sarà la stessa se:

- viene ricevuta una dose di 1 mSv (utilizzando l'eq. (1));
- se vi è un 50% di probabilità di ricevere una dose di 2 mSv (utilizzando l'eq. (2)).

A partire da queste considerazioni si può definire il termine rischio come segue:

$$(\text{probabilità di subire un'esposizione}) \cdot (\text{probabilità che l'esposizione causerà un deleterio effetto sulla salute}) \quad (3)$$

### 2.5.2 Il rischio e il concetto di scenario

L'applicazione del concetto di rischio richiede un'ulteriore riflessione sull'evidente constatazione che l'esposizione di un individuo dovuta alla presenza della struttura di smaltimento, può avvenire secondo diverse modalità. Ciò è schematizzato, in via del tutto generale e con riferimento sia ai depositi geologici che superficiali, nella Figura 2.2, che mostra tre possibili *scenari* di esposizione: esposizione diretta dovuta ad intrusione umana, una esposizione derivante dal normale e graduale fenomeno di lisciviazione dei rifiuti nel deposito e risalita lenta attraverso le acque sotterranee (denominato anche scenario di *normale evoluzione*) e la possibile esposizione derivante da possibili faglie o fratture nel terreno.

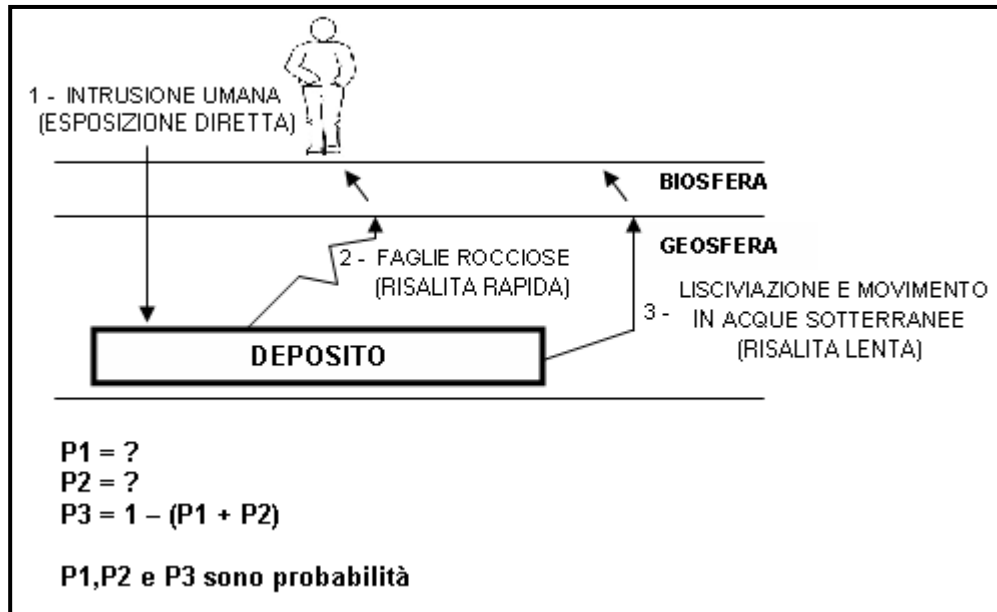


Fig. 2.2

Ad ognuno di questi scenari di esposizione deve essere assegnata una probabilità del loro verificarsi la cui somma sia pari all'unità, presumendo che questi siano i soli scenari realisticamente ipotizzabili o, in altre parole, che gli scenari siano da ritenersi *mutuamente esclusivi*. Per ottenere una stima del rischio, le dosi calcolate per ogni scenario dovranno essere moltiplicate per le rispettive probabilità assegnate e per il fattore di rischio. Mentre, i rischi calcolati per ogni scenario potrebbero essere riassunti come una misura del pericolo futuro per gli individui, stabilire i criteri di sommabilità dei vari scenari di esposizione non è altrettanto semplice.

Il punto importante è che i rischi relativi ai diversi scenari dovrebbero essere sommati se le stesse persone sono coinvolte come *protagonisti* in tutti gli scenari. Per esempio, gli individui che potrebbero essere esposti allo scenario di *normale evoluzione* e a quello di *frattura del terreno* potrebbero essere i produttori di latte operanti in una posizione particolare rispetto al deposito che consumano grandi quantitativi di latte e prodotti lattiero-caseari ottenuti dal loro gregge che pascola su terreni contaminati. Se non ci sono validi motivi per escludere il verificarsi di una tale situazione, i rischi dei due scenari dovrebbero essere aggiunti. Tuttavia, vi sono casi in cui i rischi non dovrebbero essere aggiunti come, ad esempio, il caso in cui gli individui esposti per lo scenario di *intrusione umana* sono i tecnici di ispezione delle trivellazioni che, ovviamente, non risentono delle esposizioni derivate dagli altri due scenari presi in considerazione.

Sulla base di quanto esposto, la definizione di rischio diventa:

$$R = \gamma \sum_i P_i E_i \quad (4)$$

dove  $\gamma$  è il fattore di rischio (o probabilità) dell'effetto per unità di dose,  $P_i$  è la probabilità di scenario il quale, se si verifica, dà origine a una dose efficace  $E_i$  (supponendo che questa è inferiore alla soglia per effetti deterministici e che R sia riferito allo stesso individuo).

Il problema di particolare importanza nell'esecuzione dei calcoli del rischio è l'identificazione di una gamma appropriata ed esaustiva di scenari di esposizione e l'assegnazione di una probabilità a ciascuno di loro. L'insieme completo degli scenari dovrebbe essere sufficiente per comprendere e caratterizzare in modo significativo ogni evoluzione ragionevolmente plausibile del sito e quindi ottenere la condizione necessaria che la somma delle loro probabilità di accadimento risulti pari all'unità.

Alcuni scenari possono rappresentare una serie di possibili evoluzioni del sistema che comportano conseguenze radiologiche molto simili e quindi possono essere trattati come una unica possibile evoluzione futura. Questa attività di selezione e riduzione degli scenari fino ad un set adeguato e differenziato, può richiedere uno sforzo considerevole per l'esperto decisore anche se coadiuvato da simulazioni con modelli computerizzati o supportato da analogie relative a fenomeni naturali. Inoltre, la nostra capacità di distinguere tra diversi scenari, diminuisce con l'aumentare della scala temporale di analisi ed anche l'assegnazione di una probabilità agli scenari è un'operazione altrettanto problematica e può apparire spesso un processo piuttosto arbitrario.

Un punto degno di nota su questi calcoli è che gli individui sono considerati in futuro *a rischio* di più di uno degli scenari. Tuttavia, in qualsiasi istante futuro, un individuo è protagonista di un solo scenario. Nell'esempio di Figura 2.2 i rischi individuali derivati dagli scenari *normale* e *faulted* vengono sommati, ma, chiaramente, dal punto di vista di una futura persona, egli sarà a rischio di uno o dell'altro di questi scenari, non di entrambi nello stesso tempo!

Vale la pena notare che il rischio effettivamente vissuto denominato *rischio condizionale* potrebbe essere superiore o inferiore al rischio complessivo valutato in una prospettiva attuale.

Esiste una variante per il calcolo dei rischi di cui sopra, che evita esplicitamente la fase di selezione degli scenari. In questa metodologia di valutazione probabilistica del rischio sono utilizzate delle tecniche per simulare l'evoluzione a lungo termine dell'ambiente naturale pertinente al luogo di smaltimento e la misura del rischio che si ottiene finisce per tener conto di tutte i possibili scenari futuri [2.2]. In sostanza, vengono sviluppati dei modelli che rappresentano possibili condizioni future del sito. Una simulazione Monte Carlo quindi genera campioni di possibili evoluzioni future con una copertura temporale valida sia per i depositi superficiali che geologici. Quindi, vengono valutati l'effetto di questi nuovi "*stati futuri*" con le loro incertezze associate sulla stima del rilascio dal deposito, dell'impatto ambientale della distribuzione di radionuclidi e del rischio.

### 2.5.3 Le problematiche del rischio

Le tematiche illustrate in precedenza evidenziano che forse il tallone d'Achille del Rischio è che questo concetto è una idea difficile da afferrare, tanto più per un membro del pubblico che è coinvolto direttamente e preoccupato per la sicurezza di un deposito. Inoltre, la generale percezione del rischio dipende dal fatto che mentre il danno viene giudicato direttamente dall'esperienza, la causa del fenomeno che lo sviluppa è poco conosciuta. Questo comporta il fatto che le persone attribuiscono maggiore importanza alle situazioni in cui ci sono circostanze avverse particolarmente gravi (danno elevato), anche se la loro probabilità di accadimento è molto bassa

Tuttavia, è possibile definire un criterio di rischio, ma esprimerlo in termini di *dose pesata in probabilità*. In altre parole, una dose di 10 mSv può che ha una probabilità di verificarsi di 0,1 si trasforma in una *dose pesata in probabilità* di 1 mSv. L'idea è interessante, in quanto la dose risultante può essere paragonato a una *dose limite*: ed il rapporto è un concetto facile da capire. Tuttavia, questa procedura ha i suoi limiti, che derivano principalmente dal considerare eventi che hanno dalle conseguenze alte, ma bassa probabilità. Una ragione è che a causa delle differenze tra la dose e i ratei di dose, il fattore di rischio può essere diverso da quello normalmente applicato alla *dose limite*. Un esempio estremo sono quelli in cui gli *effetti deterministici* possono essere importanti.

E' possibile esprimere un criterio di *rischio* in termini di dose e probabilità in un grafico. La Figura 2.3 mostra una curva con un vincolo di rischio di  $1 \cdot 10^{-5}$  all'anno. Il fattore di rischio assunto è del  $6\% \text{ Sv}^{-1}$ . Il vincolo di rischio è una linea che rappresenta il confine tra le regioni di accettabilità e inaccettabilità. Questa curva mostra che, se per un gruppo critico sommando le *dosi pesate in probabilità* per tutti gli scenari di esposizione si ottiene un valore inferiore a circa  $200 \mu\text{Sv}$  allora il sito del deposito avrebbe soddisfatto il criterio di rischio ( $1 \cdot 10^{-5} / 0.06 = 1.7 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}$ ). Inoltre, si può osservare che esposizioni superiori possono essere accettate a condizione che la loro probabilità di occorrenza è corrispondentemente inferiore. Il range di dose, dove gli effetti deterministici diventano importanti è rappresentato, in tali curve, da una regione non proporzionale. In questo esempio si assume che gli effetti deterministici possono essere significativi per esposizioni sopra il valore di  $0,5 \text{ Sv}$  e questo si riflette nella parte verticale della curva. Gli effetti deterministici potrebbe essere presi in considerazione, limitando la loro probabilità di occorrenza.

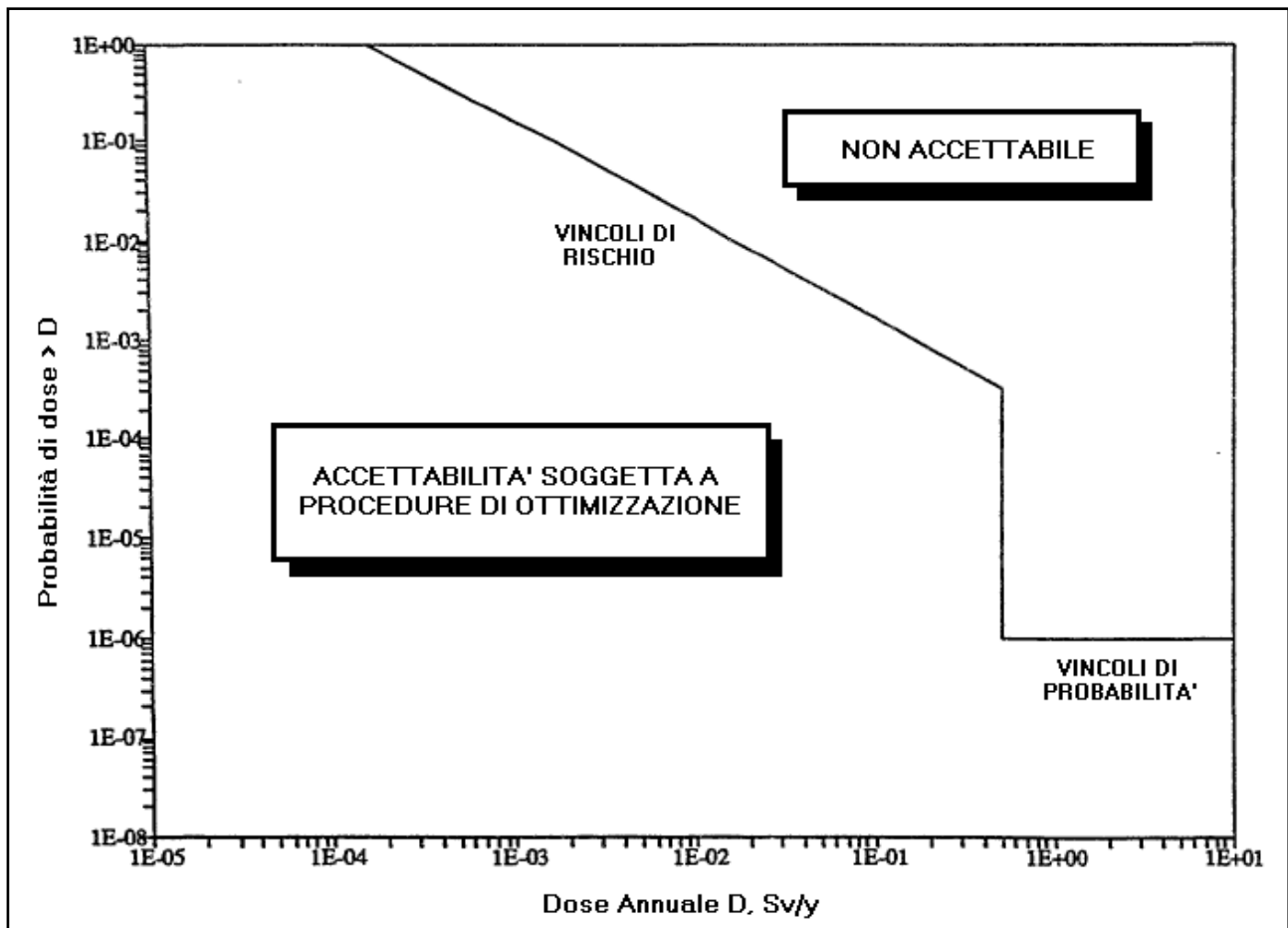


Figura 2.3

#### 2.5.4 Il criterio ibrido dose-rischio

Ci sono altri modi di inquadrare criteri di radioprotezione che meritano considerazione. Nell'ambito degli approcci di sicurezza per lo smaltimento di rifiuti solidi [2.3], sono stati sviluppati criteri che comprendono sia i concetti di dose che di riduzione del rischio. I punti principali sono i seguenti:

- il limite di dose di  $0.01 \text{ mSv a}^{-1}$  per i membri del pubblico dovrebbe essere applicata a situazioni in cui si prevede un normale processo di graduale rilascio di radionuclidi dal sito di smaltimento dei rifiuti solidi;
- un limite al rischio individuale di  $10^{-5} \text{ a}^{-1}$  deve essere applicato per le situazioni in cui le emissioni e le dosi sono causate o influenzate da eventi e processi probabilistici.

#### 2.6 CONCLUSIONI

1. Per uno smaltimento sicuro dei rifiuti radioattivi in un deposito, si devono adottare adeguati criteri di radioprotezione per assicurare nel futuro agli individui lo stesso livello di protezione assicurato al momento della chiusura.

2. Devono essere considerate, per tutto il tempo di contenimento previsto, tutte le possibili modalità di esposizione derivanti da eventi e processi che hanno probabilità di accadimento ad essi associate diversa da zero.
3. In generale, sono possibili tre forme correlate di criteri di protezione radiologica: la limitazione della dose, la limitazione dei rischi e un sistema ibrido che unisce la limitazione della dose con la limitazione del rischio. Relativamente a questi aspetti si possono trarre le seguenti indicazioni conclusive:
  - a. i criteri basati esclusivamente sulla limitazione di dose sono facili da capire, ma hanno carenze se gli eventi improbabili sono da considerarsi quantitativamente;
  - b. i criteri basati esclusivamente sulla limitazione del rischio sono, forse, concettualmente più soddisfacente, ma possono avere difficoltà di presentazione;
  - c. i criteri ibridi supera molti dei potenziali svantaggi degli altri due metodi, ma presenta difficoltà concettuali.
4. Indipendentemente dal criterio adottato, il problema della scelta del tipo di deposito e del relativo sito di smaltimento presenta oggettive difficoltà nella definizione delle ipotesi relative al comportamento umano e nell'assegnazione delle probabilità di occorrenza agli eventi e ai processi che ne caratterizzano l'evoluzione futura. Questo porta ad un tema importante, che è rappresentato dall'incertezza in tutti gli aspetti di analisi, soprattutto a lungo termine, ed è essenziale che questa incertezza venga affrontata in modo sistematico e il più quantitativo possibile, poiché essa condiziona l'attendibilità del giudizio decisionale della valutazione di sicurezza ispirato al rispetto del criterio selezionato. Nel caso di deposito superficiale, particolare rilievo assume il *controllo istituzionale*, quale strumento di riduzione delle incertezze connesse all'evoluzione a lungo termine (300-400 anni) degli scenari nell'analisi di rischio.

## 2.7 BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 2

[2.1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Annual Limits on Intake of Radionuclides by Workers Based on the 1990 Recommendations, Publication 61, Ann. ICRP 21 No. 4, Pergamon Press, Oxford and New York (1991).

[2.2] LAURENS, J.-M., et al., "The development and application of an integrated radiological risk assessment procedure using time-dependent probabilistic risk analysis", Proc. NEA/IAEA/CEC Symposium on Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, OECD/NEA, Paris (1990).

[2.3] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste, Publication 46, Ann. ICRP 15, No. 4, Pergamon Press, Oxford and New York (1985).

### **3. RASSEGNA DELLE PRINCIPALI METODOLOGIE DI ANALISI DI RISCHIO PER IMPIANTI INDUSTRIALI E LORO UTILIZZO PER IL *SAFETY ASSESSMENT* DEI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI**

#### **3.1. INTRODUZIONE**

Il presente Capitolo presenta una rassegna delle principali metodologie, sia qualitative che quantitative su base probabilistica, utilizzate nelle valutazioni di sicurezza per quegli impianti industriali che vengono considerati ad alto impatto per la salute dell'uomo e per l'ambiente. Le metodologie passate in rassegna presentano caratteristiche molto diverse tra loro, circostanza dovuta essenzialmente al costante adattamento di quest'ultime al particolare campo di applicazione nel quale mostravano migliore risposta in termini di funzionalità, applicabilità e successo. Le metodologie hanno maggiore efficacia se applicati ai diversi elementi critici di un impianto dal punto di vista della sicurezza, che sono: progetto, scelta del sito, costruzione, montaggio, verifica, gestione dei processi, affidabilità dei componenti, controllo, chiusura, decommissioning. La presentazione delle diverse metodologie, lungi dal fornire una descrizione dettagliata che esula dagli scopi dell'attività cui si inserisce, si pone l'obiettivo minimo di identificare quelle che possono essere utilizzate, a diversi livelli, nelle valutazioni di sicurezza di depositi di rifiuti radioattivi, in generale, ed in particolare per quelli di tipo superficiale.

Per la prevenzione e la protezione dal rischio di incidenti rilevanti negli impianti industriali che costituiscono fonte di pericolo per la salute dell'uomo e per l'ambiente, le normative vigenti impongono l'esecuzione di una complessa analisi di rischio, il cui schema sintetico è riportato in figura 3.1. I loops più interni sono eseguiti per consentire di applicare i criteri generali di accettabilità del rischio che necessitano la ricomposizione delle probabilità relative a tutte le sequenze incidentali che implicano una identica classe di conseguenza (danno compreso tra due diversi livelli), che deve essere eseguita per ogni evento iniziatore identificato all'interno di un particolare scenario di riferimento.

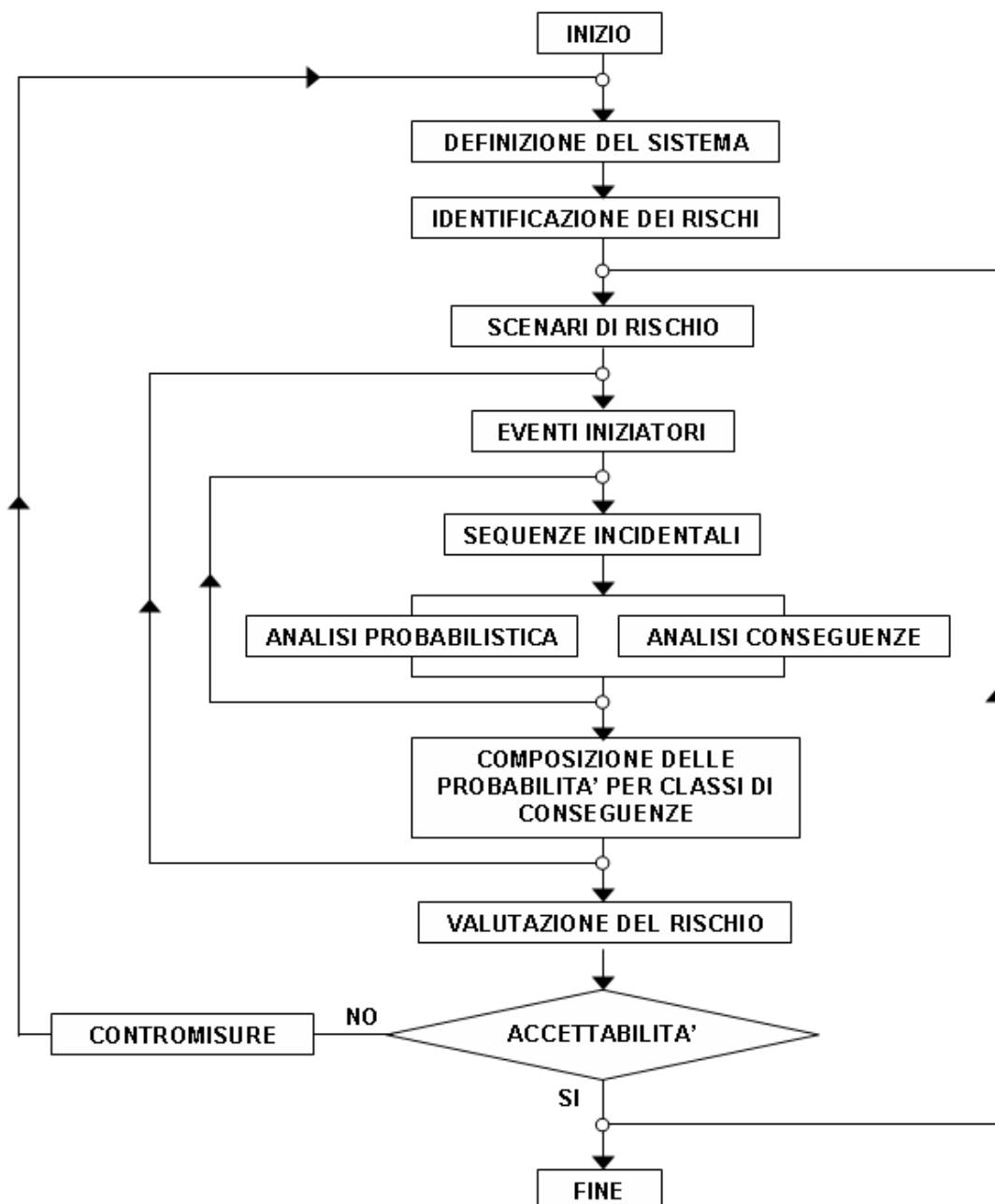
#### **3.2. L'IDENTIFICAZIONE DEI RISCHI E LA SELEZIONE DEGLI EVENTI CRITICI**

Questa fase è finalizzata a mettere in evidenza tutti i pericoli e gli eventi che possono essere origine di situazioni incidentali gravi. Questa analisi deve essere sistematica e completa al fine di non trascurare nessuno dei pericoli presenti.

L'approccio, di tipo qualitativo, prevede la stesura di tabelle che, sistematicamente, esaminano tutti gli aspetti del sistema che in caso di malfunzionamento possono scatenare eventi gravi. In termini di componenti presenti e relativi modi di guasto, processi realizzati e possibili deviazioni, presenza di eventi esterni al sistema che possono provocare incidenti, procedure operative di gestione e/o manutenzione. Un supporto a questa indagine può essere fornito dall'esame di banche dati di



incidente (Analisi storica) che potrebbero suggerire eventi aggiuntivi che si sono già rivelati pericolosi in sistemi simili. Per tutti i pericoli e gli eventi identificati si procede ad una valutazione qualitativa di rischio che consente di identificare gli eventi ritenuti più critici. Il risultato di questa prima fase di analisi consiste quindi in una lista di eventi, ciascuno caratterizzato da un livello di rischio in termini qualitativi; a seguito di questo primo screening si identificano immediatamente alcune migliorie progettuali e gestionali per gli eventi meno critici e si selezionano gli eventi che richiedono uno studio più approfondito al fine di valutarne il rischio in termini quantitativi.



**Fig. 3.1 - Il ciclo dell'analisi di rischio di incidenti rilevanti**

Gli eventi pericolosi di riferimento possono essere di diverso tipo: INTERNI (guasti di componenti, rotture, errori di gestione, errori di manutenzione) ed ESTERNI (tra i quali, i più importanti, sono riportati in Tabella 3.1). Per quanto riguarda le analisi di rischio relative ai depositi superficiali di rifiuti radioattivi, gli eventi riportati nella tabella possono essere sottoposti a successivo screening dal confronto con quanto riportato in modo dettagliato nell'Appendice 2 del presente rapporto: "LISTA IAEA (ISAM) DEI FEP Features Events and Processes".

Gli eventi critici prevedono quindi un approfondimento con tecniche di analisi decisamente più sofisticate che per ciascun evento siano in grado di definire le possibili sequenze incidentali, la rispettiva frequenza di accadimento e il danno associato. In questo complesso di attività l'analista può avvalersi delle cosiddette metodologie o tecniche di analisi di rischio (QUALITATIVE e QUANTITATIVE).

**Tabella 3.1 – Elenco degli eventi critici esterni**

Impatto di aereo	Impianti localizzati a meno di 3 miglia da aeroporti presentano maggiore probabilità di impatto.
Valanghe	
Erosione costale	
Siccità	Può alterare la disponibilità delle torri di refrigerazione dell'impianto.
Allagamenti esterni	Causati da escursioni di livello di fiumi, laghi e torrenti o da intense precipitazioni in condizioni meteo estreme.
Uragani	Venti molto forti possono causare un elevato numero di missili.
Incendi	Sistemi di stoccaggio di materiale infiammabile ( LPG, gasolio, olio combustibile, ecc.) , che sono localizzati in prossimità dell'impianto.
Nebbia	Può aumentare la frequenza di incidenti.
Gelo	Può danneggiare le strutture di fondazione dell'impianto.
Grandine	Può essere considerata come missili di dimensioni ridotte.
Temperatura estiva elevata	Altera la pressione di vapore all'interno dei serbatoi di stoccaggio di prodotti chimici.
Gelate	Alterano le portate dei fiumi con conseguente perdita di refrigerazione.
Allagamento interno	Rottura di grandi serbatoi di acqua nell'impianto o ostruzioni del sistema di raccolta e convogliamento dell'acqua in condizioni meteo estreme.
Movimenti del terreno	
Fulminazioni	Da considerarsi durante le fasi di progetto. Il più vulnerabile è il sistema di controllo computerizzato.
Impatto di meteoriti	Tutti i siti hanno uguale probabilità di impatto.
Impatto di missili	Pezzi di serbatoi e di recipienti in pressione, anche di notevoli dimensioni, vengono scagliati ad elevata velocità a seguito di un'esplosione. La rottura di apparecchiature con elementi che ruotano ad elevata velocità possono generare missili. Sassi, pezzi di ferro e di legno possono essere considerati come missili durante condizioni di vento molto forte.
Incidenti in una condotta vicina	Possono causare UVCE, incendi in pozza e rilascio di sostanze tossiche.
Sabotaggio	Impiegati e addetti che con azioni volontarie danneggiano sistemi vitali dell'impianto.
Tempesta di sabbia	Può danneggiare apparecchiature per il trattamento dell'aria.
Sismicità	Richiede una dettagliata analisi sismica del sito di localizzazione dell'impianto.
Neve	Da considerare per i carichi massimi ammissibili degli edifici dell'impianto.
Attacchi terroristici	
Incidenti di trasporto	Incidenti sulle maggiori vie di trasporto possono ostacolare le procedure di evacuazione di un impianto.
Tsunami	
Attività vulcaniche	Le colate laviche possono danneggiare apparecchiature e le ceneri vulcaniche possono ostruire prese d'aria.

### 3.3. PANORAMICA SULLE METODOLOGIE DELL'ANALISI DI RISCHIO

Nel corso delle attività di valutazione della sicurezza di un impianto industriale, diverse organizzazioni hanno pubblicato linee guida per le procedure di valutazione del rischio, dove vengono presentate tecniche con diverse peculiarità e che possono ritenersi appropriate in differenti circostanze di analisi. Alcune tra queste tecniche come: *Analisi storica*, *Safety Review*, *Safety Audit*, *CheckList Analysis*, *Relative Ranking*, *PHA*, e *What-If Analysis*, sono efficienti per una visione "broad brush" per grandi impianti o processi complessi. Altre tecniche come: *HazOp* e *FMEA/FMECA* sono utilizzate per analizzare un ampio spettro di rischi durante la fase di progetto e la conduzione di operazioni di routine e che risultano la base per l'identificazione delle situazioni di rischio su cui possono essere applicate tecniche di analisi più sofisticate tra le quali: *Alberi dei Guasti*, *Albero degli Eventi*, *Diagramma Causa-Conseguenze*, *Human Reliability Analysis*.

Nei paragrafi seguenti, tali metodiche verranno descritte in modo generale, con l'obiettivo di indicare le loro potenzialità e i punti di debolezza. Verranno presentate delle schede di valutazione comparativa dove si riporta il tempo medio di esecuzione che occorre per la loro esecuzione con riferimento alle tre fasi in cui si può essere suddivisa: (preparazione, valutazione, documentazione) riferendolo, in modo sintetico a due categorie di insediamenti produttivi: (impianti piccoli o semplici) e (impianti grandi o complessi). Ad alcune metodologie dell'analisi di rischio, maggiormente utilizzate e ritenute più efficaci rispetto alle altre, saranno dedicati specifici paragrafi dove verranno descritte in modo più dettagliato.

Nel mondo reale esiste una chiara distinzione tra decisioni valide e decisioni corrette. Le decisioni valide richiedono un esame nel tempo delle stesse per determinarne la validità; le decisioni corrette sono quelle basate solo su alcune informazioni incomplete, disponibili al momento, sulla base delle quali è necessario prendere la decisione. Il processo decisionale corretto si basa su alcuni punti fondamentali, quali:

- l'identificazione di informazioni pertinenti alla decisione da prendere;
- un programma sistematico per l'acquisizione di tali informazioni;
- una razionale valutazione delle informazioni così acquisite.

L'analisi dei sistemi è un processo diretto sviluppato per un'acquisizione metodica e tempestiva, oltre che per l'indagine di specifiche informazioni del sistema pertinenti ad una data azione. Per l'analisi dei sistemi, è essenziale un metodo sistematico che sia in grado di acquisire informazioni, utilizzabili nel prendere decisioni focalizzate alla regolarità di funzionamento e alla sicurezza di un dato sistema. Gli approcci analitici per l'analisi dei sistemi possono essere classificati come processi utilizzati per la presa di decisioni, vale a dire come approccio induttivo e approccio deduttivo. L'approccio induttivo parte dall'analisi di un caso particolare per poi raggiungere una conclusione di tipo generale. Esempi di questa tipologia di approcci sono la *Preliminary Hazard Analysis (PHA)*, la *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*, la *Failure Mode, Effect and*

*Criticality Analysis (FMECA)*, la *Event Tree Analysis (ETA)*. L'approccio deduttivo, invece, parte da un ragionamento di tipo generale per arrivare ad una conclusione specifica, esempio di questa tipologia di approccio è la *Fault Tree Analysis (FTA)*.

### 3.3.1. Analisi storica

Finalizzata all'identificazione delle situazioni pericolose, l'analisi storica si propone di analizzare incidenti, o situazioni anomale, già verificatisi nella gestione operativa di industrie similari a quella in analisi. Il metodo consiste in una elaborazione statistica di dati che possono essere ottenuti da diverse fonti:

- registrazioni interne;
- report delle autorità di controllo;
- banche dati nazionali e internazionali;
- letteratura tecnica specializzata-

Questa metodologia può essere utile nell'esecuzione di studi ambientali, per il monitoraggio sanitario o per l'analisi incidentale. La tecnica è valida solo per prevenire tipologie di incidenti che si sono già verificati e deve, quindi, essere integrata da tecniche predittive. Il suo pregio è quello di fornire una visione globale del problema, analizzando cause, conseguenze, eventuali modifiche organizzative e/o procedurali, strutturali e/o impiantistiche da apportare per evitare il ripetersi dell'incidente. La migliore fonte di informazioni dovrebbe essere l'archivio dell'autorità di controllo in quanto terrebbe conto delle particolari condizioni in cui opera il sistema in relazione alla gestione operativa adottata.

#### TEMPI<sup>3</sup> DI ESECUZIONE DI UNA ANALISI STORICA

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1	d	1 ÷ 2	d	1 ÷ 2	d	3 ÷ 5	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	2 ÷ 3	d	4 ÷ 6	d	5 ÷ 7	d	11 ÷ 16	d

### 3.3.2. Safety Review (SR)

Denominata anche Process Safety Review, Design Review e Loss Prevention Review, è tra le prime tecniche storicamente utilizzate in ambito industriale. Viene preferibilmente eseguita su di un impianto esistente e prevede una ispezione (walking through) dell'impianto che può variare dalla visita informale con valutazione visuale delle procedure messe in atto ai fini della sicurezza ad una visita con valutazione formale di una squadra di esperti di sicurezza, che può durare anche più di una settimana. Per processi ancora non operativi, l'analisi può essere limitata alla sola valutazione dei disegni di progetto (P&I). Una tipica SR prevede delle interviste agli operatori (operai, manutentori, ingegneri, manager, responsabili della sicurezza, e altro), per questo motivo

<sup>3</sup> d =giorni, w = settimane

la sua riuscita è fortemente basata sulla cooperazione di tutti gli operatori. La SR è generalmente focalizzata all'identificazione di situazioni anomale che possono rappresentare fonti di futuri rischi più rilevanti. Il risultato consiste in un elenco di azioni raccomandabili, della loro giustificazione, delle responsabilità di esecuzione e dei tempi di attuazione. Può essere usata per verificare se l'impianto, i processi, le operazioni, le procedure e la manutenzione soddisfano gli intenti di progettazione e gli standard di realizzazione ed indaga su ogni aspetto di un sistema:

- procedure operative;
- standard di qualità;
- registrazione delle anomalie (vd. Quality Safety Audit);
- addestramento del personale;
- competenza della manodopera;

Attraverso una SR è possibile:

- segnalare le anomalie del processo costruttivo;
- identificare le future situazioni di rischio in condizioni di anomalie del processo costruttivo;
- valutare le basi di progetto dei sistemi di sicurezza e dei sistemi di controllo;
- valutare le conseguenze dell'applicazione di nuove tecnologie;
- valutare l'applicazione delle norme;
- valutare l'adeguatezza delle operazioni di manutenzione e delle ispezioni di sicurezza.
- effettuare le revisioni delle procedure;

L'identificazione delle situazioni pericolose viene fatta con l'ausilio di un elenco appositamente predisposto in cui vengono riportati i pericoli potenziali tipici della realtà industriale. Sono essenzialmente descrizioni qualitative dei potenziali problemi di sicurezza e delle azioni correttive suggerite. Il rapporto finale può includere anche deviazioni dalle intenzioni progettuali (procedure e tecnologie innovative o nuove regole di sicurezza), lasciando al gestore dell'impianto la responsabilità per l'implementazione delle azioni correttive consigliate.

Per eseguire una SR devono essere disponibili:

- codici e standard applicabili;
- studi di sicurezza precedenti;
- descrizioni dettagliate dell'impianto;
- descrizioni dettagliate dei processi;
- procedure di esercizio;
- procedure di manutenzione e di emergenza;
- rapporti su incidenti a rischio rilevante;
- rapporti di manutenzione;

- rapporti di ispezioni (verifica di strumenti critici, test sul funzionamento di componenti per la sicurezza passiva, controlli periodici su componenti critici per la sicurezza);
- rapporti sulla fase di preparazione del sito per ospitare l'impianto;
- caratteristiche delle sostanze e dei materiali utilizzati nel cantiere;
- caratteristiche delle sostanze e dei materiali coinvolti nel processo.

#### TEMPI DI ESECUZIONE DI UNA SAFETY REVIEW

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1	d	1 ÷ 2	d	1 ÷ 2	d	3 ÷ 5	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	2 ÷ 3	d	4 ÷ 6	d	5 ÷ 7	d	11 ÷ 16	d

#### 3.3.3. SA - Safety Audit (indagine di sicurezza)

La Safety Audit, è un metodo qualitativo per esaminare un'operazione industriale nella sua globalità, allo scopo di identificare i pericoli potenziali ed i relativi elementi di rischio da rendere disponibili a tutte le altre metodologie di analisi. Per i depositi di rifiuti radioattivi, risulta molto utile nelle valutazioni di sicurezza relative alle fasi di progettazione, di costruzione e di messa in opera, che rappresentano le attività basilari per conferire al sistema di contenimento le future prestazioni protettive e mitigative. In questo ambito, quindi, la Safety Audit si configura più propriamente come uno strumento del *controllo di qualità* sulle operazioni di realizzazione del deposito.

La Safety Audit viene condotta da personale qualificato coadiuvati da esperti di sicurezza che devono conoscere nel dettaglio l'influenza di eventuali anomalie riscontrate in fase di costruzione con le prestazioni a lungo tempo dell'impianto. Come premessa ad una corretta impostazione della Safety Audit si rendono necessarie due azioni preliminari:

- esame delle anomalie più significative accadute;
- formulazione di un questionario "Safety Audit" da compilare preventivamente alla SR e da far riempire dalle diverse componenti della struttura operativa.

Gli obiettivi di una SA sono le indagini su ogni aspetto di un sistema che concorra al mantenimento di elevati standard di sicurezza nelle fasi di costruzione e messa in opera: dalla politica aziendale, alle procedure operative, dall'organizzazione ai piani di lavoro, alle procedure di registrazione di anomalie, all'addestramento del personale, alla registrazione delle misure e delle verifiche di qualità. Il primo passo per la realizzazione di una Safety Audit è l'identificazione di tutte le potenziali anomalie che possono presentarsi, rispetto alle intenzioni di progetto rispetto al sistema in esame. L'identificazione di tali situazioni viene fatta con l'ausilio di un elenco appositamente predisposto in cui vengono riportati i pericoli potenziali tipici che potrebbero compromettere la voluta prestazione del sistema. I termini che ricorrono in questo elenco si riferiscono a situazioni generali di pericolo ed a situazioni specifiche. Una volta identificate le

situazioni più preoccupanti occorre procedere alla valutazione del loro livello di rischio. Per avere dati confrontabili con analisi fatte su situazioni simili è necessario sia fissare una scala di giudizio per valutare le varie situazioni che scegliere le modalità operative di analisi e raccolta dati.

Identificate le situazioni anomale, la Safety Audit fornisce una valutazione del loro livello di rischio attraverso un questionario. La valutazione diventa quindi basata su giudizio soggettivo di un gruppo di persone rappresentative del sistema in esame ed è riferita alla scala di giudizio precedentemente prefissata. L'esecuzione di una SA può essere suddivisa nelle seguenti fasi:

#### *Fase 1: Impostazione del lavoro*

E' prevista un'azione tendente ad effettuare una fotografia della situazione in essere con particolare riguardo a:

- modalità di rilevazione di anomalie;
- procedure organizzative per la diagnostica;
- procedure organizzative per l'effettuazione degli interventi correttivi;
- aspetti organizzativi nelle varie unità;
- controlli a campione sui materiali;
- controllo manuali operativi;

#### *Fase 2: Predisposizione del questionario*

Si procede quindi alla definizione del "Gruppo di verifica" e sulla base del lavoro svolto nella Fase 1 viene redatto un questionario che rifletta la realtà su cui si andrà ad operare. Questo questionario verrà discusso e verranno stabilite: le procedure per la sua diffusione, la frequenza della raccolta dei dati, le tecniche di analisi dei risultati ottenuti e la politica degli eventuali interventi correttivi.

#### *Fase 3: Svolgimento delle interviste e sopralluoghi a campione nei diversi posti di lavoro*

Orientativamente si dovrà interessare un campione rappresentativo di:

- quadri operativi;
- progettisti;
- operai;
- funzioni specialistiche.

#### *Fase 4: Redazione del Rapporto Finale*

Sulla base delle interviste e dei sopralluoghi condotti nella Fase 3, si dovrà redigere un "Rapporto finale della Safety Audit". Il Rapporto riporterà i risultati dell'indagine suddivisi secondo i seguenti argomenti:

- organizzazione;
- controllo di qualità;
- statistiche e procedure di rilevazione e di registrazione;
- procedure per gli interventi, modulistica, ecc..

### 3.3.4. Check List Analysis (analisi con liste di controllo)

La Check List Analysis (CLA) è basata sull'utilizzo di una lista scritta di punti o passi procedurali per verificare lo stato di un sistema. Sono previste, per diversi settori industriali, specifiche liste di controllo con diversi livelli di dettaglio. Il loro utilizzo è generalmente finalizzato all'indicazione del raggiungimento di standard e pratiche di sicurezza o dei voluti standard di qualità. Sono semplici e possono essere utilizzate ad ogni stadio di realizzazione di un processo. Una checklist fornisce la base per una valutazione del livello di qualità e del livello di rischio generalmente accoppiato al suo mancato raggiungimento. Spesso sono create come semplice riorganizzazione dei dati noti e devono essere costantemente aggiornate. Molte organizzazioni hanno sviluppato delle checklist standard per il controllo dello sviluppo di un processo costruttivo.

Le checklist vengono redatte sulla base delle differenze o delle inadempienze rispetto alla definizione di progettazioni standard. Vengono stilate delle domande alle quali viene accoppiata un risposta tipo (Si, No, Non Applicabile, Richiede Ulteriori Informazioni). I risultati qualitativi variano da situazione a situazione, ma generalmente portano a decisioni (Si o No) a proposito del raggiungimento degli standard voluti. La conoscenza di queste inadempienze porta ad una lista facilmente sviluppabile di possibili alternative che migliorino il livello di qualità.

Se non è disponibile una checklist sviluppata da attività precedenti su impianti simili è necessaria la stesura di una checklist appropriata. Occorre il reperimento di una procedura di progettazione standard, un manuale operativo e qualcuno che abbia conoscenze di base sul processo. Per assicurare i requisiti di veridicità alla metodologia, l'analista deve essere un soggetto differente dal preparatore della checklist. Il tipo di valutazione può essere molto variabile da semplici valutazioni a profonde introspezioni. È spesso un metodo a basso costo per l'identificazione di anomalie già verificatesi in casi analoghi.

#### TEMPI DI ESECUZIONE DI UNA CHECK LIST ANALYSIS

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1	d	1 ÷ 2	d	1 ÷ 2	d	3 ÷ 5	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	2 ÷ 3	d	4 ÷ 6	d	4 ÷ 6	d	10÷15	d

### 3.3.5. WIA - What-if Analysis (analisi del cosa se..)

È un approccio che richiede un brainstorming in cui un gruppo di persone esperte del processo a diverso titolo pone domande o riporta voci a proposito di possibili eventi indesiderati. Richiede all'analista di adattare i concetti di base della sicurezza al problema specifico. Questa metodologia



può essere usata in tutta la vita dell'impianto. La What-If Analysis incoraggia il team a pensare a domande strutturate, del tipo: cosa succederebbe se...?

Tutte le domande vengono riportate su supporto cartaceo o informatico. Le domande vengono classificate e ordinate in specifiche aree di interesse (eventi interni, eventi esterni, modifiche del contesto, errori costruttivi, errori nella configurazione, ecc.) ed ogni area viene sviluppata da un team di esperti con domande che potranno riguardare ogni condizione anomala, non solo rotture di componenti e variazioni di parametri di processo.

La finalità è l'individuazione di tutte le situazioni di rischio, dei rischi e di tutti gli eventi accidentali che possano produrre conseguenze indesiderate con le raccomandazioni di azioni correttive e di riduzione del rischio (riduzione delle conseguenze e operazioni di emergenza). La completezza dell'analisi è affidata all'esperienza del team di esperti.

Un risultato è quindi una lista di domande e risposte a proposito del processo ed una lista situazioni di rischio corredata da possibili azioni correttive e riduttive consigliate. La WIA è molto flessibile e può essere effettuata in ogni periodo di vita del processo usando ogni informazione e conoscenza disponibile. Per ogni sezione del processo 2 o 3 persone dovrebbero essere incaricati dell'analisi, tuttavia un gruppo più numeroso è preferibile. Per processi complessi e di grandi dimensioni conviene avere un piccolo gruppo che coordina i gruppi assegnati alle singole aree del processo.

#### TEMPI MEDIO DI ESECUZIONE DI UNA WHAT-IF ANALYSIS

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1	d	1	d	1 ÷ 2	d	3 ÷ 4	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	1 ÷ 3	d	3 ÷ 5	d	1 ÷ 2	w	9 ÷ 18	d

#### 3.3.6. HAZOP - HAZazard and OPerability analysis (analisi di rischio e operabilità)

La tecnica HazOp è stato sviluppata per individuare i problemi legati alle normali operazioni e procedure d'impianto che se pur non procurano effettive situazioni di rischio possono provocare fermate di impianto o comunque eventi indesiderati fuori dal buon funzionamento dell'impianto e si è successivamente evoluta in una tecnica per la valutazione dei. A causa delle informazioni dettagliate che sono necessarie per la sua realizzazione, può essere implementato solo durante o al termine della progettazione esecutiva.

Una squadra interdisciplinare usa un approccio sistematico e creativo per percorrere l'impianto e correlare in modo logico i singoli eventi accidentali per identificare le interazioni di eventi che possono portare a conseguenze indesiderate. La sistematicità può essere raggiunta seguendo il

metodo a parole guida, che prevede una combinazione fra le parole guida (No, Poco, Troppo, Molto, Basso) unite alle variabili di processo (Flusso, Temperatura, Pressione, Livello). Passando in analisi i singoli punti dell'impianto valutando tutte le variabili e le parole guida si possono individuare tutte le deviazioni possibili dalla normalità. Per ogni deviazione bisogna individuare le possibili cause e le possibili conseguenze. Ogni linea della tabella che si viene a formare porta quindi una connessione logica fra eventi. Si verificano quindi le protezioni da eventi indesiderati e si identificano eventuali situazioni non previste in fase di progetto.

La finalità principale di questa metodologia è una rivisitazione completa dell'impianto e delle operazioni normali, di manutenzione e di emergenza. È un'ottima base per la stesura di manuali operativi delle singole parti dell'impianto e per la valutazione di procedure scritte. I risultati sono una tabella di correlazioni logiche fra gli eventi, le nuove scoperte del team (rischi, problemi operativi), raccomandazioni per le modifiche del processo, dell'impianto e delle procedure, raccomandazioni per l'approfondimento dell'informazione su parti di impianto o di processo non valutate a sufficienza.

L'HaZop richiede la disponibilità del P&I o disegni equivalenti, molte informazioni dettagliate sui processi e delle singole apparecchiature, le condizioni operative e le procedure operative e manutentive. L'informazione dimensionale deve essere abbastanza dettagliata anche sulla tipologia di strumentazione impiegata. Un team costituito da 5-7 persone con esperienza differenziata dovrebbe essere sufficiente per impianti complessi, ma un minimo di 3-4 persone deve essere garantito. In genere un analista è responsabile dell'intera analisi ed è coadiuvato da un addetto alla registrazione degli atti e delle tabelle (esistono programmi informatici dedicati che riducono notevolmente i tempi di registrazione dei risultati). L'analista si interfaccia di volta in volta con esperti dei singoli settori.

#### TEMPI DI ESECUZIONE DI UNA HAZOP

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1 ÷ 2	d	1 ÷ 3	d	2 ÷ 6	d	4 ÷ 11	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	2 ÷ 5	d	1 ÷ 3	w	2 ÷ 6	w	17÷50	d

### 3.3.7. FMEA - Failure Mode and Effect Analysis (analisi di modalità e effetti di guasto)

Corrisponde ad una tabulazione dei componenti dell'impianto accoppiata alla tabulazione delle modalità di guasto di questi componenti. La modalità di guasto descrive come il componente può uscire di servizio (aperto, chiuso, perdita, acceso, spento, etc.). L'effetto del guasto in una certa modalità è determinato dalla risposta del sistema al guasto stesso.

L'identificazione dell'effetto può essere effettuata tramite simulazioni del comportamento o per deduzioni logiche euristiche basate sull'esperienza e su conoscenze teoriche e pratiche. Gli errori

umani non vengono generalmente considerati in questo tipo di analisi anche se possono essere considerate delle operazioni errate che sono la causa e alla base della modalità di guasto.

Si deve comunque rilevare che una FMEA non è in genere esaustiva nella valutazione delle combinazioni di eventi di guasto. Esistono delle FMECA (Failure Mode and Effect Analysis) in cui ad ogni effetto viene associato un indice euristico di criticità che porta ad identificare le zone di impianto da esaminare più approfonditamente. L'identificazione degli eventi iniziatori possibili è la principale finalità di una FMEA, agli eventi associa degli effetti potenziali che portano alla stesura di raccomandazioni sull'inserimento di protezioni. Il risultato è generalmente una lista di riferimento qualitativa e sistematica dei componenti del modo in cui possono guastarsi e degli effetti che possono produrre. I risultati possono essere facilmente aggiornati in base a modificazioni dell'impianto. La forma classica è una tabella. La tabella è corredata di suggerimenti dell'analista per il miglioramenti delle protezioni attive.

Le informazioni devono essere molto dettagliate (il livello di dettaglio influenza fortemente il risultato finale) e sono necessari:

- una lista dei componenti o un P&I;
- conoscenze sul comportamento specifico dei singoli componenti;
- conoscenze riguardo alla fuoriuscita di servizio di questi ultimi;
- conoscenze del comportamento del sistema fuori dalle condizioni normali di funzionamento.

La prima stesura dell'analisi può essere compiuta da un singolo analista, ma per assicurare una sufficiente completezza è necessario che specifici esperti rivedano criticamente l'analisi. La conoscenza degli strumenti e delle apparecchiature è fondamentale. In generale da 2 a 4 apparecchiature strumentate possono essere valutate in circa un'ora.

#### TEMPI DI ESECUZIONE DI UNA FMEA

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1	d	1 ÷ 3	d	1 ÷ 3	d	3 ÷ 7	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	1 ÷ 3	d	1 ÷ 3	w	2 ÷ 4	w	16÷38	d

### 3.3.8. FTA - Fault Tree Analysis (Analisi degli Alberi di Guasto)

È una tecnica deduttiva che focalizza su un particolare incidente rilevante (Top Event) e fornisce un metodo per individuarne le possibili cause. L'albero dei guasti è un modello grafico che esplicita le connessioni logiche fra gli eventi di guasto e di errore umano concomitanti che possono accadere in un sistema. La forza della FTA come strumento qualitativo consiste nella sua possibilità di individuare le combinazioni di eventi che possono portare all'evento indesiderato

rilevante. Valutando le probabilità dei guasti dei singoli componenti è possibile calcolare la probabilità di accadimento del Top Event e riducendo l'albero è possibile individuare i Minimal Cut Set (MCS, Insieme Minimo di Taglio, concetto derivante dalla teoria dei grafi) che corrispondono alle combinazioni sufficienti a provocare il Top Event.

Questa analisi è fortemente indicata per sistemi ad elevata ridondanza. Per sistemi a singolo MCS conviene utilizzare tecniche orientate alla valutazione dei singoli eventi di guasto (FMEA e HazOp), la FTA può essere utilizzata per scendere nel dettaglio in alcuni sottosistemi, fino al singolo componente. E' finalizzata all'identificazione delle combinazioni di eventi di guasto che portano al Top Event. Evidenzia quali eventi di guasto sono poco protetti e dove conviene intervenire per ridurre la frequenza di accadimento del Top Event.

I risultati sono riportati come alberi di eventi di guasto combinati tramite porte derivate dalla logica booleana (And, Or, Inhibit). Questi alberi descrivono le combinazioni come risultano dall'analisi logica dell'impianto. Tramite i teoremi dell'algebra booleana è possibile scrivere l'albero sottoforma di una equazione riducibile a una sommatoria di combinazioni di eventi di guasto primari. Questa equazione corrisponde a un nuovo albero detto albero ridotto che esplicita tutte le combinazioni che producono l'evento indesiderato. Le combinazioni con il minor numero di eventi di guasto sono detti Minimal Cut Sets (MCS).

Una FTA richiede una conoscenza dettagliata di come il sistema funziona, sono necessari schemi dettagliati del processo e procedure normali, di manutenzione e di emergenza, la conoscenza dettagliata dei componenti (apparecchiature e strumentazione) e ruoli del personale operativo. Un analista qualificato può sviluppare da sè l'albero, ma questo deve essere rivisto dal personale operativo e dagli ingegneri di processo delle singole unità coinvolte.

#### TEMPI DI ESECUZIONE DI UNA FAULT TREE ANALYSIS

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1 ÷ 3	d	5 ÷ 10	d	3 ÷ 5	d	9 ÷ 18	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	4 ÷ 6	d	3 ÷ 7	d	3 ÷ 5	w	34 ÷ 66	d

### 3.3.9. ETA - Event Tree Analysis (analisi degli alberi degli eventi)

Un albero degli eventi mostra graficamente i possibili risultati incidentali che derivano da un evento di guasto iniziatore (un guasto o malfunzionamento di un componente o un errore umano) in funzione del funzionamento dei sistemi di protezione attiva e passiva presenti nel sistema. Ogni sequenza di eventi successivi all'evento iniziatore portano a delle conseguenze finali di maggiore o minor rilievo. Una ETA viene generalmente condotta per la valutazione dei sistemi di protezione

attiva che sono installati per la riduzione delle frequenze di accadimento del evento finale indesiderato.

Individuazione degli eventi provocati da un singolo evento di guasto in base al comportamento dei sistemi di protezione attiva e passiva, verifica del comportamento dei sistemi di protezione attiva e passiva, quantificazione delle frequenze di accadimento dei differenti eventi indesiderati. Individuazione delle eventuali ridondanze dei sistemi protettivi che non aumentano la sicurezza del sistema. Liste di eventi finali e combinazioni dei sistemi di protezione attiva e passiva. Alberi di combinazione degli eventi di guasto dei sistemi protettivi. Gli analisti utilizzano questi modelli anche per identificare errori procedurali e tarature degli strumenti di sicurezza.

Le risorse necessarie al suo svolgimento richiedono una conoscenza dettagliata dei possibili eventi di guasto iniziatori e del comportamento dei sistemi di protezione attiva. Un singolo analista può sviluppare gli alberi ma almeno due persone sono preferibili.

#### TEMPI DI ESECUZIONE DI UNA EVENT TREE ANALYSIS

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1 ÷ 2	d	2 ÷ 5	d	3 ÷ 5	d	6 ÷ 12	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	1	w	2 ÷ 4	w	3 ÷ 5	w	6÷50	d

#### 3.3.10. CCA – Cause Consequence Analysis (Analisi delle cause e delle conseguenze)

È una combinazione di FTA e ETA. Funziona bene per sistemi semplici e permette una migliore comunicazione dei risultati grazie alla forma di presentazione dei diagrammi. Le sue finalità sono quelle di unire tramite connessioni logiche gli eventi che possono accadere in un impianto con il verificarsi o meno dei singoli eventi di guasto. Serve ad identificare le cause degli eventi indesiderati e le conseguenze degli eventi di guasto.

Il tipo di risultati sono diagrammi a grafo che uniscono gli eventi (nodi) tramite connessioni logiche a seconda del verificarsi o meno dell'evento. Occorre possedere la conoscenza dettagliata di tutti i componenti dell'impianto, di tutti i possibili eventi indesiderati, conoscenza delle procedure e dei sistemi di protezione attiva. È necessario avere una squadra formata da poche persone di cui almeno uno sia esperto in CCA e gli altri esperti del processo.

#### TEMPI DI ESECUZIONEDI UNA CAUSE-CONSEQUENCE ANALYSIS

SISTEMA	PREPARAZIONE		VALUTAZIONE		DOCUMENTAZIONE		TOTALE	
<i>PICCOLO o SEMPLICE</i>	1 ÷ 2	d	2 ÷ 5	d	3 ÷ 5	d	6 ÷ 12	d
<i>GRANDE o COMPLESSO</i>	5	d	2 ÷ 4	w	3 ÷ 5	w	30÷50	d

### 3.4 LE METODOLOGIE DI ANALISI DI RISCHIO PER I DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI

Le procedure quantitative hanno avuto un forte impulso soprattutto nella direzione della cosiddetta analisi predittiva, mirante - per l'appunto - alla previsione su base probabilistica dei fenomeni. Le tecniche di tipo qualitativo, invece, sviluppatasi parallelamente alle precedenti, sono particolarmente adatte ad analizzare contesti applicativi. Mentre l'analisi quantitativa, infatti, richiede l'esame completo e sistematico di tutti i componenti in modo da identificare le fonti di rischio potenziale (hazards), l'analisi qualitativa risulta più snella e flessibile nell'utilizzo. D'altra parte, occorre tenere conto del fatto che assai spesso gli aspetti qualitativi e quantitativi si confondono, rientrando in un medesimo quadro di informazioni.

Le tecniche qualitative vengono definite, con terminologia anglo-sassone, Hazard Evaluation Procedures, e rappresentano l'insieme degli esami che possono essere condotti su di un sistema od impianto per studiare le combinazioni rischiose di materiali e/o processi in un assegnato ambiente operativo con lo scopo di identificare i possibili incidenti e stimare la loro frequenza. Le tecniche quantitative si pongono l'obiettivo di stimare la probabilità del verificarsi dell'incidente e di stimarne la relativa conseguenza, identificando un evento iniziatore di una sequenza che costituisce l'evento iniziale dal quale potrebbe scaturire una potenziale pericolosità o ipotizzando l'incidente come l'evento finale di una serie di guasti e malfunzionamenti del sistema risalendone le cause.

Grazie al fatto di considerare l'evento incidente come la conseguenza di una concatenazione di eventi, è possibile intervenire più agevolmente sul sistema nel senso di ridurre la possibilità del verificarsi di eventi imprevisti. Le conseguenze di un evento iniziale, infatti, possono essere ridotte ricorrendo ad analisi quantitative condotte sui singoli componenti del sistema (ad esempio, valvole, pompe, sensori, risposta dell'operatore,...ecc). Per completare un'analisi quantitativa occorre eseguire il calcolo dell'affidabilità dei componenti che richiede di conoscere i tassi di guasto dei componenti stessi, i quali possono essere desunti facendo riferimento alle banche dati esistenti sull'argomento o sviluppando opportune teorie (errori dell'operatore).

Nel seguito vengono presentate alcune fra le più usate ed efficaci tecniche qualitative/quantitative per l'analisi dei sistemi: HAZOP, FMEA/FMECA, FTA, ETA cercando di fornire le informazioni utili per operare praticamente con questi strumenti di analisi del rischio negli insediamenti produttivi. In particolare, si segnala che solo queste metodologie possono ritenersi utili come supporto alle valutazioni di sicurezza dei depositi di rifiuti radioattivi. Per la loro struttura fortemente orientata alla scomposizione dell'impianto in termini componentistici e funzionali, l'utilizzo di queste metodologie è maggiormente consigliato per i depositi temporanei (vd- Appendice 1).

### 3.4.1. HAZOP

I primi approcci metodologici applicati alla realtà degli impianti industriali, che possono essere ritenuti precursori della moderna HAZOP, risalgono alla seconda metà degli anni sessanta quando si svilupparono i primi studi “metodici” ed in particolare la cosiddetta “analisi critica”.

L’analisi critica è una tecnica formale che analizza una generica attività al fine di generare alternative a quest’ultima attraverso la giustificazione di risposte motivate ad una serie di domande del tipo:

- Che cosa è stato realizzato?
- Che altro può essere realizzato?
- Che cosa dovrebbe essere realizzato?
- Come è stato realizzato?
- In quale altro modo si potrebbe realizzarlo?
- .....

Nella seconda metà degli anni sessanta, i manager di produzione cercarono di verificare se un’analisi critica potesse essere applicata alla fase di progetto degli impianti chimici, allo scopo di evidenziare tutte le debolezze del progetto e individuare punti di ottimo dal punto di vista economico. La metodologia veniva eseguita, con cadenza regolare, da gruppi ristretti di persone costituite da esperti del processo e dell’impianto e almeno un esperto in esami critici.

Il risultato più eclatante ottenuto dal “team di esperti” fu quello che, al progredire di questa metodologia, si evidenziavano molti rischi potenziali e molti problemi di esercizio che non erano stati previsti in fase di progetto. Il passo successivo fu modificare l’analisi critica in una tecnica ancora più strutturata, in grado di generare “deviazioni dalle intenzioni di progetto”, denominata HAZOP (HAZard and OPerability Analysis). Le prime applicazioni su scala industriale (1970) evidenziarono più problemi d’esercizio che rischi, ma al tempo stesso indicavano la necessità di identificare tutti i problemi operazionali in quanto possibili iniziatori di rischi potenziali, sia per la salute dei lavoratori che economici. Questa circostanza portò, fin dai primi passi di questa metodologia, a distinguere tra hazard (ogni situazione operativa che potrebbe causare un rilascio di sostanze tossiche o che potrebbe comportare un danno al personale) ed operability (ogni situazione che potrebbe causare un arresto dell’impianto con possibile impatto sulla sicurezza o sui profitti).

#### 3.4.1.1. Caratteristiche di una HAZOP

Lo scopo dell’HAZOP è identificare i rischi ed i problemi di esercizio derivanti da un qualsiasi sistema, in modo che opportune contromisure possano essere prese per incrementare la sicurezza di quest’ultimo e dell’ambiente che lo circonda.

L’analisi viene svolta in una serie di incontri, durante i quali un team multi disciplinare prende in esame il progetto dell’impianto, seguendo una struttura prestabilita, dettata dall’esperienza del team leader e dalle parole guida.

Il primo vantaggio di questo “brainstorming” è il fatto di stimolare la creatività e di generare idee, utilizzando l’interazione dei componenti del gruppo e la loro diversa formazione culturale. Per questo motivo la metodologia richiede che tutti i membri del team partecipino attivamente e si astengano dal criticare gli altri componenti spingendoli a non esporre le loro idee.

Il gruppo di esperti si focalizza su punti specifici del progetto (nodi), considerandone uno per volta. Per ciascuno di questi nodi vengono esaminate le deviazioni dei parametri di processo attraverso l’utilizzo di parole guida. Queste assicurano che il comportamento dell’impianto sia analizzato in ogni modo possibile. E’ compito del team identificare un numero abbastanza ampio di deviazioni e successivamente ognuna di esse deve essere analizzata per identificarne le cause e le conseguenze.

Il successo di un’HAZOP dipende da molti fattori:

- le abilità tecniche e la perspicacia del team;
- la completezza e la precisione dati usati come base dell’analisi;
- l’abilità del team nell’utilizzare il metodo come uno stimolo alla loro creatività al fine di riuscire a visualizzare il maggior numero di deviazioni, con cause e conseguenze;
- l’abilità del team di concentrarsi sui rischi più seri che sono stati identificati.

Il processo ha carattere sistematico ed è strutturato attraverso una terminologia ben precisa:

<b>NODI</b>	i punti (delle tubazioni, delle strumentazioni o delle procedure) in cui vengono analizzate le deviazioni dei parametri;
<b>INTENZIONE</b>	definisce come deve operare l’impianto nelle intenzioni del progettista;
<b>PAROLE GUIDA</b>	semplici parole che vengono utilizzate per qualificare o quantificare un’intenzione, al fine di stimolare il processo di “ <i>brainstorming</i> ” e quello di identificazione delle deviazioni;
<b>DEVIAZIONE</b>	allontanamento dall’intenzione che è rivelata dall’applicazione sistematica delle parole guida;
<b>CAUSE</b>	le ragioni per cui le deviazioni accadono; una volta dimostrato che la causa è credibile, la deviazione può essere considerata significativa;
<b>CONSEGUENZE</b>	gli eventi che possono accadere a causa delle deviazioni (le conseguenze non significative vengono eliminate);

Le parole guida vengono applicate ai parametri di processo, sia generali (come reazione, trasferimento, spostamento...) sia specifici (come pressione, temperatura, portata...); in questo modo vengono generate le deviazioni significative per ciascuna parola guida, anche se sovente è necessario adattare le parole guida ai parametri in esame.



### **3.4.1.2. Le fasi dell'HAZOP**

Lo svolgimento dell'analisi può essere diviso in cinque fasi, ognuna delle quali assume la stessa importanza ai fini della buona riuscita dello studio:

- definizione dello scopo e degli obiettivi dello studio;
- selezione del team;
- preparazione dello studio;
- esecuzione dell'analisi;
- registrazione dei risultati.

#### **3.4.1.2.1 Definizione dello scopo e degli obiettivi dello studio**

Lo scopo e gli obiettivi dello studio devono essere esplicitati il più possibile, infatti se l'obiettivo è l'identificazione dei rischi e dei problemi di esercizio, il team deve focalizzare lo scopo o la ragione principale per cui viene condotto lo studio, quali ad esempio:

- verificare la sicurezza di un progetto;
- decidere se e dove costruire;
- sviluppare una lista di richieste per un fornitore;
- controllare le procedure di esercizio e di sicurezza;
- incrementare la sicurezza di un sistema esistente;
- verificare che la strumentazione di sicurezza funzioni nel modo migliore.

È importante inoltre definire le conseguenze che devono essere considerate, come:

- sicurezza dei lavoratori;
- perdita di produzione;
- perdite economiche;
- sicurezza pubblica;
- impatto ambientale.

Normalmente, questa fase viene gestita da quello che è definito l'iniziatore dello studio, cioè colui che è responsabile per l'impianto dell'analisi di sicurezza. Per svolgere tale ruolo sono richieste appropriate caratteristiche:

- conoscenza dei meccanismi dell'HAZOP, dei suoi vantaggi e dei suoi limiti;
- capacità di stabilire quando è necessario effettuare uno studio;
- responsabilità atta ad assicurare la riuscita dello studio;
- autorità necessaria per avviarlo e sostenerlo;
- conoscenza adeguata del progetto o del sistema operativo, per garantire l'effettività dell'esame.

Il responsabile della sicurezza per l'impianto deve anche coadiuvare colui che sarà il team leader nella programmazione dell'HAZOP e monitorarne l'operato.

#### **3.4.1.2.2. Selezione del team**

In genere il gruppo che effettua l'analisi è composto dai cinque ai sette membri, tenendo conto che se un team è troppo numeroso viene meno il lavoro di gruppo, se invece è troppo piccolo, potrebbe mancare l'ampiezza di conoscenze necessarie per assicurare una visione completa e multi disciplinare. I componenti devono essere esperti nelle aree più rilevanti per l'esercizio dell'impianto e, nel caso siano richieste competenze specifiche in alcune parti dell'analisi, possono essere introdotti ulteriori elementi esterni al gruppo senza la necessità che essi partecipino all'intero lavoro. La figura principale è quella del team leader che deve avere esperienza nella gestione dell'HAZOP: egli presiede gli incontri del gruppo ed ha il compito di focalizzare correttamente l'attenzione di tutti i membri sull'identificazione dei problemi e non sulla loro risoluzione, giacché lo scopo primo dello studio è l'analisi dei rischi. Affinché il team lavori correttamente, il leader deve fare in modo che tutti i componenti partecipino attivamente alle discussioni, prendendo in considerazione le proposte di tutti, evitando competizioni interne e placando le discussioni troppo accese.

#### **3.4.1.2.3. Preparazione dello studio**

La mole del lavoro necessario dipende dalla complessità e dalle dimensioni dell'impianto. La programmazione dello studio viene fatta dal team leader e prevede una serie di considerazioni:

- assicurare la reperibilità dei dati necessari come disegni, diagrammi, schemi di processo, piante, isometrie; inoltre possono essere richiesti istruzioni di operazione, schemi delle sequenze di controllo degli strumenti e programmi del computer;
- identificare le metodologie di rappresentazione usate nei progetti da esaminare durante l'analisi, tenendo conto che questa si basa sui componenti del sistema e le loro interconnessioni;
- stimare il tempo necessario a svolgere l'intero lavoro e programmare gli incontri;
- selezionare le parole guida e determinare come vanno interpretate se applicate ad un determinato parametro.

Nel caso di analisi molto vaste si può ricorrere anche all'utilizzo di più gruppi distinti, quindi si dovrà organizzare anche un'opportuna coordinazione dei lavori da essi svolti.

#### **3.4.1.2.4. Esecuzione dell'analisi**

In un'analisi preliminare degli schemi di processo l'impianto viene suddiviso attraverso una serie di nodi dopo di che l'HAZOP viene svolta applicando le parole guida ai parametri che caratterizzano i nodi: le parole guida devono essere applicate ad una ad una, a tutti i parametri, per

ogni nodo. La scelta della successione dei nodi viene effettuata seguendo il flusso del processo. La combinazione parola guida-parametro identifica la deviazione, che può essere reale o meno: se non è reale si procede oltre, se invece è reale si passa all'indagine delle cause che possono provocarla e delle conseguenze che può comportare.

A questo punto sono possibili due approcci distinti:

- suggerire un intervento per ogni rischio prima di passare all'analisi di quello successivo;
- iniziare la ricerca di interventi da suggerire solo dopo aver esaminato tutti i rischi.

In genere si ricorre ad un compromesso per cui se la soluzione è facilmente determinabile si interviene immediatamente sul progetto e sulle procedure (facendo attenzione però che questi interventi non vadano a modificare le condizioni ai nodi già esaminati, altrimenti è necessaria un'intera revisione), se invece la soluzione richiede tempi lunghi si può rimandare l'analisi ad un incontro successivo.

I risultati di ogni incontro vengono registrati secondo una procedura predeterminata. Essi consistono nei rischi scoperti, nelle loro cause, nelle conseguenze, nelle raccomandazioni e nelle domande che sono rimaste senza risposta. Lo scopo dell'HAZOP, comunque, non è la riprogettazione dell'impianto quindi se da un lato è utile indicare nelle raccomandazioni gli interventi necessari alla mitigazione dei rischi, dall'altra si deve tener conto della disponibilità di tempo per cui devono essere evitate discussioni estranee all'identificazione dei rischi.

#### **3.4.1.2.5. Registrazione dei risultati**

La fase di registrazione è di fondamentale importanza dato il valore dei risultati raggiunti. La documentazione deve essere ben strutturata ed i dettagli devono essere chiari e non ambigui. Si deve fare in modo che:

- siano utilizzati moduli standard in modo da facilitare la registrazione;
- colui che registra sia altamente competente;
- il team leader controlli la registrazione ed assicuri che sia fatta secondo i moduli standard, che sia ordinata e che i risultati dello studio siano completamente e chiaramente documentati;
- i risultati possano essere sottoposti a verifica indipendente.

Nella programmazione dell'HAZOP è necessario decidere lo stile di registrazione da utilizzare, infatti, esistono due tecniche:

**registrazione completa** – viene documentata l'applicazione di ogni parola guida a ciascun parametro; in ogni caso viene indicata una deviazione dall'intenzione, ma se alcune possono rivelare dei rischi, altre (la maggioranza) sono innocue per cui la registrazione risulta ripetitiva;

questo metodo presenta il vantaggio di una copertura completa dell'impianto, data la sua sistematicità (elemento valutato positivamente dagli organi di controllo della sicurezza) e facilita l'utilizzo di strumenti elettronici, ma la ripetitività che lo caratterizza potrebbe annoiare i membri del team, deteriorandone le prestazioni; per rendere la registrazione più agevole si ricorre ad espressioni quali "non sono state identificate cause potenziali", "non sono state identificate conseguenze negative significative", "non sono richieste azioni di salvaguardia";

**registrazione per eccezione** – vengono documentate solo le attività che portano all'identificazione di un rischio tralasciando le altre; in questo modo la documentazione viene notevolmente ridotta ma non resta traccia dell'analisi completa dell'impianto, la quale è particolarmente utile nel caso di insuccesso dell'analisi o di controversie legali;

La documentazione da produrre deve essenzialmente contenere tre categorie di informazioni:

**i rischi identificati** – ogni rischio deve essere registrato singolarmente; se deriva da più combinazioni di parola guida-parametro, ognuna viene riportata distintamente ma le caratteristiche e le raccomandazioni possono essere racchiuse in un unico rapporto; nessun rischio deve essere ignorato, anche se esistono appositi sistemi di sicurezza atti a scongiurarlo, infatti ignorarlo equivarrebbe a considerare il sistema di sicurezza perfetto; tuttavia può essere segnalata in una nota la presenza del sistema di sicurezza (indicando anche se è sufficiente o meno);

**le domande poste** – per ogni deviazione si deve arrivare a stabilire se essa costituisca un rischio o non lo costituisca, ma non sempre si può arrivare ad una soluzione immediata, a causa di dubbi che possono sorgere durante l'analisi; in questo caso vengono poste delle domande che devono essere registrate ed a cui va data risposta successivamente: non può essere conclusa un'HAZOP se prima non viene data risposta a tutte le domande formulate;

**le raccomandazioni** – servono per eventuali future analisi e sono di varia natura; ad esempio nel caso un rischio identificato non abbia effetti e conseguenze certe si può suggerire uno studio approfondito dello stesso oppure se una deviazione non rivela un rischio ma una inadeguatezza nel progetto si può suggerire un'analisi di quella parte del progetto e così via.

L'analisi di rischio può essere ripetuta più volte durante il ciclo di vita di un impianto in base agli eventi che nel tempo lo coinvolgono. Innanzi tutto i rischi associati ad un sistema variano nelle diverse fasi di vita: in fase di progetto si valuta la sicurezza dell'impianto che sarà costruito seguendo ogni volta le modifiche che vengono apportate; in fase di esercizio si identificano i rischi associati all'impianto definitivamente realizzato, avendo anche il supporto dell'esperienza operativa; in fase di decommissioning si analizzano una serie di rischi totalmente nuovi che potrebbero sorgere. Non si deve dimenticare inoltre che l'analisi di rischio non è mai perfetta,

quindi un unico studio può non essere sufficiente ad individuare tutti i rischi. Infine può accadere che nel corso del tempo le informazioni disponibili siano sempre maggiori e forniscono la possibilità di effettuare uno studio più completo.

### 3.4.1.3. Uso delle parole guida

Il momento cruciale dell'HAZOP è la definizione e l'utilizzo delle parole guida: ciascuna di esse esprime un tipo specifico di deviazione dall'intenzione di progetto ed ha lo scopo di focalizzare lo studio e stimolare idee e discussioni, in modo da massimizzare la probabilità di individuare tutti i possibili rischi. In genere negli impianti industriali viene utilizzato un gruppo di parole guida ristretto, che è costituito dalle seguenti espressioni:

<b>no</b>	negazione dell'intenzione, cioè l'intenzione non si realizza né si realizza altro;
<b>maggiore</b>	incremento quantitativo;
<b>minore</b>	decremento quantitativo;
<b>anche</b>	incremento qualitativo, non solo si realizza l'intenzione ma ulteriori condizioni favorevoli;
<b>parte di</b>	decremento qualitativo, solo una parte dell'intenzione viene raggiunta;
<b>inverso</b>	si realizza il contrario logico dell'intenzione;
<b>diverso</b>	non si realizza l'intenzione, neanche in parte ma accade qualcosa di diverso.

Quando è importante considerare anche il parametro temporale, sono necessarie ulteriori parole guida, che in genere sono:

<b>presto</b>	qualcosa accade molto prima di quando fosse previsto
<b>tardi</b>	qualcosa accade molto dopo di quando fosse previsto
<b>prima</b>	qualcosa accade in anticipo rispetto alla sequenza prevista
<b>dopo</b>	qualcosa accade in ritardo rispetto alla sequenza prevista

Le parole guida scelte e la loro interpretazione devono essere adatte al sistema che si sta esaminando: non tutte le parole guida sono applicabili a tutti i parametri, infatti, ad esempio non ha alcun significato applicare la parola guida "parte di" ad un parametro quale può essere la velocità di rotazione di un motore elettrico (sarà semplicemente "maggior" o "minore").

Si potrebbero creare delle parole guida specifiche per ogni HAZOP che si effettua, ma più genericamente è preferibile utilizzare le parole guida usuali ricordando che esse vanno interpretate in modo diverso per ogni sistema cui sono applicate.

Al team leader spetta il compito, non solo di individuare le parole guida ma anche di darne un'interpretazione per ciascuno dei parametri per cui viene applicata, considerando che alcune

combinazioni non hanno un'interpretazione reale (ad esempio la combinazione temperatura/no è assurda in quanto significherebbe temperatura pari allo zero assoluto) ed alcune possono averne molteplici (ad esempio la combinazione flusso di dati/maggiore può significare un rateo di dati maggiore di quello fissato o una quantità totale di dati maggiore).

Nel caso di utilizzo della tecnica di registrazione completa sono introdotte altre due parole guida:

<b>tutto</b>	se l'esame di un particolare parametro non porta alla rivelazione di deviazioni potenziali, tutte le combinazioni vengono sintetizzate dall'unica combinazione di quel parametro e di questa parola
<b>rimanente</b>	dopo aver esaminato le combinazioni di un parametro aventi deviazioni potenziali, le altre vengono racchiuse nella combinazione parametro/rimanente

in entrambi i casi si accompagna l'indicazione "non sono state identificate cause potenziali".

#### **3.4.1.4. Problematiche dell'HAZOP**

Durante lo svolgimento di un'analisi HAZOP, di cui in figura 3.2 si riporta il flusso logico delle operazioni da eseguire per il suo corretto svolgimento, possono insorgere una serie di difficoltà per cui, allo scopo di ottenere il risultato migliore possibile, è necessario stabilire delle procedure rigorose da seguire nel corso dell'indagine.

*Deviazioni multiple* - Una deviazione potrebbe, singolarmente presa, non comportare alcun tipo di rischio; se però, la stessa deviazione si verifica in concomitanza con altre deviazioni, da innocua può diventare potenzialmente rischiosa. Allo stesso modo il rischio associato ad una combinazione di deviazioni può essere diverso da quello ad esse associato quando considerate separatamente. L'individuazione di queste deviazioni multiple è affidata alle capacità dei componenti del gruppo che svolge l'analisi. Il loro compito diviene particolarmente arduo nell'indagine di sistemi per cui è necessario considerare il tempo e la sequenza delle operazioni: in questo caso si dovrebbe preferire fissare il tempo ed il momento della sequenza, studiare tutte le deviazioni del sistema e poi variare tempo e successione, in modo da evidenziare sempre tutte le deviazioni, piuttosto che fissare l'attenzione su una deviazione singola e considerare le sue variazioni nel tempo e lungo la successione.

*Percorrenza delle tracce* - Spesso un'HAZOP riguarda un disegno che è suddiviso in più fogli e seguire le connessioni tra le varie parti può costituire una fonte di errore per cui è necessario stabilire una procedura da seguire rigorosamente.

In queste situazioni accade che un elemento presente su di uno dei fogli della rappresentazione è meglio illustrato in un altro foglio, allora l'analisi di quell'elemento va posticipata, evitando di anticiparla variando la successione dei fogli preliminarmente stabilita o utilizzando un foglio in cui non siano riportati tutti i dati necessari.

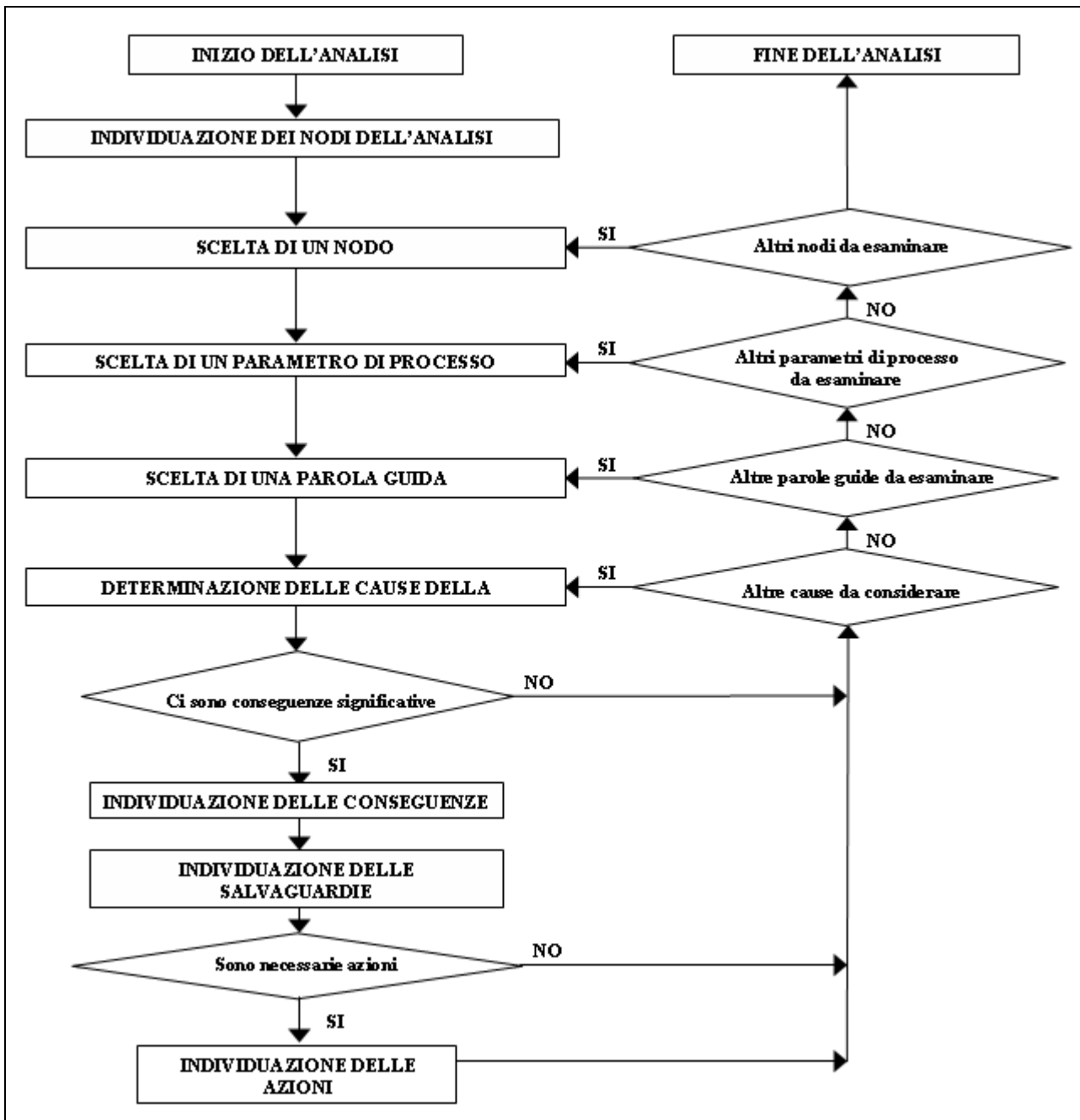


Fig. 3.2 - Il ciclo dell'analisi di rischio HAZOP

### 3.4.2. FMEA/FMECA

L'obiettivo finale di un qualsiasi sistema industriale è quello di essere in grado di svolgere le funzione che il progetto gli ha assegnato per tutta la vita prevista e con un determinato standard di sicurezza.

Per raggiungere questo scopo la progettazione deve tener conto sin dalla fase concettuale di determinate caratteristiche che il sistema deve avere: affidabilità, facilità di manutenzione, sicurezza nell'operazione, adatta logistica. Bisogna considerare inoltre che spesso tali requisiti sono in conflitto tra di loro e soprattutto che non si hanno mai ha disposizione tempi e disponibilità economiche illimitati.

E' in questo contesto che, storicamente, si inseriscono i metodi di analisi FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) e FMECA (Failure Mode and Effect and Criticality Analysis). Questi metodi, nonostante siano i primi utilizzati e per certi versi possano sembrare un po' datati, grazie alla loro semplicità, metodicità ed adattabilità forniscono una guida allo sviluppo di un progetto in tutte le sue fasi in modo che il sistema rispetti determinate caratteristiche. Oltre a questo i dati ottenuti con la FMEA/FMECA forniscono la base di partenza per analisi di affidabilità e di rischio più raffinate, ma anche più onerose, quali: FTA (Fault Tree Analysis) e ETA(Event Tree Analysis). La FMEA/FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) sono tecniche di analisi sviluppata originariamente dalla NASA<sup>4</sup> per incrementare e verificare l'affidabilità dei componenti necessari ai programmi spaziali. Il primo standard che definisce le procedure da seguire per compiere l'analisi è il MIL-STD-1629 sviluppato dall'esercito americano, in questo documento la FMECA è definita come *“uno strumento per valutare e documentare, tramite l'analisi dei modi di fallimento, l'impatto di ogni fallimento funzionale e/o componentistico sul successo della missione, sulla sicurezza del personale e del sistema, sulla manutenibilità e sulle prestazioni del sistema”*.

La FMEA/FMECA nel corso degli anni si è progressivamente diffusa in quasi tutti i settori industriali subendo diverse modifiche e adattamenti per renderla più utile agli impianti industriali e agli insediamenti produttivi. L'applicazione in ambito industriale della FMEA/FMECA è stata codificata nello standard pubblicato nel 1993 dall'AIAG<sup>5</sup> e dalla ASQC<sup>6</sup>. Nei prossimi capitoli verranno discusse dettagliatamente le linee guida di questi due standard, che sono i più diffusi nel mondo industriale. Oltre questi sono stati sviluppati diversi modelli che si rifanno comunque agli standard AIAG o MIL-STD-1629.

### **3.4.2.1 Descrizione generale**

La Failure Mode Effect and Criticality Analysis è una tecnica di valutazione di affidabilità e di supporto della progettazione che esamina i modi potenziali di fallimento all'interno di un sistema e delle sue apparecchiature, al fine di determinarne gli effetti sulle prestazioni del sistema stesso. Ogni potenziale modo di fallire è classificato a seconda del suo impatto sul successo della missione e sulla sicurezza degli utenti del sistema (lavoratori).

---

<sup>4</sup> National Aeronautics and Space Administration - U.S.A.

<sup>5</sup> Automotive Industry Action Group

<sup>6</sup> American Society for Quality Control



La FMECA è composta da due analisi separate, l'analisi dei modi di fallimento e degli effetti (FMEA) e l'analisi di criticità (CA) ed è caratterizzata dalla sistematicità del metodo di analisi, in quanto essa comporta la scomposizione del sistema nei componenti costituenti. Con l'analisi sistematica è possibile individuare sin dalla fase di progettazione i principali difetti di progetto/procedura e porvi rimedio con semplici correzioni in modo di alleggerire le fasi successive di sperimentazione e collaudo. Il risultato è un notevole risparmio di tempo e di costi nello sviluppo complessivo del sistema. Inoltre nell'analisi FMECA rientrano valutazioni su problemi quali: la manutenibilità del sistema, l'accessibilità dei suoi componenti, l'ergonomicità e soprattutto la sicurezza di funzionamento del sistema.

Affinché questo tipo di analisi abbia successo è necessario che l'analista abbia una conoscenza molto dettagliata del sistema sotto esame, di tutti i modi di fallire dei suoi componenti e del loro modo di propagarsi all'interno del sistema in modo da dare una valutazione corretta dell'effetto che ogni fallimento può avere sulla funzionalità del sistema e sulla sua sicurezza, per questo motivo l'analisi quasi sempre viene svolta da un team di esperti del sistema.

La caratteristica principale della FMECA è quella di considerare ogni fallimento come l'unico presente nell'intero sistema, ciò conferisce a questo tipo di analisi particolare snellezza, ma ne costituisce anche la più importante limitazione, infatti non può essere usata da sola come analisi di rischio poiché le stime fatte non sono conservative e spesso solo qualitative, tuttavia i dati raccolti sull'affidabilità per la sua esecuzione oltre a fornire una valida guida per la progettazione costituiscono la base di partenza per analisi di rischio più approfondite.

Riassumendo, la tecnica FMECA:

- determina gli effetti di tutti i modi di fallimento sulle prestazioni del sistema;
- fornisce i dati per lo sviluppo della FTA (Fault Tree Analysis) e la modellazione a blocchi del sistema;
- fornisce una base per identificare le cause radice dei fallimenti e sviluppare azioni correttive;
- facilita lo studio di eventuali alternative di progetto già dalle prime fasi del progetto concettuale;
- aiuta nello sviluppo di metodi per testare i materiali e tecniche di segnalazione guasti;
- fornisce le basi per analisi più raffinate di affidabilità, manutenibilità e sicurezza.

I risultati della FMECA:

- sottolineano i singoli punti del sistema che richiedono azioni correttive;
- forniscono una graduatoria di tutti i fallimenti secondo la severità degli effetti sul successo della missione e sulla sicurezza dei lavoratori e dei macchinari;
- forniscono una stima dei ratei di fallimento;
- identificano i componenti critici ai fini dell'affidabilità e sicurezza.

### 3.4.2.2. Glossario della terminologia usata nella FMEA/FMECA

Viene riportato un glossario di terminologie comunemente utilizzate nell'analisi FMEA/FMECA, così come indicato dai relativi standards, e che costituisce un riferimento rapidamente esteso a tutte le altre metodologie di analisi di rischio.

- **provvedimenti di attenuazione:** azioni che possono essere prese per annullare o attenuare gli effetti di un fallimento;
- **azioni correttive:** cambiamenti documentati nel progetto, processo o procedura fatti per eliminare la causa di un fallimento o una deficienza di progetto;
- **criticità:** una misura relativa delle conseguenze di un modo di fallire e della sua frequenza di accadimento;
- **analisi di criticità:** la procedura con la quale ogni modo di fallimento viene classificato in funzione della severità e della frequenza di accadimento;
- **modo di danneggiamento:** il modo in cui un sistema ha mostrato di danneggiarsi;
- **effetto del danneggiamento:** il risultato o la conseguenza che il modo di danneggiamento ha sull'operazione o la funzionalità del sistema;
- **damage mode and effect analysis (DMEA):** l'analisi dei modi in cui un sistema durante la sua vita può essere danneggiato e come esso risponde a tali danneggiamenti;
- **metodo di rilevamento:** il metodo con cui un fallimento può essere rivelato dall'operatore di sistema sia durante il normale funzionamento che durante le operazioni di manutenzione;
- **effetto finale:** le conseguenze del fallimento di una parte qualsiasi del sistema sull'operazione, funzione e stato del più alto livello di addentramento (sistema superiore);
- **causa del fallimento:** i processi chimico-fisici, le deficienze di progetto, difetti nella qualità, errato assemblaggio o altri processi che portano il componente a fallire nello svolgimento del compito assegnatogli;
- **effetto del fallimento:** l'effetto che il fallimento ha sulla funzionalità, operazione o stato del sistema;
- **modo di fallire:** il modo in cui un fallimento viene osservato;
- **isolamento del fallimento:** il processo di localizzazione del fallimento e di individuazione del livello di profondità su cui è necessario intervenire per annullarne gli effetti;
- **addentramento o livelli di profondità:** i livelli che identificano o descrivono la complessità di una funzione o di un sistema;
- **effetto locale:** l'effetto che il fallimento ha sull'operazione e funzionalità del componente stesso che si sta analizzando;
- **informazioni di manutenibilità:** la procedura che stabilisce, dopo che un fallimento viene identificato, le azioni da compiere per riparare gli eventuali danni provocati o sostituire il componente che ha fallito;

- **fase della missione/modo operativo:** il momento della missione del sistema in cui il componente in studio svolge la sua funzione;
- **effetti sul livello immediatamente superiore:** le conseguenze del modo di fallire del componente analizzato sul livello di addentramento immediatamente superiore;
- **effetto primario del danneggiamento:** il risultato o la conseguenza che il modo di danneggiamento ha direttamente sul sistema o i suoi componenti;
- **ridondanza:** l'esistenza di più componenti indipendenti che assolvono alla stessa funzione all'interno del sistema;
- **effetti secondari:** risultati o conseguenze causati indirettamente dall'interazione di un modo di danneggiamento col sistema o con uno dei suoi componenti;
- **severità:** classificazione della peggiore conseguenza possibile che un dato fallimento può avere secondo una prefissata scala che tiene conto dei danni causati sul sistema, sul personale e sull'ambiente;
- **fallimento 'single point':** un modo di fallire che provoca direttamente il fallimento dell'intero sistema e che non può essere corretto con ridondanze o particolari procedure operative;

### 3.4.2.3. La FMEA secondo lo standard MIL-STD-1629A

La MIL-STD-1629 è composta da cinque principali gruppi procedurali: i gruppi 101-105.

Il gruppo di procedure **101** definisce la metodologia per effettuare la **FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA)**, il cui scopo è identificare ogni possibile modo di fallimento dell'operazione cui il sistema in studio è preposto e classificare ogni potenziale via di fallimento secondo la propria severità. La FMEA fornisce una chiara esposizione dei vari modi di fallimento del sistema e identifica quei componenti che con eventuale modifica possono eliminare o minimizzare la probabilità di fallimento dell'operazione. La procedura per attuare la FMEA è la seguente:

- definizione del sistema/ funzioni richieste e modo di funzionamento;
- studio dell'affidabilità di ogni componente del sistema;
- definizione dei parametri e delle funzioni richieste per il successo dell'operazione;
- definizione degli effetti del fallimento dell'operazione del componente in esame sul livello più alto.

Il gruppo di procedure **102** definisce la metodologia per effettuare **L'ANALISI DI CRITICITÀ (CA)**, il cui scopo è quello di classificare ogni modo di fallimento identificato dalla FMEA attraverso la combinazione della severità con la probabilità di occorrenza. L'analisi di criticità è un compendio alla FMEA e può essere fatta solo dopo il completamento di quest'ultima. I valori ottenuti da questa analisi come si vedrà in dettaglio più avanti sono puramente soggettivi quindi possono essere usati solamente come indici della severità relativa dell'evento.

Il gruppo di procedure **103** definisce la metodologia per effettuare la **FMECA MANTAINABILITY ANALYSIS** che serve ad identificare le caratteristiche di progetto per la manutenibilità che necessitano di azioni correttive. Anche questa analisi può essere effettuata solo dopo il completamento della FMEA.

Il gruppo di procedure **104** definisce la metodologia per effettuare una **DAMAGE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (DMEA)**, il cui scopo è quello di fornire i primi criteri per una valutazione della resistenza e della vulnerabilità del sistema. La DMEA fornisce dati relativi al danno causato alla corretta operazione del sistema e alle funzioni essenziali della missione da uno specifico evento pericoloso.

Il gruppo di procedure **105** definisce la metodologia per sviluppare un **PIANO DI FMECA**, il cui scopo è documentare al committente le attività pianificate mentre si implementa una FMECA. Che dovrebbe includere la descrizione delle seguenti procedure:

- formati dei fogli di lavoro da compilare;
- assunzioni di base;
- descrizione del sistema;
- fase della missione;
- identificazione del livello di addestramento;
- definizione dei modi di fallimento e loro distribuzione;
- durata della missione;
- meccanismi per aggiornare l'analisi durante il processo di progettazione.

#### **3.4.2.4. Tecniche di analisi FMEA**

La FMEA può essere implementata seguendo due diversi tipi di approccio: quello **componentistico** e quello **funzionale**, a seconda della complessità del progetto del suo livello di sviluppo e dalla disponibilità dei dati. È spesso conveniente usare una combinazione dei due tipi di approccio.

L'approccio **componentistico** consiste nell'elenco dei singoli componenti e dei loro possibili modi di fallimento e può essere intrapreso quando è possibile identificare singolarmente i vari componenti negli schemi di progetto; per essere praticabile deve quindi essere già pronto uno schema di funzionamento del processo. In genere quando si usa questo approccio si comincia da uno studio del più basso livello di addentramento del sistema aumentando progressivamente tale livello e viene usato come FMEA finale di progetto. Per questo tipo di approccio l'analista ha bisogno di:

- conoscenza approfondita del sistema;
- schemi a blocchi delle funzioni e dell'affidabilità dei componenti;
- schemi costruttivi;

- liste dei materiali;
- definizione dei livelli di addestramento.

L'analista deve identificare ogni parte del sistema analizzato e registrare il suo numero identificativo nell'apposito foglio di lavoro FMEA. Una volta fatto ciò si devono identificare i vari modi di fallimento con le rispettive cause e studiarne gli effetti a livello locale (ovvero nel livello di addentramento attuale), nel livello di addentramento immediatamente superiore e sulla riuscita della missione del sistema<sup>7</sup>. A questo punto la FMEA viene completata elencando i metodi di rilevamento e isolamento del fallimento e i provvedimenti da prendere per mitigarne gli effetti. In base a questi dati si deve poi elencare: i rischi da ridurre o eliminare, i punti critici del sistema (che comportano il fallimento del processo) e tipi di fallimento che non sono rilevabili mediante ispezioni visive o test.

L'approccio *funzionale* consiste nello studio del sistema come insieme di funzioni ognuno con i propri modi di fallire nella sua missione. Questo tipo di approccio viene usato quando i singoli componenti non possono essere univocamente identificati e/o quando nel progetto sono stati definiti i blocchi funzionali ma non è stata scelta ancora la componentistica, ben si adatta quindi alla fase del progetto di massima. Per questo tipo di approccio l'analista ha bisogno di:

- definizione del sistema e classificazione funzionale;
- diagrammi a blocchi del sistema;
- teoria delle operazioni del sistema;
- assunzioni di base.

Elaborando una FMEA funzionale l'analista deve essere in grado di definire ogni funzione del sistema e degli associati modi di fallire. A questo punto si devono studiare le cause dei potenziali modi di fallimento e i loro effetti la loro propagazione nei livelli di addentramento superiori. Se, successivamente, si intende fare un'analisi di criticità si possono ipotizzare ragionevolmente la probabilità del modo di guasto e la probabilità modale relativa di cui si parlerà in dettaglio nella descrizione della Criticality Analysis. Anche in questo caso l'analista deve concludere lo studio indicando i possibili modi di rilevamento e isolamento del fallimento, i rischi da ridurre o eliminare, i punti critici del sistema ed i tipi di fallimento non rilevabili.

### **3.4.2.5 Analisi di criticità CA**

L'analisi di criticità come la FMEA è un processo che si sviluppa contemporaneamente al progetto, e si aggiorna con l'evoluzione di questo. La CA fornisce una misura relativa dell'importanza che un modo di fallimento ha sul successo dell'operazione e sulla sicurezza del

---

<sup>7</sup> Quest'ultima analisi va fatta considerando il guasto del componente o blocco funzionale come l'unico che avviene in tutto il sistema altrimenti si sconfinerebbe in una FTA.

sistema. Il foglio di lavoro della CA deve essere riferito allo stesso livello di addentramento della FMEA svolta, quindi il numero identificativo del componente, la funzione svolta, i modi di fallimento e relative cause, la fase della missione in cui il componente svolge la sua funzione e la classificazione della severità sono identiche a quelle presenti nel foglio di lavoro FMEA.

Per svolgere l'analisi di criticità si può usare un **approccio qualitativo**, se non si hanno dati specifici sull'affidabilità dei componenti, o un **approccio quantitativo** se questi dati sono disponibili. Per il tipo di analisi da eseguire nell'ambito delle valutazioni di sicurezza di depositi di rifiuti radioattivi si fa riferimento, quasi esclusivamente all'**approccio qualitativo**.

In questo tipo di approccio, non vengono usati i dati relativi il rateo di fallimento e la probabilità del modo di guasto, ma la probabilità di occorrenza di ogni fallimento è raggruppata in classi discrete in cui i componenti vengono inseriti dall'analista in base a dati del tutto generali che si possiedono sul genere di componente che si intende usare. Le classi suggerite dal MIL-STD-1629 sono riportate nella tabella che segue:

LIVELLO	CLASSE	DESCRIZIONE	PROBABILITA' <sup>8</sup>
A	frequente	alta probabilità di occorrenza durante la vita prevista per il componente, probabilità di fallimento della missione	$p > 0.2$
B	ragionevolmente probabile	moderata probabilità di occorrenza durante la vita prevista per il componente	$0.2 > p > 0.1$
C	occasionale	un fallimento che può occasionalmente accadere durante la vita del componente	$0.1 > p > 0.01$
D	remoto	evento difficilmente verificabile durante la vita del componente	$0.01 > p > 0.001$
E	estremamente improbabile	un fallimento la cui probabilità di occorrenza durante la vita del componente è circa zero	$0 < p < 0.001$

Va notato che la scelta dei dati per gli intervalli di probabilità di fallimento della missione sono puramente indicativi, in quanto si suppone che si sta utilizzando l'approccio qualitativo e che quindi tali valori non si conoscono.

### 3.4.2.6. La matrice di criticità'

La matrice di criticità fornisce una visualizzazione dei risultati della FMECA dei componenti del sistema studiato e li rappresenta in ragione della severità.

<sup>8</sup> Valori puramente indicativi per la probabilità di fallimento della missione.

La severità è classificata in quattro categorie dalla I, la più severa alla IV la meno severa secondo la tabella seguente:

DESCRIZIONE	CAT	CONSEGUENZE DELL'INCIDENTE	
		PERSONE	IMPIANTO
Catastrofico	I	Morte	Perdita del sistema
Critico	II	Infortunio severo	Grave danneggiamento del sistema
Marginale	III	Infortunio minore	Lieve danneggiamento del sistema
Minore	IV	Danni irrilevanti	

La severità pertanto classifica le conseguenze degli effetti dei modi di fallimento di un dato livello del sistema. La matrice si costruisce inserendo nelle caselle individuate dai livelli di severità (ascisse) e di occorrenza (ordinate) l'identificativo (di progetto o di analisi) del componente in base ai risultati della FMECA. La matrice risultante mostra la graduatoria della criticità di tutti i modi di fallimento, cosa molto utile per decidere le priorità di eventuali interventi atti a migliorare le caratteristiche del sistema. Come si vedrà dagli esempi la criticità nella matrice ha il massimo incremento salendo verso l'alto lungo la diagonale che va da sinistra a destra della matrice. Per le ordinate si può usare sia la probabilità di occorrenza del fallimento risultante di un'analisi quantitativa, che i livelli di occorrenza qualitativi. Nella matrice si possono usare come parametri sia la criticità modale ( $C_m$ ) che l'indice di criticità ( $C_r$ ).

$$C_r = \sum_{n=1}^F (C_m)_n$$

In cui F è il numero di tipi di fallimento del componente dello stesso livello di severità.

Il RAC suggerisce di prendere  $C_m$  come parametro in quanto si differenziano così i vari tipi di fallimento, con conseguente più rapida ed efficace scelta delle modifiche da segnalare nel progetto. Se si individua un punto 'troppo critico' del sistema si deve cercare di migliorarlo cambiando il componente o addirittura l'intera filosofia progettuale.

Per evitare, per quanto possibile, di dover fare cambiamenti nel sistema in fase avanzata di progettazione, procedimento che può rivelarsi molto oneroso, risulta molto utile applicare la FMECA fin dai primi momenti della progettazione e fare ad ogni step un'analisi di criticità con i conseguenti cambiamenti (anche concettuali).

### 3.4.2.7 Analisi dei modi e degli effetti del danneggiamento (DMEA)

La **Damage Mode and Effect Analysis (DMEA)** è usata per fornire una stima della vulnerabilità e durevolezza di un sistema, è quindi un complemento alla normale analisi FMEA e può essere fatta sia a sistemi di nuova concezione che a sistemi già prodotti. Questo tipo di analisi richiede la conoscenza dei dati ottenuti dalla FMEA quindi può essere fatta solo successivamente ad essa. I dati dalla FMEA richiesti sono:

- il numero di identificazione del componente/sottosistema funzionale;
- la funzione;
- i modi e le cause di fallimento;
- fase della missione in cui interviene il componente;
- classe di severità.

In aggiunta è necessario eseguire, per ogni componente, uno studio di tutti i possibili modi di danneggiamento causati dall'esposizione a specifiche azioni pericolose durante la sua vita. Alla fine vanno determinate le conseguenze sul funzionamento del sistema di ogni modo di danneggiamento identificato. Anche in questo tipo di analisi gli effetti vengono analizzati a livello locale di addentramento, al livello successivo e sul sistema.

#### **3.4.2.8. Analisi di manutenibilità**

L'analisi di manutenibilità è usata per determinare e ottimizzare i livelli di built-in-test (BIT) e la rilevazione di guasti forniti dal sistema. Le informazioni sui guasti che sono rilevabili e isolabili sono usati come input per l'analisi di 'testabilità' e le previsioni di manutenibilità. Questi dati sono forniti dalla FMEA che quindi deve essere completata prima di iniziare questo tipo di analisi.

Le informazioni necessarie per l'analisi di manutenibilità ottenute dalla FMEA sono:

- numero di identificazione del componente/sottosistema funzionale;
- funzione;
- fallimento funzionale (modo di fallimento nella FMEA);
- modo del fallimento ingegneristico (causa del fallimento nella FMEA);
- effetto del fallimento;
- classe di severità;
- fase della missione in cui interviene il componente;
- provvedimenti di attenuazione;
- metodo di rilevamento del fallimento;

Quando si registrano i fallimenti funzionali nel foglio di lavoro, ognuno di essi deve essere contrassegnato da una lettera. Ogni fallimento funzionale può essere causato da diversi fallimenti della componentistica che vanno elencati contrassegnandoli con numeri partendo da 1.

Infine si deve fornire una 'Minimum Equipment List' che determina se il sistema con il suo equipaggiamento definitivo è in grado di svolgere la sua missione con il componente specifico in studio non operativo, e una 'Engineering Failure Mode MTBF' ovvero il periodo medio con cui si presenta il determinato tipo di fallimento.



Nelle pagine successive sono descritti i fogli di lavoro per i diversi tipi di analisi così come proposti dal MIL-STD-1629.

Foglio di lavoro FMEA

SISTEMA.....  
 DATA.....  
 NOME COMPONENTE.....  
 FOGLIO.....DI.....  
 DISEGNO DI RIFERIMENTO.....  
 DA.....  
 MISSIONE.....  
 DA.....

COMPILATO  
 APPROVATO

Numero di identificaz.	Nome del componente	funzione	Modi e cause del fallimento	Fase della missione \ modo di operare	Effetti del fallimento			Modo di rilevamento del fallimento	Provvedimenti di mitigazione	Classe di severità	Annotazioni
					Effetti locali	Effetti sul livello successivo superiore	Effetti finali				
<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>

### Foglio di lavoro per analisi di criticità

SISTEMA.....  
 NOME COMPONENTE.....  
 DISEGNO DI RIFERIMENTO.....  
 MISSIONE.....

DATA.....  
 FOGLIO.....DI.....  
 COMPILATO DA.....  
 APPROVATO DA.....

Numero identific.	Nome componente	funzione	Modi e cause di fallimento	Fase della missione	Classe di sever.	Livello di probabilità fallim.	Probabilità effetto	Rapporto modale di fallim. $\alpha$	Rateo di fallim. $\lambda_p$	Durata mission t	#CRIT modo fallimen. $C_m = \beta \alpha \lambda t$	#CRIT componen. $C_t = \sum(C_m)$	note
<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>	<u>E</u>	<u>K</u>	<u>M</u>	<u>N</u>	<u>Q</u>	<u>P</u>	<u>Q</u>	<u>R</u>	<u>S</u>	<u>T</u>

## Foglio di lavoro per analisi di manutenibilità

Nome del sistema		Data:		Preparato da:	
Livello addentramento		Livello superiore		Foglio di	
Livello superiore		Foglio di		Approvato da:	
Procedimenti di attenuazione effetti					
Nome componente		Nome di fallimento ingegneristico		Fase della missione	
Numero identificativo		Fallimento funzionale		Effetti del fallimento	
<b>A</b>		funzione		Effetti locali	
<b>B</b>		L'LTR		Livello superiore	
<b>C</b>		No.		Effetto finale	
<b>D</b>		No.		Effetti del fallimento	
<b>E</b>		No.		Effetti del fallimento	
<b>F</b>		No.		Effetti del fallimento	
<b>G</b>		No.		Effetti del fallimento	
<b>H</b>		No.		Effetti del fallimento	
<b>I</b>		No.		Effetti del fallimento	
<b>K</b>		No.		Effetti del fallimento	
<b>V</b>		No.		Effetti del fallimento	
<b>W</b>		No.		Effetti del fallimento	



<b><u>A</u></b>	numero di identificazione che deve essere assegnato ad ogni input quindi ad ogni modo di fallimento
<b><u>B</u></b>	nome con il quale si identifica il componente
<b><u>C</u></b>	breve descrizione della funzione svolta dal componente
<b><u>D</u></b>	breve descrizione dei modi in cui può fallire il componente
<b><u>E</u></b>	fase della missione del sistema in cui interviene il componente
<b><u>F</u></b>	spiegazione dell'effetto del fallimento sul componente medesimo, ad esempio se si considera lo studio di un'automobile e come fallimento la perdita d'olio dal serbatoio, l'effetto locale è la perdita d'olio
<b><u>G</u></b>	spiegazione dell'effetto del fallimento sul livello superiore di addentramento, riprendendo l'esempio precedente il motore intero e l'effetto è perdita di lubrificazione nel motore
<b><u>H</u></b>	spiegazione dell'effetto sulla funzionalità dell'intero sistema, nell'esempio l'effetto finale è il grippaggio del motore e quindi l'arresto dell'automobile
<b><u>I</u></b>	spiegazione del modo in cui il fallimento può essere identificato, nel nostro caso si può fornire l'auto di una spia che segnali all'utente il basso livello dell'olio
<b><u>J</u></b>	spiegazione dei provvedimenti da prendere per attenuare gli effetti del fallimento sull'operatività del sistema, se nessun provvedimento è attuabile si scrive nessuno
<b><u>K</u></b>	classe di severità del fallimento (da I a IV), nel nostro esempio I poiché il grippaggio del motore causerebbe la perdita totale della funzionalità dell'automobile
<b><u>L</u></b>	note che non possono essere inserite nel resto del foglio di lavoro.
<b><u>M</u></b>	questo dato si inserisce solo se si sta operando un'analisi qualitativa ed è la classe di probabilità dell'evento A,B,C,D,E
<b><u>N</u></b>	valore numerico della probabilità del verificarsi dell'effetto del fallimento nella classe di severità considerata (analisi quantitativa)
<b><u>O</u></b>	probabilità del modo di fallimento (analisi quantitativa)
<b><u>P</u></b>	rateo di fallimento generalmente espresso in fallimenti per milione di ore (analisi quantitativa)
<b><u>Q</u></b>	durata della missione del componente, o per essere conservativi se non si può valutare esattamente tale valore si può inserire la durata della vita prevista per l'intero sistema (analisi quantitativa)
<b><u>R</u></b>	criticità relativa del modo di fallimento (analisi quantitativa)
<b><u>S</u></b>	criticità del componente, somma di tutte le criticità relative del componente rientranti nello stesso livello di criticità (analisi quantitativa)
<b><u>T</u></b>	note che non possono essere inserite nelle altre caselle del foglio di lavoro
<b><u>U</u></b>	tutte le cause di fallimento che causano la perdita della medesima funzione
<b><u>V</u></b>	tutte le limitazioni alle prestazioni del sistema nel caso in cui questo possa continuare a svolgere la sua missione nonostante il fallimento del componente in studio
<b><u>W</u></b>	il periodo medio con cui si presenta il fallimento ed eventuali annotazioni che non possono essere inserite in altre caselle del foglio di lavoro
<b><u>Y</u></b>	modi in cui il componente si può danneggiare in seguito a determinati trattamenti
<b><u>Z</u></b>	note che non possono essere inserite in altre caselle del foglio di lavoro.

#### LEGENDA DEI FOGLI DI LAVORO

### **3.4.2.9. Le fasi dell'analisi FMEA/FMECA**

Indipendentemente dallo standard seguito l'analisi FMEA è costituita dalle seguenti fasi:

- definizione del sistema;
- definizione delle assunzioni di base;
- costruzione dei digrammi blocchi del sistema;
- identificazione dei modi di fallimento;
- analisi degli effetti dei fallimenti;
- inserimento dei dati ottenuti nel processo di progettazione;
- classificazione degli effetti dei fallimenti secondo la severità;
- sviluppo dei calcoli di criticità;
- classificazione della criticità dei modi di fallimento;
- determinazione dei componenti critici del sistema;
- inserimento dei dati ottenuti nel processo di progettazione;
- identificazione delle strategie per identificare, isolare e attenuare i fallimenti;
- analisi di manutenibilità;
- documentazione dell'analisi, sommario delle aree del progetto non correggibili, identificazione dei controlli da fare per ridurre il rischio associato ai fallimenti;
- raccomandazioni;
- esecuzione delle azioni correttive
- ripetizione dell'analisi del progetto aggiornato.

#### **Definizione del sistema**

Questo è necessariamente il primo passo dell'analisi FMECA. La completa definizione del sistema comprende l'identificazione delle funzioni interne al sistema e le funzioni di interfaccia, le prestazioni del sistema ad ogni livello di approfondimento, i limiti del sistema e la definizione dei fallimenti. La descrizione delle funzioni va sviluppata per ogni missione che il sistema deve compiere, per ogni suo modo di operare e per gli obiettivi primari e secondari che esso deve raggiungere. Si deve descrivere l'utilizzazione dell'equipaggiamento che correda il sistema, la durata prevista per la missione, le funzioni e gli output di tutti i componenti. Inoltre devono essere determinate le condizioni per le quali si considera che il sistema ha fallito. Infine vanno definiti i livelli di addentramento su cui si vuole svolgere l'analisi.

#### **Assunzioni di base**

Per facilitare la comprensione del rapporto della FMECA l'analista deve documentare chiaramente le assunzioni che vengono ipotizzate, quando comincia l'analisi di ogni componente.

Generalmente le assunzioni da fare riguardano l'ambiente in cui il sistema lavora, e i metodi di analisi usati e spesso richiedono l'approvazione del committente.

La assunzioni da dichiarare sono:

- la missione del componente analizzato;
- la fase della missione che viene considerata nell'analisi;
- la durata della missione;
- le categorie di severità usate;
- la provenienza dei dati sulle distribuzioni dei modi di fallimento (dati del venditore, studi statistici, giudizio dell'analista);
- fonti dei dati sui ratei di fallimento dei componenti (handbooks, dati del venditore);
- metodologie e concetti usati per rivelare i fallimenti (BIT, allarmi).

Quasi sempre la FMECA viene adattata al prodotto in studio e i risultati non devono essere necessariamente in accordo con lo standard MIL-STD-1629, ogni cambiamento che si fa però deve essere preventivamente dichiarato.

### **Diagrammi a blocchi**

È opportuno tracciare un diagramma a blocchi funzionale e di affidabilità. Un diagramma a blocchi rappresenta le interrelazioni e le interdipendenze esistenti tra le varie 'entità funzionali' del sistema e aiuta a tracciare la propagazione del fallimento ai livelli di addentramento superiori. Gli input e output di ogni componente deve essere rappresentato sul diagramma. Inoltre per facilitarne la lettura è opportuno sviluppare un sistema di numerazione per identificare i diversi blocchi funzionali.

### **Identificazione dei modi di fallimento**

Vanno trovati tutti i modi di fallimento dei componenti e di interfaccia e vanno valutate le conseguenze sul componente stesso sul sistema e sulla missione. Questa operazione viene fatta analizzando gli schemi a blocchi del sistema e i modi di fallimento trovati devono essere congruenti con quelli dichiarati nella definizione del sistema.

Le seguenti sono le condizioni che determinano il fallimento della missione del componente:

- operazione anticipata;
- operazione ritardata;
- operazione intermittente;
- fallimento di arresto nel giusto momento;
- perdita di output;



- output degradato o capacità di operare ridotta.

Se si sta compiendo una CA qualitativa ad ogni modo di fallire individuato l'analista deve associare un livello di probabilità di accadimento in base al suo giudizio personale, mentre se la CA è quantitativa la probabilità va assegnata in base ai dati reperiti.

### **Analisi degli effetti del fallimento**

Per ogni fallimento identificato va analizzato l'effetto al 'livello locale' ovvero nel livello di addentramento in cui si sta facendo l'analisi e spesso coincide con il fallimento stesso. In seguito si analizzano gli effetti sul livello di addentramento immediatamente superiore, che si identifica sullo schema a blocchi. Infine il MIL-STD-1629 prescrive di analizzare gli effetti finali sull'intero sistema, senza analizzare gli effetti che potrebbero aversi sui livelli intermedi.

Generalmente gli effetti finali rientrano nelle seguenti categorie:

- fallimento totale del sistema, il fallimento in studio ha effetti catastrofici sullo svolgimento della missione;
- operazione degradata il sistema può portare a termine la missione ma con prestazioni minori;
- fallimento di stato il fallimento causa l'impossibilità dell'operatore di poter conoscere la reale condizione di funzionamento del sistema o dell'equipaggiamento;
- nessun effetto immediato il fallimento non causa effetti sul corretto adempimento della missione;

L'analista dovrebbe comunque adattare tali categorie allo specifico sistema in studio.

### **Classificazione della severità**

Per ogni modo di fallimento va valutata il peggior effetto ipotizzabile sul sistema e in base a tale effetto al modo di fallimento va assegnata la classe di severità (I;II;III;IV) come visto nei paragrafi precedenti. Se le categorie vengono modificate perché non si adattano bene al sistema, ogni cambiamento fatto va dichiarato nelle assunzioni di base.

### **Metodi di rivelazione del fallimento**

Nella FMECA vanno identificati i modi in cui si può segnalare all'operatore il fallimento occorso all'interno del sistema, ad esempio allarme visibili, allarmi udibili, sistemi di sensori e indicatori etc. Se per il fallimento di un componente non è previsto l'uso di alcun segnalatore va studiato se tale fallimento può avere conseguenze sull'operatività e sulla sicurezza del sistema. Oltre a questo

il MIL-STD-1629 stabilisce che nel caso in cui la spia non esistesse e il sistema rimanesse operativo nonostante il fallimento va analizzata l'eventualità di un fallimento secondario e la sua rilevabilità da parte dell'operatore o dai tecnici della manutenzione.

Le indicazioni che possono giungere all'operatore dai segnalatori possono essere di tre tipi:

- normale: il funzionamento del sistema è corretto
- anormale: il funzionamento del sistema non è corretto e ci può essere stato un fallimento
- incorretto: il sistema funziona correttamente ma il segnalatore indica un malfunzionamento o viceversa.

### **Metodi di isolamento**

Dopo che il fallimento viene rivelato, se possibile, deve essere isolato affinché non si propaghi nel sistema. Quando un componente fallisce, una volta accertati i sintomi del fallimento, l'operatore per isolarlo deve compiere uno o una serie di azioni per azzerare le cause di radice che hanno determinato il fallimento. La descrizione di queste azioni verrà usata per compilare le prescrizioni tecniche e i manuali di manutenzione oppure per sviluppare dei sistemi automatici di isolamento che mettano in sicurezza il sistema guidando o sostituendo completamente l'operatore.

### **Provvedimenti di attenuazione**

I provvedimenti di attenuazione sono caratteristiche di progetto o manovre dell'operatore atte a circoscrivere o ridurre gli effetti del fallimento di un componente. Va identificato ogni possibile sottosistema da realizzare all'interno del sistema in grado di annullare sia attivamente che passivamente gli effetti del fallimento.

Le azioni mitigative nel progetto possono includere:

- componenti ridondanti
- sistemi di protezione e sicurezza
- sistemi di emergenza in stand-by che possano svolgere la missione se questa è rilevante ai fini della sicurezza

L'analista deve sottolineare le strategie di attenuazione che ritiene più efficaci.

Deve anche essere studiata l'eventualità che l'operatore in seguito a segnalazione d'allarme possa compiere una manovra sbagliata e inserire le relative conseguenze tra le annotazioni nel foglio di lavoro.

### **Classificazione della criticità**

Quando si attua un'analisi di criticità quantitativa è opportuno calcolare sia la criticità del modo di fallimento  $C_m$  che la criticità del componente  $C_r$  come descritto precedentemente, inoltre bisogna sempre riportare la fonte dei dati usati per i calcoli.

### **Lista dei componenti critici**

Lo scopo della lista è quello di stilare una classifica degli effetti dei modi di fallimento di un componente in base alla loro severità e alla probabilità di occorrenza in modo da assegnare le priorità di intervento per migliorare il progetto.

### **Raccomandazioni**

Come conclusione della FMECA l'analista deve fare delle raccomandazioni su come migliorare il progetto, ad esempio l'utilizzo di materiali di migliore qualità, l'uso di ridondanze etc. etc. Questo procedimento di aggiornamento del progetto deve avvenire sin dai primi stadi ed ad ogni stadio del processo di progettazione, questo per ottimizzarne i costi e i tempi.

#### **3.4.2.10. FMEA di progetto (DFMEA) e di processo (PFMEA)**

Questo tipo di FMEA serve a identificare e correggere potenziali fallimenti del sistema in studio la cui causa si possa identificare in errori di progetto DFMEA (design FMEA) o in errori nel processo di produzione PFMEA (process FMEA). Questo tipo di analisi rispetto a quella indicata dallo standard MIL-STD-1629 abbandona ogni velleità di analisi quantitativa per cui presenta notevoli vantaggi economici e di tempo ma di contro i risultati sono completamente dipendenti dalla bravura degli analisti e non forniscono dati numerici che possono poi essere utilizzati in analisi tipo FTA. In genere queste analisi vengono effettuate da un team di esperti mediante attività di brainstorming, questo per migliorare i risultati dell'analisi e per ovviare al pericolo che il risultato di un'analisi dipenda dallo stato d'animo dell'analista. Per i motivi precedentemente visti questo tipo di analisi è particolarmente indicato per le fasi preliminari della progettazione, quindi per la fase concettuale e per l'ottimizzazione di progetti e processi per la produzione di sistemi che non richiedano analisi di rischio particolarmente accurate. In questo capitolo si seguirà lo standard AIAG<sup>9</sup> per la determinazione del 'Risk Priority Number'. Nei paragrafi seguenti verranno descritti i passi principali del procedimento che occorre seguire per effettuare una PFMEA/DFMEA.

### **Identificazione del sistema e dei modi di fallire**

Il primo passo dell'analisi è l'identificazione del sistema in studio e la sua descrizione. Una volta che l'oggetto dell'analisi è stato definito vanno identificate le sue funzioni, ovvero lo scopo per cui il sistema è stato progettato, e se tale oggetto è composto di diversi sottosistemi vanno identificate le funzioni di ogni sottosistema.

---

<sup>9</sup> Automotive Industry Action Group

A questo punto vanno descritti i modi potenziali in cui il sistema può fallire nello svolgimento dei compiti assegnati. I modi di fallire rientrano in una delle seguenti cinque categorie:

- fallimento completo;
- fallimento parziale;
- fallimento intermittente;
- fallimento graduale durante il funzionamento;
- prestazione eccessiva.

L'inserimento dei modi di fallire in una di queste categorie può aiutare il team che svolge l'analisi a verificare che la funzione sia ben definita e può anche aiutare a identificare modi particolari di fallimento che altrimenti potrebbero non essere scovati.

### **IDENTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DEL FALLIMENTO**

Il passo successivo dell'analisi è l'identificazione delle conseguenze potenziali in cui può risultare il fallimento, questo viene tipicamente fatto mediante attività di brainstorming. In questo tipo di analisi l'effetto non si considera con la sua probabilità ma come evento certo una volta che si sia verificato il determinato tipo di fallimento. Risulterebbe però alquanto scorretto considerare alla stessa stregua eventi con probabilità elevata e altri con probabilità esigua, per far fronte questo si usa la *'procedura per le conseguenze potenziali'* che consiste nell'identificazione di particolari modi di fallimento aggiuntivi.

La procedura per le conseguenze potenziali è la seguente:

- si trovano tutti i potenziali effetti del modo di fallire in studio (identificato dalla sigla F1) tramite brainstorming;
- si separano tutti quelle conseguenze che si possono considerare effetto sicuro del modo di fallimento F1;
- si determina uno o più nuovi modi di fallire che contengano le circostanze che concomitanti a F1 favoriscano il verificarsi delle conseguenze non assunte come effetto di F1.

Durante le riunioni di valutazione, spesso si verifica l'identificazione di effetti alquanto improbabili con conseguenze molto severe, ma sarebbe inconcepibile formulare per ognuno un modo di fallimento, per questo tipo di conseguenze conviene spesso usare un unico modo di fallimento.

Una volta identificati tutti i modi di fallimento con i relativi effetti questi vanno classificati secondo la loro severità assegnando loro un valore, detto di *severità*, da 1 a 10 come mostrato nelle seguenti tabelle.

<b>EFFETTO</b>	<b>SEVERITÀ DEGLI EFFETTI PER DFMEA</b>	<b>VALORE</b>
Pericoloso nessun avvertimento	Il fallimento compromette il funzionamento in sicurezza del sistema o il mancato rispetto delle leggi senza alcun avvertimento di attenzione	10
Pericoloso con avvertimento	Il fallimento compromette il funzionamento in sicurezza del sistema o il mancato rispetto delle leggi con avviso di attenzione	9
Molto alto	Il sistema è inutilizzabile con perdita della funzione primaria	8
Alto	Il sistema è utilizzabile ma le prestazioni sono ridotte	7
Moderato	Il sistema è utilizzabile ma alcune caratteristiche di efficienza sono perse	6
Basso	Il sistema è utilizzabile ma con un ridotto grado di efficienza	5
Molto basso	Il sistema è utilizzabile ma con molti parametri di funzionamento non conformi	4
Minore	Il sistema è utilizzabile ma con alcuni parametri di funzionamento non conformi	3
Molto minore	Il sistema è utilizzabile con qualche parametro di funzionamento non conformi	2
Nessuno	Nessun effetto	1

<b>EFFETTO</b>	<b>SEVERITÀ DEGLI EFFETTI PER PFMEA</b>	<b>VALORE</b>
Pericoloso nessun avvertimento	Il fallimento può mettere in pericolo l'utilizzatore del macchinario, compromette il funzionamento in sicurezza o causa il mancato rispetto di legge, il fallimento si presenta senza preavvisi	10
Pericoloso con avvertimento	Il fallimento può mettere in pericolo l'utilizzatore del macchinario, compromette il funzionamento in sicurezza o causa il mancato rispetto di legge, il fallimento si presenta con preavviso	9
Molto alto	Rottura di buona parte della linea di produzione. Può dover essere scartato il 100% dei prodotti. Il prodotto è inutilizzabile e non può compiere la sua funzione primaria	8
Alto	Rottura di parte della linea di produzione. Il prodotto può essere distribuito ma una parte deve essere scartata. Il prodotto è funzionante ma ad un livello ridotto di prestazioni	7
Moderato	Rottura di parte della linea di produzione. Una parte del prodotto deve essere scartata. Il prodotto è funzionante ma alcune caratteristiche di comfort e convenienza sono inefficaci	6
Basso	Rottura di parte della linea di produzione. Il 100% dei prodotti può dover essere rilavorato. Il prodotto è funzionante ma alcune caratteristiche di comfort/convenienza sono parzialmente inefficaci	5
Molto basso	Rottura di parte della linea di produzione. Parte dei prodotti possono essere distribuiti e parte richiedere una nuova lavorazione. La finiture e le dimensioni o i rumori possono non essere conformi con le specifiche.	4
Minore	Rottura di parte della linea di produzione. Parte dei prodotti possono essere distribuiti e parte richiedere una nuova lavorazione. La finiture e le dimensioni o i rumori possono non essere conformi con le specifiche.	3
Molto minore	Rottura di parte della linea di produzione. Parte dei prodotti possono essere distribuiti e parte richiedere una nuova lavorazione. La finiture e le dimensioni o i rumori possono non essere conformi con le specifiche.	2
Nessuno	Il modo di fallire non ha conseguenze	1

### Identificazione delle cause del fallimento

Dopo aver assegnato la severità ad ogni tipo di fallimento vanno identificate le cause dei fallimenti rilevati, lavoro che va sempre svolto da un team. L'identificazione deve partire dal fallimento che ha l'effetto più severo. Le deficienze di progettazione che inducono a un errore nell'assemblaggio o nella manifattura del pezzo rientrano nella FMEA di progetto. Nella DFMEA si assume che durante l'assemblaggio o la manifattura vengano rigorosamente rispettate le specifiche e quindi le cause dei fallimenti vanno ricercati nel progetto del prodotto

Nella FMEA di processo le cause di un fallimento sono specifici errori nel processo di produzione descritti in termini di qualcosa che può essere corretto o controllato. Nella PFMEA si assume quindi che il prodotto sia adeguatamente progettato e che non fallirà a causa di deficienze progettuali. Questo comunque non implica che tutti gli inputs che entrano nel processo di produzione rispondano alle specifiche di progetto. Possono quindi essere presi in considerazione nella PFMEA eventuali variazioni delle forniture dei componenti.

Una volta trovate tutte le cause che possono portare al fallimento in studio è possibile assegnare la frequenza o la probabilità con cui si ritiene che i prodotti falliranno quindi si assegna un valore, detto di 'OCCORRENZA', da 1 a 10 corrispondente alla frequenza trovata come descritto nelle due tabelle seguenti.

PROBABILITÀ DI FALLIMENTO	RATEO DI FALLIMENTO	VALORE
Molto alta: fallimento quasi inevitabile	$\geq 1$ su 2	10
	1 su 3	9
Alta: fallimento ripetuto	1 su 8	8
	1 su 20	7
Moderata: fallimento occasionale	1 su 80	6
	1 su 400	5
	1 su 2000	4
Bassa: relativamente pochi fallimenti	1 su 15000	3
	1 su 150000	2
Remota: fallimento improbabile	$\leq 1$ su 1500000	1

**Tabella per l'assegnazione del valore dell'occorrenza per DFMEA**

PROBABILITÀ DI FALLIMENTO	RATEO DI FALLIMENTO	VALORE
Molto alta: il fallimento è quasi inevitabile	$\geq 1$ su 2	10
	1 su 3	9
Alta: generalmente processi simili hanno presentato frequenti fallimenti	1 su 8	8
	1 su 20	7
Moderata: generalmente processi simili hanno presentato occasionali fallimenti ma non in grandi proporzioni	1 su 80	6
	1 su 400	5
	1 su 2000	4
Bassa: isolati fallimenti associati a simili processi	1 su 15000	3
Molto bassa: soltanto fallimenti isolati sono associabili ad un processo del genere	1 su 150000	2
Remota: il fallimento è improbabile. Nessun fallimento è associabile ad un processo del genere	$\leq 1$ su 1500000	1

**Tabella per l'assegnazione del valore dell'occorrenza per PFMEA**

### Studio dei controlli in corso

I controlli di progetto e di processo presenti nella produzione di un oggetto possono essere raggruppati a seconda del loro scopo nelle seguenti tre categorie:

- tipo 1: questi controlli prevengono il presentarsi della causa del fallimento, o riducono il rateo di occorrenza delle cause;
- tipo 2: questi controlli rivelano la causa del fallimento e portano quindi ad azioni correttive;
- tipo 3: questi controlli rivelano il modo di fallire prima che il prodotto raggiunga l'utilizzatore che può essere sia lo stadio successivo di produzione sia il consumatore finale.

Una volta identificati i controlli presenti per il modo di fallimento in studio si deve assegnare al complesso di rilevazione un valore, detto di 'RILEVABILITA'', da 1 a 10 che rispecchi la probabilità che tutti questi controlli riescano a segnalare/prevenire il fallimento come mostrato nelle tabelle seguenti:

RILEVAZIONE	PROBABILITÀ RILEVAZIONE TRAMITE CONTROLLI DI PROGETTO PER DFMEA	VALORE
Assoluta incertezza	I controlli di progetto non rivelano una potenziale causa o un conseguente modo di fallire; o non ci sono controlli di progetto	10
Molto rara	Le possibilità che i controlli di progetto rivelino una potenziale causa di fallimento o un conseguente modo di fallire sono molto remote	9
Rara	Le possibilità che i controlli di progetto rivelino una potenziale causa di fallimento o un conseguente modo di fallire sono remote	8
Molto bassa	Le possibilità che i controlli di progetto rivelino una potenziale causa di fallimento o un conseguente modo di fallire sono molto basse	7
Bassa	Le possibilità che i controlli di progetto rivelino una potenziale causa di fallimento o un conseguente modo di fallire sono basse	6
Moderata	Le possibilità che i controlli di progetto rivelino una potenziale causa di fallimento o un conseguente modo di fallire sono moderate	5
Buona	Le possibilità che i controlli di progetto rivelino una potenziale causa di fallimento o un conseguente modo di fallire sono moderatamente alte	4
Alta	Le possibilità che i controlli di progetto rivelino una potenziale causa di fallimento o un conseguente modo di fallire sono alte	3
Molto alta	Le possibilità che i controlli di progetto rivelino una potenziale causa di fallimento o un conseguente modo di fallire sono molto alte	2
Quasi certa	I controlli di progetto rileveranno quasi certamente una potenziale causa di fallimento o il conseguente modo di fallire	1

RILEVAZIONE	PROBABILITÀ RILEVAZIONE TRAMITE CONTROLLI DI PROCESSO PER PFMEA	VALORE
Assoluta incertezza	non si conoscono controlli di processo in grado di rilevare il modo di fallimento o le potenziali cause	10
Molto rara	probabilità molto remota che i controlli correnti rivelino modi/cause di fallimento	9
Rara	probabilità remota che i controlli correnti rivelino modi/cause di fallimento	8
Molto bassa	probabilità molto bassa che i controlli correnti rivelino i modi di fallimento o le potenziali cause	7
Bassa	probabilità bassa che i controlli correnti rivelino i modi/cause di fallimento	6
Moderata	probabilità moderata che i controlli correnti rivelino modi/cause di fallimento	5
Buona	probabilità moderatamente alta che i controlli correnti rivelino i modi di fallimento o le potenziali cause	4
Alta	probabilità alta che i controlli correnti rivelino i modi di fallimento o le potenziali cause	3
Molto alta	probabilità molto alta che i controlli correnti rivelino i modi di fallimento o le potenziali cause	2
Quasi certa	i controlli in corso rilevano quasi sicuramente il modo di fallimento o le potenziali cause, tali controlli sono conosciuti e funzionano su processi analoghi	1

### Calcolo del risk priority number rpn

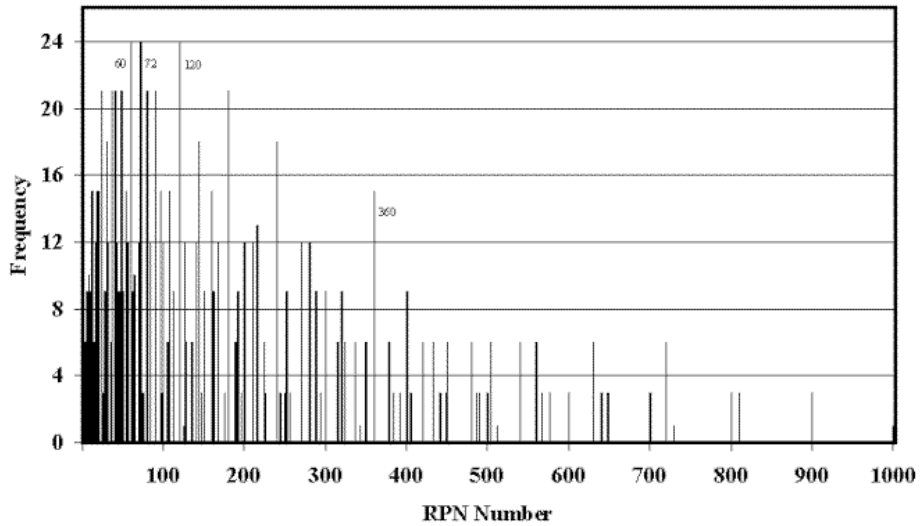
Il Risk Priority Number di un modo di fallire è il prodotto matematico dei tre valori assegnati per la severità degli effetti del fallimento (Severità), per probabilità che il presentarsi delle potenziali cause sfocino nel fallimento (Occorrenza) e per l'efficacia del sistema di produzione di rilevare il fallimento prima che il prodotto raggiunga il consumatore (Rilevabilità), quindi  $RPN=S \cdot O \cdot R$ . questo numero serve ad identificare i rischi maggiori associati al prodotto in studio e quindi guida le azioni correttive. L'analisi dell'equazione mostra che il metodo RPN per calcolare la rischiosità di un prodotto è una semplificazione eccessiva. Infatti severità, occorrenza e rilevabilità non dovrebbero avere lo stesso peso nel calcolo del rischio. A tale distorsione si aggiunge la non linearità delle singole scale. Come risultato, alcuni scenari producono un RPN più basso di altre combinazioni S-O-R nonostante il rischio sia maggiore.

Inoltre bisogna fare attenzione nella valutazione del RPN, poiché ha proprietà statistiche non intuitive, e ciò può portare a considerazioni sbagliate dovute al fatto che tale valore va da 1 a 1000. Alcuni errori comuni e le relative correzioni sono riportati nella seguente tabella.

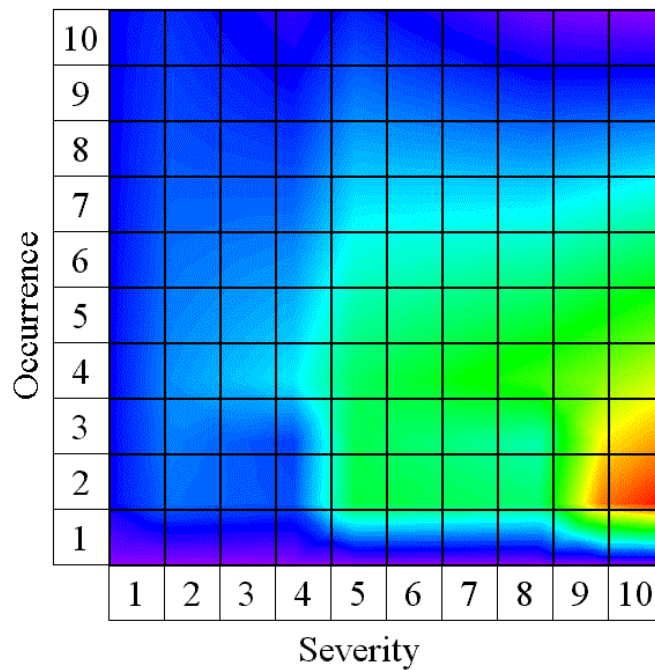
ASSUNZIONI ERRATE	DATI STATISTICI REALI
Il valor medio di tutti gli RPN possibili è 500	Il valor medio degli RPN è 166
Metà dei valori RPN cade al di sopra di 500 (mediana = 500)	Il 6% dei valori RPN cade al di sopra di 500 la mediana è 105
Ci sono 1000 possibili valori per gli RPN	Ci sono solo 120 valori per gli RPN

I 1000 numeri RPN generati da tutte le possibili combinazioni di severità, occorrenza e rilevabilità sono rappresentati nell'istogramma di Fig. 3.3a.





**Figura 3.3a**



**Figura 3.3b**

I valori alti della severità, specialmente quando accoppiati con alti valori dell'occorrenza, meritano una particolare attenzione. La criticità è usata per definire questo tipo particolare di combinazioni e viene definita come il prodotto tra la severità e l'occorrenza. Tuttavia anche questa definizione non può essere considerata completamente corretta data la non linearità delle due scale e il fatto che severità ed occorrenza non possono essere considerate uguali in termini di rischio. Il grafico nella seguente figura mostra la discrepanza tra criticità e il rischio assegnato da un risk assessment particolarmente raffinato. Nella rappresentazione mostrata in Figura 3.3b la zona in blu indica

coerenza tra i risultati, il rosso una grande discrepanza. Si deve considerare che inserendo nei calcoli la rilevabilità la differenza tra i risultati aumenta.

### **Provvedimenti e raccomandazioni**

Scopo fondamentale dell'analisi è fornire indicazioni per migliorare il progetto e/o il processo aumentando la sicurezza associata all'utilizzo del sistema/impianto.

A questo scopo la FMEA termina con le raccomandazioni riguardanti le modifiche da apportare alla produzione se necessarie. I risultati delle modifiche raccomandate (che ovviamente vanno eseguite) devono essere annotati sullo stesso foglio di lavoro e se non soddisfacenti una nuova FMEA deve essere eseguita.

In Appendice 1 del presente rapporto è riportata un'applicazione della metodologia FMEA relativamente ad un generico deposito temporaneo di smaltimento di rifiuti radioattivi.

### 3.4.3 FTA – Fault Tree Analysis

La Fault Tree Analysis (FTA) è un'analisi dei sistemi basata su un approccio deduttivo, il cui scopo è di fornire un metodo per l'individuazione delle cause di un supposto evento indesiderato (incidente) e, operando su queste, di ridurre la probabilità di accadimento dello stesso incidente (ad esempio aumentando l'affidabilità complessiva del sistema). L'evento indesiderato, generalmente definito da un'avaria catastrofica, rappresenta il TOP EVENT nel diagramma del Fault Tree costruito per il sistema in esame.

La FTA può essere anche identificata come un processo di analisi di un sistema, in grado di evidenziare le cause di eventi di più basso livello che, direttamente o indirettamente, contribuiscono ad una causa più rilevante, o in ultimo al top event. La sua importanza risiede nel fatto che, una volta ultimato e letto in senso Down-Top, è in grado di fornire un'analisi completa del sistema attraverso lo sviluppo dei *failure mechanisms* di più basso livello fino al Top Event. L'approccio di tipo Top-Down si concretizza in procedure logiche per mezzo delle quali ogni livello di fault è esteso ai suoi *required input occurrences* fin quando non è definito il livello più basso di fault. Una volta completato, il FT permette una valutazione completa della sicurezza del sistema e/o della sua realizzabilità, alterando (modificando) le varie caratteristiche dello stesso albero.

L'analisi degli alberi di guasto o FTA (Fault Tree Analysis) è stata introdotta per la prima volta nel 1962 nei Bell Telephone Laboratories, in relazione allo studio della sicurezza di sistemi di controllo missilistico; negli anni successivi questo metodo è stato utilizzato sempre più diffusamente nell'industria aerospaziale e nucleare e, in generale, per lo studio di sistemi complessi di grosse dimensioni.

#### 3.4.3.1. Fondamenti della costruzione del FT

L'evento indesiderato è molto spesso il guasto/malfunzionamento che quando si verifica ha per risultato la completa avaria del sistema ed il raggiungimento delle condizioni incidentali. Questo evento è ritenuto *catastrofico*.

Un'avaria che causa la perdita di disponibilità del sistema per degradazione, e/o l'esposizione del contesto ad un rischio rilevante è ritenuto un Top Event. Poiché, in generale, qualsiasi evento osservabile può essere scelto come evento indesiderato, gli analisti devono sapere che la FTA identificherà esclusivamente i rischi correlati al Top Event scelto.

Per definire l'evento indesiderato, devono essere conosciuti le normali operazioni del sistema e le condizioni ambientali, così da permettere agli analisti di definire l'evento come riscontrabile o nel

normale funzionamento o tra i rischi per la sicurezza derivati da condizioni incidentali. Definendo il Top Event, è necessario prestare attenzione al fatto che il range dei guasti non diventi troppo esteso.

I guasti ricadono entro due categorie:

- *O.F. Operational Fault*: è un difetto che si presenta quando un componente sta funzionando come da progetto, ma in tempi inappropriati. Un esempio può essere l'avaria di una valvola di controllo, necessaria per chiudere od interrompere l'introduzione di un reagente in un processo chimico, a causa di un mancato segnale da parte di un dispositivo di comando.
- *C.F. Component Fault*: questo tipo di difetto può essere suddiviso a sua volta in due sotto categorie: primaria e secondaria. Alla primaria appartengono quei difetti che si presentano quando si verifica l'avaria di un componente durante il funzionamento nelle sue condizioni di progetto; alla secondaria appartengono quei difetti che si verificano quando ha luogo l'avaria di un componente che funziona in condizioni diverse da quelle previste dal progetto.

Inoltre, si definiscono:

- *F.O. Fault Occurrence*: quella situazione in cui è avvenuto un evento indesiderato, e questo può essere o no ancora in atto.
- *F.E. Fault Existence*: la situazione in cui la causa di avaria è avvenuta e continua ad essere presente. Il guasto può quindi essere descritto come transitorio o permanente.

Durante la realizzazione del FT, tutti gli analisti di sistema dovrebbero focalizzare la loro attenzione sugli F.O. piuttosto che sugli F.E..

### **3.4.3.2 Failure e Fault**

Un "FAILURE" è definito come l'incapacità di un componente di eseguire una normale funzione; un "FAULT" è una situazione di più alto livello, normalmente preceduta da un'avaria di più basso livello. Un esempio di FAULT può essere quello di considerare la cricatura di un rivestimento, dovuta al surriscaldamento provocato dalla mancata introduzione di refrigerante, a sua volta dovuta al non corretto funzionamento di una valvola. Comunque un FAULT può verificarsi anche quando non si verifica una failure, come ad esempio nel caso in cui una valvola per la refrigerazione funziona correttamente, ma il segnale di apertura è ritardato. Per questo motivo, si può affermare che i FAILURE causano i FAULT, ma non tutti i FAULT sono causati da un FAILURE.

I failure possono essere suddivisi in quattro categorie base, relativamente al livello in cui si verificano:

- componente
- ambiente
- umano
- software

Andandoli a definire si può affermare che:

- i *component failure* si verificano al più basso livello di esame del sistema;
- gli *environmental failure* si presentano quando un sistema è eccessivamente sollecitato in un ambiente non previsto in fase di progetto. I normali stress ambientali sono quelli sotto cui il dispositivo deve poter funzionare come da progetto: la pressione, la temperatura, l'umidità, etc.
- Gli *human failure* sono riferibili ad errori commessi dagli operatori. Questo tipo di problemi può avvenire leggendo in modo errato una misura od interpretando erroneamente una richiesta di un input da parte del software. Questa tipologia di errori è la più difficile da quantificare a causa della totale imprevedibilità dei fattori umani a differenti livelli di stress.
- I *software failures* sono dovuti all'erroneo controllo del software. Tale tipologia si estende dal mancato trattamento di tutte le informazioni previste, alla mancata realizzazione della giusta azione richiesta dal verificarsi di una specifica condizione.

Nell'analisi del sistema è spesso necessario ridurre, o decomporre, l'intero sistema nei suoi componenti per semplificarne l'analisi. I differenti livelli cui i sistemi possono essere esaminati sono:

- Il SYSTEM LEVEL, che corrisponde al più alto livello di verifica ed è il primo ad essere intrapreso nell'analisi. E' effettuato determinando quale sia l'attività desiderata del sistema e le modalità di attività che costituiscono il Top Event. Studiando il sistema, si ispeziona il processo che deve essere eseguito, e si producono delle relazioni che illustrano come il sistema possa andare in avaria.
- Il SUBSYSTEM LEVEL, che è esaminato dividendo il sistema in blocchi funzionali che riflettono le avarie del sub-sistema fissate al punto precedente. Ognuna di queste cause sono espansive per determinare quale parte del sistema in questione contribuisce direttamente o indirettamente agli effetti. Questa suddivisione fornisce agli analisti gli strumenti per operare una grande semplificazione. I blocchi funzionali possono essere per di più suddivisi nei loro componenti.
- Il BASIC EVENT LEVEL, rappresenta il più basso e più complesso livello di analisi. A questo livello si presentano i guasti, anche se è possibile operare un'ulteriore decomposizione per ottenere gli elementi base. Quando si studiano le avarie al BASIC

EVENT LEVEL, gli effetti riscontrati sono come quelli dovuti al fallimento di un componente durante il suo normale funzionamento. In questo caso tuttavia la causa si riferisce alle modalità di fallimento degli elementi base.

Quando si sviluppa l'analisi FTA, gli insuccessi del componente (inputs) sono classificati in tre categorie: insuccesso primario, insuccesso secondario e insuccesso di comando:

- guasto primario : l'insuccesso primario è dovuta alla costruzione o alle caratteristiche materiali del componente stesso.
- guasto secondario: insuccesso del componente è causato da influenze esterne inaccettabili, come per esempio condizioni ambientali, condizioni di applicazione o l'influenza di altre componenti del sistema.
- guasto di comando: è causato da errori di natura umana (operativi) o per uso scorretto.

### **3.4.3.3 I passi principali della costruzione di un FT**

Il sistema deve essere analizzato prima in generale, e poi in modo più specifico, fin quando l'analisi non arriva al più basso livello dello stesso sistema (i suoi componenti non più scomponibili). Così facendo, l'analisi deve essere estesa a tutti gli eventi che possono causare il TOP EVENT.

I passi necessari per realizzare un Fault Tree sono di seguito elencati:

1. definire l'obiettivo dell'analisi;
2. dividere il sistema, se possibile, in sotto sistemi;
3. descrivere completamente ogni sotto sistema;
4. definire il Top Event;
5. determinare le cause prime del Top Event (fault events);
6. determinare una causa per ciascun fault event del Top Event;
7. ripetere il passo precedente, fin quando sono state definiti tutti i fault events al livello di BASIC INPUT.

Il motivo della suddivisione del sistema in più parti sta nel fatto di poter permettere agli analisti di semplificare la costruzione utilizzando ogni failure del sottosistema come una possibile via principale per il FT. Quando un sistema è suddiviso correttamente, il tempo richiesto per valutare l'albero completo può essere ridotto notevolmente.

Per una descrizione completa di ogni suddivisione fatta, è necessaria una profonda conoscenza del sistema. Se l'analista non la possiede, è possibile che alcune cause di avaria siano erroneamente trascurate. Nella realizzazione di un'analisi del rischio, il passo più importante nella costruzione del FT è quello relativo alla definizione dell'evento indesiderato (Top Event): non definendolo correttamente l'intero albero può facilmente risultare inutile. Quando è definito il Top Event, è

necessario elencare tutte le condizioni note circa l'attività del sistema nel dominio dell'oggetto di analisi (vedi passo 1). Una volta determinato il Top Event, si elencano le possibili cause di innesco del Top Event. Con questo, la parte iniziale dell'albero è realizzato. Per determinare la parte successiva, si considera ciascuno degli eventi proposti e quindi si cerca di individuarne le possibili cause: in pratica si ha una reiterazione del procedimento fin quando non si raggiunge il Basic Event Level.

Per quanto riguarda il processo di espansione dei rami dal Top Event verso i Basics Event, valgono le seguenti regole:

1. identificare ogni Fault in modo chiaro e scriverlo in ogni Event Block;
2. definire in modo chiaro ogni failure come failure di componente o di sistema;
3. tutti gli input ad una data "combination gate" sono fault events o basic input;
4. un ramo è descritto completamente fino al basic level prima che ne venga iniziato un altro;
5. il FT dovrebbe essere completato prima di iniziare l'analisi.

#### **3.4.3.4 La struttura grafica dell'albero**

La tecnica degli alberi di guasto richiede la decomposizione del sistema in un diagramma logico, detto albero di guasto, in cui certi eventi primari conducono, secondo particolari cammini di concatenazioni logiche di eventi, ad uno specifico evento che rappresenta l'avaria totale del sistema, detto Top Event poiché si trova sulla sommità dell'albero di guasto.

Iniziando dal Top Event, l'albero di guasto è costruito ramificandosi verso livelli più bassi costituiti da eventi intermedi che potrebbero determinare il Top Event: usando i comuni operatori logici AND, OR, NOT si ricostruisce la sequenza degli eventi fino a raggiungere gli eventi di base, di cui sono note le probabilità di accadimento.

Per evento di base si intende un qualunque guasto, o un qualunque errore umano, che porti alla rottura o al malfunzionamento di un componente o di un sottosistema dell'impianto in esame.

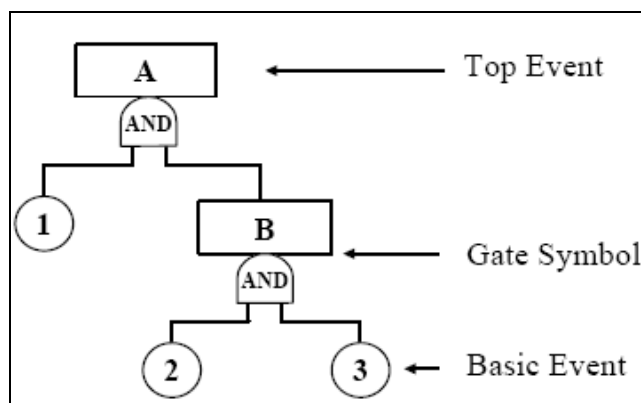
Durante la definizione dell'albero è inoltre importante considerare la presenza di eventuali cause comuni di guasto; se il malfunzionamento o la rottura di un componente del sistema considerato provoca la perdita di più funzioni del sistema stesso, i due o più effetti provocati non sono indipendenti tra loro e questo fatto può portare ad una notevole variazione dell'espressione della possibilità di guasto totale, ovvero del Top Event.

Per rappresentare la sequenza di eventi che devono verificarsi per arrivare alla manifestazione del Top Event, si utilizzano, a vari livelli, dei simboli grafici che rappresentano le relazioni che intercorrono tra gli eventi che convergono in ciascun nodo e l'evento risultante in output. In tabella

3.2 è riportato un elenco di questi simboli grafici ed il relativo significato ed in Fig. 3.4 un esempio di semplice albero logico di guasto

SIMBOLO	TITOLO	DEFINIZIONE
	<b>Top event</b>	Evento incidentale indesiderato del quale si ricercano le cause e si vuole definire una misura della probabilità di accadimento.
	<b>Evento intermedio</b>	Evento che si verifica in seguito all'interazione di altri eventi di base.
	<b>Evento di base</b>	Evento di guasto di un componente o di un sottosistema che non richiede ulteriori indagini di approfondimento
	<b>Evento non sviluppato</b>	Si indicano quegli eventi di guasto che non vengono sviluppati nei loro eventi di base per due ragioni sostanziali: le informazioni disponibili non sono sufficienti, oppure l'evento esce dai confini prestabiliti nell'indagine.
	<b>Porta AND</b>	Impone che l'evento in uscita possa accadere solo se tutti gli eventi in entrata si sono manifestati.
	<b>Porta OR</b>	Impone che l'evento in uscita accada se almeno uno degli eventi in ingresso si è manifestato.
	<b>Trasferimento In - Out</b>	Il triangolo con la dicitura IN indica che l'evento di guasto viene sviluppato altrove (in questo caso assume la funzione di top event per il corrispettivo albero). Il triangolo con OUT ha solo una funzione di richiamo. È necessario usare una codificazione ben precisa in modo da non creare ambiguità nell'interpretazione dei risultati. Stesso significato si attribuisce ai simboli con tratteggio.
	<b>Porta inibitoria</b>	Impone che l'evento in uscita possa manifestarsi se l'evento in ingresso si è verificato e viene contemporaneamente soddisfatta la <i>condizione</i>
	<b>Porta di ritardo</b>	L'evento in uscita si manifesta quando l'evento in ingresso è accaduto ed il tempo di ritardo specificato è completamente trascorso.
	<b>Evento esterno o Casa</b>	Si riporta una condizione o un evento che viene assunto a priori nell'analisi.
	<b>Porta EOR o Porta XOR</b>	L'evento in uscita si verifica se si manifesta uno soltanto degli eventi in ingresso. Si tratta di porte logiche che possono essere realizzate con una combinazione di porte AND ed OR indicate in precedenza.

**Tabella 3.2 - Principali simboli grafici utilizzabili in un FT**



**Figura 3.4 - Esempio di albero logico di eventi di guasto**



### 3.4.3.5 I gates e la logica di Boole

Per impostare la risoluzione di un albero di guasto, in particolare quella di tipo quantitativo, si ricorre alla sua espressione booleana per definire la funzione di guasto caratteristica dell'albero, il cui valore rappresenterà lo stato del sistema in esame.

I gates booleani maggiormente usati sono:

- AND: è prodotto un output solo nel caso in cui tutti gli input sono veri;
- Ordered AND: caso particolare di porta logica AND; è prodotto un output solo nel caso in cui tutti gli input sono veri e lo sono secondo un determinato ordine (logico o temporale);
- OR: l'output è generato solo se uno o più eventi in input sono veri;
- Exclusive OR (XOR): è generato un output solo nel caso in cui uno ed un solo input è vero;
- INHIBIT GATE: è anch'esso un caso particolare di AND GATE. Un input è un evento di lower fault, mentre l'altro è di tipo qualificativo. L'output è un fault event.

La possibilità di esprimere la funzione di guasto mediante un'espressione booleana è dovuta al fatto che si prendono in considerazione unicamente sistemi binari, in cui è possibile rappresentare lo stato di ogni componente, o di ogni evento di base, mediante delle variabili logiche binarie, dalle quali dipenderà la funzione di guasto stessa.

Si indica con  $X_S$  lo stato del sistema e con  $x_i$  quello del suo singolo componente:  $X_S$  e  $x_i$  sono delle variabili logiche che assumeranno valore 0 nel caso di corretto funzionamento del componente del sistema e valore 1 in caso contrario.

Mediante l'espressione booleana si arriva quindi a determinare una relazione detta FORMULA DI STRUTTURA, del seguente tipo:

$$X_{\text{TOP EVENT}} = \Phi(x_1, \dots, x_n)$$

dove  $\Phi$  è la funzione di guasto ed  $n$  il numero degli eventi di base presenti nell'albero che condizionano lo stato del sistema. Per ricavare l'espressione della funzione di guasto è necessario conoscere il modo di operare dei singoli gates che possono essere presenti nell'albero di guasto; per i gates introdotti precedentemente valgono le seguenti proprietà:

AND $x_i \cup x_j = x_i \cdot x_j$
OR $x_i \cap x_j = x_i + x_j - x_i \cdot x_j$
NOT $x_i = 1 - x_i = \bar{x}_i$

➤ Proprietà di identità:	$X_i + 0 = X_i$ e $X_i \cdot 1 = X_i$
➤ Proprietà di assorbimento:	$X_i + 1 = 1$ e $X_i \cdot 0 = 0$
➤ Proprietà di idempotenza:	$X_i + X_i = X_i$ e $X_i \cdot X_i = X_i$
➤ Proprietà dell'inverso:	$X_i + \bar{X}_i = 1$ e $X_i \cdot \bar{X}_i = 0$
➤ Proprietà commutativa:	$X_i + X_j = X_j + X_i$ e $X_i \cdot X_j = X_j \cdot X_i$
➤ Proprietà associativa:	$X_i + (X_j + X_z) = (X_i + X_j) + X_z$ e $X_i \cdot (X_j \cdot X_z) = (X_i \cdot X_j) \cdot X_z$
➤ Proprietà distributiva:	$X_i \cdot (X_j + X_z) = (X_i \cdot X_j) + (X_i \cdot X_z)$ e $X_i + (X_j \cdot X_z) = (X_i + X_j) \cdot (X_i + X_z)$

### 3.4.3.6 Il concetto di Cut Set e Minimal Cut Set di un FT

La funzione di guasto del TOP EVENT , dopo gli opportuni calcoli e le opportune semplificazioni, può essere ridotta alla forma generale di un (unione,OR) di eventi costituiti ciascuno da (intersezioni,AND) di eventi di base.

In questa espressione, la variabile  $X_{TOP\ EVENT}$  assumerà valore 1 (che, ricordiamo, implica il verificarsi del Top Event) qualora anche uno solo degli elementi di tale unione assume valore 1, cioè nel caso in cui tutti i fattori dell'intersezione degli eventi di base che lo formano assumano valore 1 contemporaneamente.

Quindi si può affermare che ogni addendo della somma, ciascuno costituito dal prodotto di eventi di base rappresenta un *Cut-Set* (CS) dell'albero dei guasti, cioè un particolare stato del sistema che rende vero il Top Event. Quindi, ciascun CS è definito come una combinazione (AND) di guasti/malfunzionamenti di componenti (BASIC EVENTS) che, se si verificano assieme, rendono VERO il Top Event. Se, inoltre, gli addendi sono tutti indipendenti tra loro, ovvero se nessuno di essi ne implica un altro, si può affermare che tali addendi rappresentano i cosiddetti *Minimal Cut-Set* dell'albero di guasto, ossia quell'insieme di Cut-Set che non contiene nessun altro *Cut-Set*.

Intervenendo quindi su un qualsiasi componente facente capo ad *un Minimal Cut-Set* si può di fatto influenzare in modo diretto il verificarsi o meno del Top Event. Da tutto ciò si può affermare che, in un FT, se le concatenazioni di eventi di base che causano un Top Event sono i Cut-Set allora un Minimal Cut Set (MCS) è definito come la combinazione minimale di eventi base che, se si verifica, causa il Top Event. Un FT può avere diversi CS e conseguentemente si possono identificare diversi MCS contenuti in questi ultimi.

### 3.4.3.7 Procedure per l'analisi qualitativa di un FT

Una FTA di tipo qualitativo prevede una procedura che si basa su quattro passi principali:

- 1) definire completamente il sistema di analisi;
- 2) identificare l'evento indesiderato (TOP EVENT);
- 3) costruire il FT;

4) analizzarlo qualitativamente.

Vediamo in particolare i punti sopra elencati.

### 1) DEFINIZIONE COMPLETA DEL SISTEMA

Per questa valgono le stesse considerazioni riassunte successivamente e valide per l'analisi quantitativa.

### 2) IDENTIFICAZIONE DELL'EVENTO INDESIDERATO

Per identificare il Top Event si suggerisce di utilizzare il criterio secondo cui lo stesso evento indesiderato dovrebbe:

- essere misurabile, descrivibile ed osservabile;
- includere gli eventi minori;
- essere controllabile.

### 3) COSTRUZIONE DEL FT

Nella costruzione del FT si dovrebbe seguire la procedura di seguito:

- determinare il livello d'esame più basso che si dovrebbe raggiungere (ad esempio il livello dei componenti non riparabili o errore umano);
- iniziare con il guasto al livello del TE descrivendo in modo esaustivo tutti gli eventi di fault che lo causano istantaneamente;
- per ognuno dei faults di più basso livello, si continua la descrizione delle sue cause immediate fino a giungere all'avaria (failure) occorsa a livello dei componenti o all'errore umano che può essere derivato dal problema che si è presentato;
- definire completamente ogni ramo dell'albero prima di cominciarne un altro.

Nel caso in cui fossero disponibili i risultati di una FMECA sul sistema al momento in cui si deve realizzare una FTA, si consiglia di utilizzarli per definire il TOP-EVENT.

### 4) ANALISI QUALITATIVA DEL FT

Al termine della costruzione dell'albero, si deve procedere alla sua analisi o soluzione. Scopo dell'analisi è l'**IDENTIFICAZIONE DEI CUT-SETS (CS)** Dopo aver identificato i (CS) occorre estrarre da questi i cosiddetti **MINIMAL CUT SETS (MCS)**. Osservando il FT completo, è possibile identificare un cut-set lungo un percorso che si estende dal TOP EVENT fino ad un difetto che si trova al livello base. Questo percorso può risultare non lineare, vale a dire può essere costituito da diverse ramificazioni.

Dopo aver risolto il FT, se ne può compiere una valutazione per ottenere risultati di tipo qualitativo che può definire:

- 1) il numero e le sequenze dei MCS;
- 2) l'ordine di un MCS (numero di eventi base che lo costituiscono);
- 3) la maggiore o minore importanza degli elementi costituenti i MCS;
- 4) i MCS con modi comuni di guasto;
- 5) la maggiore o minore importanza degli MCS per il TOP EVENT;

Poiché un MCS, racchiude tutte le possibili combinazioni di eventi di guasto di base che possono causare l'avaria del sistema, l'analisi qualitativa permette di classificare l'importanza (negativa ai fini della sicurezza) di ogni elemento (guasti di base), in misura del suo contributo al MCS rispetto a quello degli altri elementi. La valutazione qualitativa permette di identificare anche quei minimum cut-set che contengono più elementi che possiedono una vulnerabilità comune.

Dalla conoscenza dei MCS per un albero di guasto, si ha la visione dei potenziali punti deboli del sistema, infatti:

- dal numero di MCS si può evincere che più sono i MCS più sono i possibili insiemi di componenti/sottoinsiemi che possono provocare il TE;
- poiché l'ordine di un Minimal Cut Set rappresenta il numero di eventi base in esso contenuti, più l'ordine del MCS è basso più il MCS è importante, poiché sequenze corrispondenti ad un numero piccolo di guasti possono produrre il più grande contributo al guasto del sistema;
- i single failure (MCS di ordine 1), se ci sono, sono i più pericolosi e vi è urgente richiesta di soluzione, di conseguenza i MCS del secondo ordine sono più importanti di quelli del terzo ordine e così via;
- le sequenze di ordine alto invece sono utili per cercare possibili cause comuni di eventi base incluse nello stesso cammino.

Quindi possiamo dire che l'importanza di un componente incrementa con il numero dei MCS in cui esso appare e decrementa con il suo ordine. Inoltre il tipo di evento fornisce un'informazione utile per l'analisi di criticità. Ad esempio un evento relativo ad un errore umano può essere più frequente di uno relativo ad un guasto di un componente. Sulla base di tali criteri qualitativi è possibile elencare gli eventi in base alla loro importanza, al fine di individuare le zone più deboli del sistema (quelle dove sono localizzati i componenti più critici). Quando i guasti di base presentano probabilità di verificarsi dello stesso ordine di grandezza, un'idea dell'importanza dell'avaria può essere ottenuta riordinando secondo le dimensioni dei MCS ottenuti, elencando per primi i MCS relativi ai singoli componenti, quindi quelli dei doppi componenti e così via. Le probabilità di guasto associate ai minimal cut-set diminuiscono con l'ordine di importanza (che può essere indicata dalla "misura" degli stessi cut-set); in questo modo si fornisce un'indicazione grossolana dell'importanza.

La probabilità che si verifichi un'avaria di un elemento è legata a fattori quali:

- il non corretto funzionamento dell'elemento;
- l'errore umano;
- la manutenzione svolta sugli stessi componenti;
- gli intervalli che intercorrono tra un collaudo ed il successivo.

Questo è il motivo per cui si hanno dei valori di probabilità diversi per differenti elementi; per cui l'analisi qualitativa basata solo sulla classificazione dei MCS secondo la grandezza fornisce solo un'indicazione generale della loro importanza.

Per la determinazione dei MCS sono stati sviluppati molteplici metodi: i più diffusi determinano i MCS attraverso la sostituzione (input/output) dei gates a partire dal Top Event fino agli eventi di base (analisi top-down) secondo una matrice bidimensionale in cui gli AND espandono in colonne lo stato delle sequenze di eventi in input e gli OR espandono in righe lo stato delle sequenze di eventi in input fino a leggere direttamente dalla matrice i MCS per riga, oppure con metodiche più analitiche che dagli eventi di base risolvono l'albero fino al top event (analisi bottom-up) attraverso la soluzione di ciascun gate con l'utilizzo delle regole dell'algebra booleana.

#### **3.4.3.8. Procedure per l'analisi quantitativa di un FT**

Una FTA di tipo quantitativo prevede una procedura che si basa su quattro passi principali, che differiscono da quelle viste per l'analisi qualitativa in quanto, per ciascuna di esse, prevale l'attenzione sulla stima delle probabilità del verificarsi degli eventi di base e questo può condizionare il modo di condurre la procedura nel suo complesso:

- 1) definire completamente il sistema di analisi;
- 2) identificare l'evento indesiderato (TOP EVENT);
- 3) costruire il FT;
- 4) analizzarlo quantitativamente;
- 5) valutazione dei risultati numerici.

Vediamo in particolare i punti sopra elencati.

##### **1) DEFINIZIONE COMPLETA DEL SISTEMA**

Ai fini dell'applicazione dell'FTA quantitativa, l'insediamento produttivo può essere visto come una struttura consistente in un numero di componenti di base interconnessi, funzionanti in modo tale che una missione assegnata possa compiersi, date le condizioni iniziali ed i vincoli imposti.

Come già evidenziato precedentemente, la Fault Tree Analysis è un metodo deduttivo, il che comporta una grande abilità da parte dell'analista soprattutto in queste fasi di conoscenza e studio del sistema in esame (identificazione dei modi di guasto dei componenti/sottoinsiemi che sono inclusi nell'analisi; valutazione dell'applicabilità di errori umani; possesso di precise informazioni circa le funzioni svolte da ogni parte del dispositivo, le condizioni operative reali, il tipo di utilizzo; conoscenza esatta della manutenibilità del sistema...).

Per poter svolgere correttamente l'analisi quantitativa di un FT occorre:

- ricercare appropriati dati affidabilistici dei componenti identificati come Basic Event;
- identificare per ciascuno la corretta funzione di affidabilità per poter calcolare la probabilità di guasto;
- scegliere un valore per il tempo di riferimento dell'analisi (anno, mese) che evidenzierà il valore della probabilità di guasto di ciascun Basic Event e, conseguentemente secondo la formula di struttura, quella del Top Event

## **2) IDENTIFICAZIONE DELL'EVENTO INDESIDERATO - TOP EVENT**

La prima fase consiste nell'identificare i Top Event che si vogliono analizzare a livello di sistema. La FTA, oltre ad essere impiegata per la valutazione delle probabilità di guasto di componenti e sottosistemi di impianto, può essere impiegata per stimare la probabilità del verificarsi di un evento incidentale relativo agli impianti a "*rischio di incidenti rilevanti*" dove il Top Event comunemente ricade in una delle tre note tipologie previste per questo tipo di impianti: esplosioni, incendi o rilasci di sostanze pericolose. Per riuscire a sviluppare un FT esteso alle problematiche relative a tali fenomenologie, occorre sviluppare delle analisi preliminari per conoscere il comportamento "affidabilistico" dei sistemi, anche dotati di una certa complessità, che compongono l'insediamento produttivo. Gli eventi di guasto per un sistema possono essere molteplici e con obiettivi di studio diversi: problemi di sicurezza verso l'esterno, di integrità, di disponibilità oppure di efficienza o di miglioramento delle politiche di manutenzione e possono essere definiti a priori, in modo intuitivo o basandosi su risultati di altre analisi.

E' importante evidenziare che:

- per ogni T.E. si elabora un albero, quindi il numero di eventi deve essere contenuto;
- il singolo T.E. non va definito troppo genericamente perché si incorre in una lunga analisi, né troppo specificamente in quanto può condurre ad un'insufficiente visione del problema;

## **3) COSTRUZIONE DEL FT**

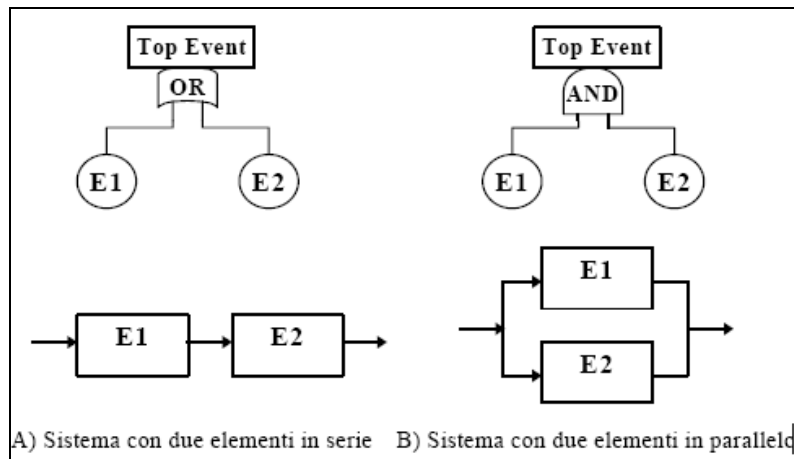
I sistemi possono essere rappresentati con diagrammi a blocchi. Un diagramma a blocchi consiste in un insieme di blocchi (rettangoli) che rappresentano i vari componenti del sistema considerato, collegati fra loro a seconda delle loro varie interconnessioni.

Nelle analisi quantitative, è spesso utile riferirsi alle rappresentazioni in blocchi funzionali corrispondenti alle principali interconnessioni utilizzate negli impianti: sistemi serie, parallelo, ridondanti, in logica 2oo3 (due su tre), in stand by, ecc...).

Per ognuna di queste rappresentazioni si possono ricavare le relative FORMULE DI STRUTTURA che consentono di risolvere in senso booleano le interconnessioni e renderle disponibili per la soluzione complessiva del FT.

A titolo esemplificativo, nella figura sottostante sono illustrati due diagrammi a blocchi (con rispettiva rappresentazione ad albero) relativi a due semplici sistemi formati ciascuno da due componenti operanti in serie ed in parallelo:

- il gate OR rappresenta una struttura in serie;
- il gate AND rappresenta una struttura parallela;



#### 4) ANALISI QUANTITATIVA DEL FT

Isolati ed identificati i Minimal Cut Set di un FT (in numero di N) si dimostra, applicando le regole dell'algebra di boole, che l'indicatore dello stato del Top Event ( $X_{TE}$ ) è funzione degli indicatori dello stato degli eventi di base che costituiscono i MCS, secondo la cosiddetta FORMULA DI STRUTTURA:

$$X_{TE} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - M_i)$$

$$M_i = (M.C.S.)_{i-esimo}$$

che equivale alla:

$$X_T = \sum_{i=1}^N M_i - \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N M_i M_j + \dots + (-1)^{N+1} \prod_{i=1}^N M_i$$

Costruito il FT, per ottenere i Minimal Cut Set si possono:

- utilizzare delle tecniche chiamate “*matrici logiche di sostituzioni successive dei gates*” ed estrarre i MCS dai CS attraverso tecniche di *ordinamento* dei CS (FT molto estesi);
- applicare le regole delle operazioni dell’algebra booleana (FT semplici o mediamente estesi).

I potenziali risultati quantitativi includono: una probabilità di accadimento di tipo numerico del Top Event, l’entità quantitativa degli elementi ed i minimal cut-sets, la valutazione della sensibilità e della probabilità relativa. L’importanza quantitativa identifica la percentuale del tempo in cui l’avaria del sistema si presenta a causa di un particolare minimal cut-set o di un particolare elemento. La valutazione della sensibilità e della probabilità relativa determina il possibile effetto di cambiamenti nella manutenzione, di modifiche del progetto e della realizzazione di componenti differenti. La valutazione della sensibilità solitamente include l’analisi degli errori necessari per stimare gli effetti dell’incertezza sulla valutazione dell’errore.

Nell’analisi quantitativa sono richiesti tre livelli principali:

- calcolo del *Component Failure Probability* level;
- calcolo del *Minimal Cut Set Failure Probability* level;
- calcolo del *Top Event Failure Probability* level.

Nella FTA, dovrebbero essere utilizzate delle fonti note per i Failure Rate Value; normalmente queste fonti sono selezionate a discrezione dell’analista, in funzione dell’obiettivo dell’analisi. Il numero dei Failure Modes (Modi di guasto) dipendono dal sistema studiato. Appare evidente che, nella FTA, risultano importanti solo quei Failure Modes (Modi di guasto) che possono essere osservati, nel sistema, come parte di un Top Event, mentre tutti gli altri possono non verificarsi quando si considera il Top Event specificato.

Le procedure per completare i tre livelli dell’analisi sono le seguenti:

#### Calcolo del Component Failure Probability

- a) determinare, per ogni evento base, il Component Failure Rate,  $\lambda_c(t)$ , selezionando la migliore distribuzione ottenibile su base storica o a partire da dati sperimentali di prove al guasto (distribuzione uniforme, weibull, ecc.);



- b) stimare, per ciascun componente, la Modal Probability of Failure,  $P_{cm}$  che rappresenta la porzione di evento, del più frequente Failure Mode, che si verifica per il componente nel dato Top Event;
- c) calcolare il Modal Failure Rate  $\lambda_m$ , per ciascun componente moltiplicando la Component Failure Rate  $\lambda_c$  per la probabilità del Modal Failure  $P_{cm}$ :

$$\lambda_m(t) = P_{cm} \cdot \lambda_c(t)$$

- d) calcolare, per ogni componente, la Component Failure Probability  $F(t^*)$  all'istante  $t^*$  pari al tempo di analisi, dal Modal Failure Rate assumendola pari alla cumulata al guasto per il componente in esame (funzione di inaffidabilità):

$$F(t^*) = 1 - e^{-\int_0^{t^*} \lambda_m(t) dt}$$

#### Calcolo del Minimal Cut-Set Failure Probability

Si calcola la probabilità di failure per ciascun MCS; dato che un questo può essere paragonato ad un'intersezione di eventi (AND), la probabilità di failure per un multi-element cut-set si definisce come il prodotto della probabilità di failure di ciascun elemento.

#### Calcolo del top event failure probability

Per determinare la probabilità del guasto relativo al Top Event (probabilità del verificarsi dell'incidente) si applica la FORMULA DI STRUTTURA, vista in precedenza, utilizzando la *minimal cut set failure probability*.

### 5) VALUTAZIONE DEI RISULTATI NUMERICI

Tutti quei componenti con un'alta probabilità di fallimento devono essere esaminati per operare le opportune correzioni. E' possibile comunque che siano disponibili degli altri componenti che svolgano la stessa possedendo con un valore di affidabilità superiore e questo fatto suggerirebbe di compiere la sostituzione del componente, oppure pensare ad una configurazione alternativa del sistema, come ad esempio l'introduzione di elementi ridondanti, produca un miglioramento dello stesso sistema e, quindi, una diminuzione della probabilità del verificarsi del Top Event.

Nel caso in cui il progetto del sistema non possa essere modificato e non sia possibile utilizzare componenti migliori, agli analisti è richiesto di stilare una scheda di revisione così da poter assicurare un'integrità funzionale basata su una periodica sostituzione dei componenti del sistema.

Una volta determinata la lista finale delle probabilità relative ai minimal cut-set failure, ciascun minimal cut-set cui è associata un'alta probabilità di accadimento, dovrebbe essere studiato in modo più approfondito e prevedere gli opportuni provvedimenti, come ad esempio: revisionare il progetto del sistema, considerare l'opportunità di svilupparne uno ridondante o preventivare una scheda che imponga delle revisioni periodiche.

In generale, le specifiche richieste, riguardanti i valori delle probabilità dei minimal cut-set, variano tra i diversi sistemi. Normalmente si richiede che il valore della affidabilità, in tutto l'arco di tempo specificato e per ogni componenti, non sia inferiore al 95%. Inoltre i cut-set costituiti da un solo elemento, dovrebbero essere esaminati in modo più approfondito così da poter stabilire se il progetto possa essere migliorato o comunque possa essere migliorato il valore della sua affidabilità.

Una volta concluse le modifiche, si esaminano le nuove liste dei componenti e dei minimal cut-set ed in particolare sono considerati gli elementi che sono stati riprogettati. Questo processo è iterato fin quando tutti i componenti e le probabilità di avaria dei minimal cut-set sono ricondotti a livelli accettabili.

### 3.4.4 ETA – EVENT TREE ANALYSIS

L'albero degli eventi è un mezzo diagrammatico per descrivere tutti i potenziali cammini nei quali un evento può svilupparsi attraverso un sistema o un impianto. Il suo utilizzo nell'analisi di rischio relativa agli insediamenti produttivi si rivolge a quegli eventi il cui sviluppo può evolvere in una situazione incidentale e per questo è forse la metodologia più appropriata per essere utilizzata nella valutazione di sicurezza di depositi di rifiuti radioattivi, come supporto di analisi probabilistica al processo più generale della definizione degli scenari (vd. Capitolo 4).

L'albero degli eventi è una procedura che trae origine da applicazioni in campo economico e finanziario, procedura che è poi stata utilizzata anche in campo industriale per evidenziare tutti i possibili scenari incidentali derivanti dall'evoluzione di un evento iniziatore, in rapporto all'intervento o meno di sistemi preposti alla protezione dell'impianto e dell'ambiente esterno.

Tale metodologia<sup>10</sup>, sviluppata per analizzare i sistemi complessi, racchiude conoscenze provenienti da differenti discipline scientifiche. Nella sua versione ormai consolidata fu introdotta, (insieme alla FTA) dal noto "Rapporto Rasmussen" (WASH-1400)<sup>11</sup>, per quantificare la probabilità d'accadimento di un evento indesiderato, partendo da un dato evento "base" (malfunzionamento di componenti, cause esterne ecc.), valutando la disponibilità dei sistemi che intervengono in seguito a detto evento. E' considerata una metodologia matura per questo tipo d'analisi, quindi affidabile; è, infatti, utilizzata non solo nell'analisi degli impianti nucleari, ma anche per processi e impianti chimici e per sistemi spaziali.

Una sequenza incidentale è costituita da un evento iniziatore, eventi intermedi (tra cui possono esserci nuove rotture, malfunzionamenti, mancati interventi dei sistemi di sicurezza, errori umani, o altri eventi dovuti a cause interne/esterne all'impianto), e diversi scenari possibili (eventi d'uscita o Final Event); questo tipo d'albero può quindi essere utilmente applicato per valutare l'efficienza e l'efficacia dei sistemi di sicurezza e delle procedure d'emergenza. Tale metodologia può essere applicata con successo a qualsiasi tipo d'impianto e in qualunque fase della vita dello stesso. Nel caso in cui sono disponibili i dati sulle probabilità dei singoli eventi che compongono la sequenza incidentale, l'albero degli eventi consente di quantificare la probabilità o la frequenza d'accadimento di ciascuna sequenza.

#### 3.4.4.1 Applicazione dell'ETA

Per applicare questa metodologia, caratterizzata da una logica induttiva, si parte dalla definizione dell'evento iniziatore per passare alla definizione ed identificazione di tutti i possibili sistemi di

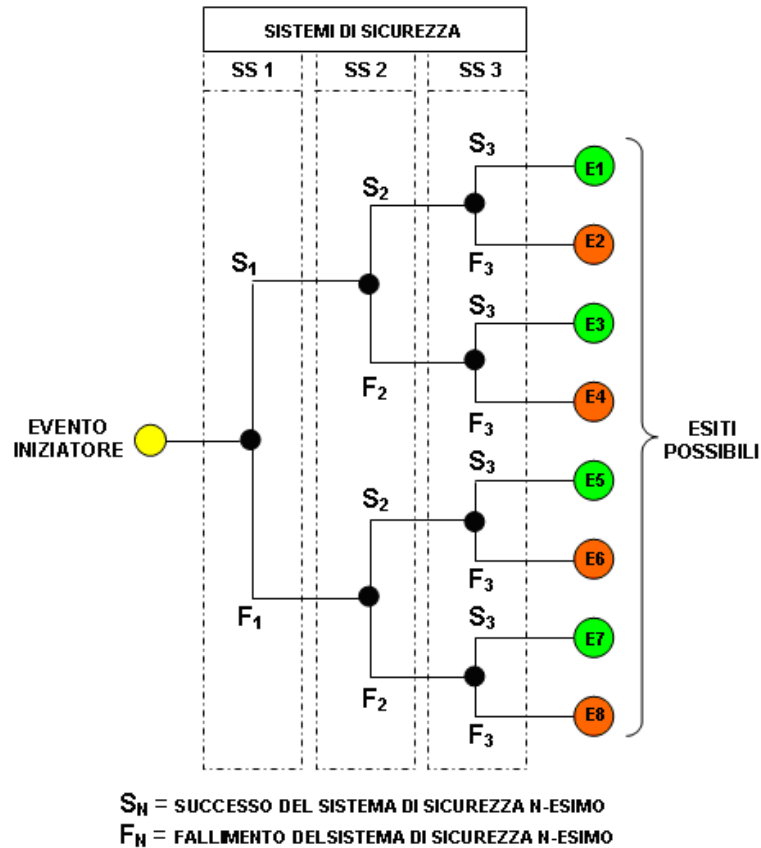
---

<sup>10</sup> N.J. McCormick, "Reliability and Risk Analysis", Academic Press, New York (1981), Nuclear Safety Analysis Center

<sup>11</sup> Us Nuclear Regulatory Commission, Reactor Safety Study, WASH-1400 (NUREG-75/014), Washington, DC (1975)

sicurezza che sono chiamati ad intervenire dal verificarsi dell'evento iniziatore considerato. Questi ultimi sono disposti in ordine d'intervento e per ognuno di questi sono definiti lo stato di successo e di fallimento; ogni sistema di sicurezza rappresenta quindi un nodo da cui parte una biforcazione.

Graficamente l'albero si presenta come mostrato nella figura 3.4



**Figura 3.4 – Struttura generale dell'Event Tree**

La generica *foglia* dell'albero rappresenta un possibile scenario, in corrispondenza di una particolare combinazione di eventualità. Le probabilità che caratterizzano ogni nodo sono condizionate, quindi devono essere definite in relazione alla situazione che si è definita nei nodi che precedono quello che si sta valutando. In fase di calcolo, la probabilità del singolo scenario sarà data dal semplice prodotto delle probabilità che si trovano sui rami che collegano la foglia con l'evento iniziatore. Più precisamente, l'analisi con questa metodologia si compone di 4 fasi, di seguito descritte.

### 3.4.4.2 Definizione degli eventi iniziatori

La definizione degli eventi può essere il risultato di una valutazione tecnologica basata su un'analisi di rischio effettuata in precedenza, su incidenti verificatisi o in ogni caso sull'esperienza e sulla sensibilità dell'analista. Le principali classi d'eventi iniziatori riguardano:

- rotture o guasti di componenti o di sistemi;
- errori umani;
- processi che non avvengono, o che possono dar luogo a effetti negativi;
- malfunzionamenti delle strutture;
- cause esterne.

La scelta degli eventi iniziatori corrisponde all'accettazione di un certo livello di rischio: si presuppone che l'incidente possa accadere, e si deve progettare il sistema affinché il rischio associato allo sviluppo di tale incidente resti sotto ad un certo valore. Nel caso in cui si ammette la possibilità di accadimento di diversi incidenti, si devono realizzare più alberi degli eventi.

#### **3.4.4.3 Le funzioni di sicurezza**

Le funzioni di sicurezza (sistemi, procedure, interventi degli operatori), esplicitate durante le sequenze incidentali, possono essere identificate come quei sistemi o procedure di protezione e mitigazione che sono chiamati ad intervenire nel caso si verifichi l'evento iniziatore, per il quale tali sistemi sono stati adottati. Queste, in genere, includono:

- sistemi di sicurezza;
- sistemi d'allarme;
- le azioni degli operatori, che devono essere attuate come risposta agli allarmi, richieste dalle procedure;
- sistemi di mitigazione.

Nella rappresentazione dell'albero, le funzioni di sicurezza sono indicate in base all'ordine temporale d'intervento. Nell'identificazione e valutazione delle funzioni di sicurezza coinvolte nelle sequenze incidentali, sono considerate di solito solo due possibilità, il successo o l'insuccesso. Nel caso in cui si considerano diversi modi di fallimento, si possono considerare più ramificazioni in uno stesso nodo (una per ogni stato della funzione di sicurezza considerata).

#### **3.4.4.4 Sviluppo dell'albero degli eventi ET**

Definiti gli eventi iniziatori considerati e tutti i sistemi e le funzioni di sicurezza successivamente coinvolte, si può sviluppare l'albero secondo la logica decisionale che lo caratterizza, per ottenere tutti i possibili scenari incidentali che possono avere luogo a seguito dell'accadimento degli eventi iniziatori considerati.

In particolare, la procedura prevede che si assuma che l'evento iniziatore si sia verificato, quindi l'analista deve decidere, nell'ordine adeguato per ogni funzione di sicurezza, se il successo o l'insuccesso di questa ultima può influenzare lo sviluppo incidentale. Nel caso in cui la funzione influenza lo sviluppo incidentale, nello schema viene riportato un punto di ramificazione, per distinguere tra il successo e l'insuccesso della funzione stessa; normalmente la parte che denota il successo si sviluppa verso l'alto, mentre quella relativa all'insuccesso verso il basso. Quando la funzione che si sta analizzando non ha influenza sullo sviluppo incidentale, si procede senza punti di ramificazione fino alla funzione di sicurezza successiva. Occorre ricordare che gli stati possibili del sistema in un determinato nodo dell'albero sono condizionati dai precedenti stati considerati, così come la probabilità associata a ciascuno stato sarà condizionata, dipendente quindi da quanto già accaduto (o supposto tale). Analisi di tipo FT sono utilizzate per calcolare tali probabilità condizionate.

In un ETA è fondamentale identificare la giusta sequenza di attivazione dei vari sistemi lungo la catena incidentale, nonché la loro dipendenza da altri dispositivi posti a monte della stessa catena.

Tipicamente gli eventi iniziatori possono essere organizzati in classi:

- rotture, guasti e malfunzionamenti di componenti/sistemi;
- errori umani;
- processi che avvengono in violazione delle aspettative di progetto;
- cause esterne.

Per *sistemi di sicurezza* si intendono:

- azionamenti automatici in risposta a situazioni anomale;
- allarmi diretti ad operatori/sistemi di emergenza;
- azionamenti manuali in risposta ad allarmi;
- sistemi di protezione e mitigazione.

È utile anche se non necessario suddividere i sistemi in categorie, quali ad esempio:

- meccanici;
- elettronici;
- elettrici;
- umani.

Ogni sistema può influenzare la sequenza incidentale ponendosi in uno stato attivo (funzione di sicurezza assoluta) o passivo, quindi l'albero degli eventi sarà di tipo binario. In linea teorica si potrebbero prevedere  $n$  gradi di funzionamento del sistema e corrispondenti a  $n$  rami figli. Con riferimento ai soli alberi binari, introducendo la probabilità di mancato funzionamento (F) della funzione di sicurezza la complementare probabilità di successo varrà ( $S=1-F$ ).

L'evento iniziatore viene posto all'estrema sinistra, quindi procedendo verso destra si dispongono tutti i sistemi ordinati secondo il criterio di attivazione.

Con riferimento alla Figura 3.4 che rappresenta un event tree binario *COMPLETAMENTE SVILUPPATO* dove sono mostrati gli scenari finali che tengono conto delle prestazioni (nel senso FUNZIONA/NON FUNZIONA) di 3 sistemi di sicurezza che sono chiamati ad intervenire (secondo sequenze e logiche previste in fase di progetto) a seguito del verificarsi dell'evento iniziatore.

Questa posizione comporta il riconoscimento di 8 possibili percorsi o rami, attraverso i quali può evolvere il transitorio incidentale fino ai rispettivi esiti finali. Gli eventi dove non si verificano condizioni incidentali sono E1,E3,E5 ed E7, mentre E2,E4,E6 ed E8 sono eventi incidentali. A ciascuno di questi percorsi è possibile associare una probabilità del suo verificarsi, pari alla funzione logica (AND) delle probabilità del verificarsi del SUCCESSO/FALLIMENTO dei sistemi di sicurezza stessi.

Occorre osservare che la colonna di destra [esiti o *consequence*] indica uno spettro di eventi terminali che possono realizzarsi in dipendenza delle combinazioni di successo/fallimento dei vari sistemi di sicurezza. In generale tra gli esiti si possono evidenziare differenze in termini di entità delle conseguenze, ma in alcuni casi gli esiti si possono dividere esclusivamente in due grandi categorie: INCIDENTE/ NO INCIDENTE.

Indipendentemente da questa precisazione, per il singolo esito la probabilità di accadimento [frequency] è sempre pari al prodotto delle probabilità associate a ciascun ramo (biforcazione) dell'albero che lo palesa. Per quanto riguarda il valore numerico di tali probabilità, si deve tener conto che il calcolo va sviluppato tenendo presente la CONDIZIONE DI DIPENDENZA di un evento (SUCCESSO/FALLIMENTO) dall'evento che lo precede logicamente. Una tale condizione si esprime dalla notazione (evento A | evento B) che comporta il calcolo della probabilità che si verifichi l'evento A condizionato dall'essersi verificato dell'evento B, come indicato nella figura seguente.

Per quanto riguarda lo sviluppo degli ET per l'analisi di rischio di incidenti rilevanti negli insediamenti produttivi, l'albero assume una forma tipica mostrata nella successiva figura dove i sistemi di sicurezza sono previsti funzionare come barriere successive costituenti una cosiddetta logica di difesa in profondità. Affinché si verifichi l'incidente devono fallire tutti i sistemi di sicurezza o, che è lo stesso, che è sufficiente il funzionamento di anche uno solo di questi per evitare il verificarsi dell'incidente. Nell'esempio riportato in figura si possono realizzare solo 4 esiti dove gli eventi NO INCIDENTE sono E1,E2 ed E3, mentre l'unico evento incidentale è E4.

### 3.4.4.5 L'analisi quantitativa dell'ET

Riferendosi alla struttura più generale di un FT binario completo, la probabilità del verificarsi dei suoi possibili esiti è pari a:

$$P(E1) = P(S1|(S2|S3)) \cdot P(S2|S1) \cdot P(S1)$$

$$P(E2) = P(F3|(S2|S3)) \cdot P(S2|S1) \cdot P(S1)$$

$$P(E3) = P(S3|(F2|S1)) \cdot P(F2|S1) \cdot P(S1)$$

$$P(E4) = P(F3|(F2|S1)) \cdot P(F2|S1) \cdot P(S1)$$

$$P(E5) = P(S3|(S2|S1)) \cdot P(S2|F1) \cdot P(F1)$$

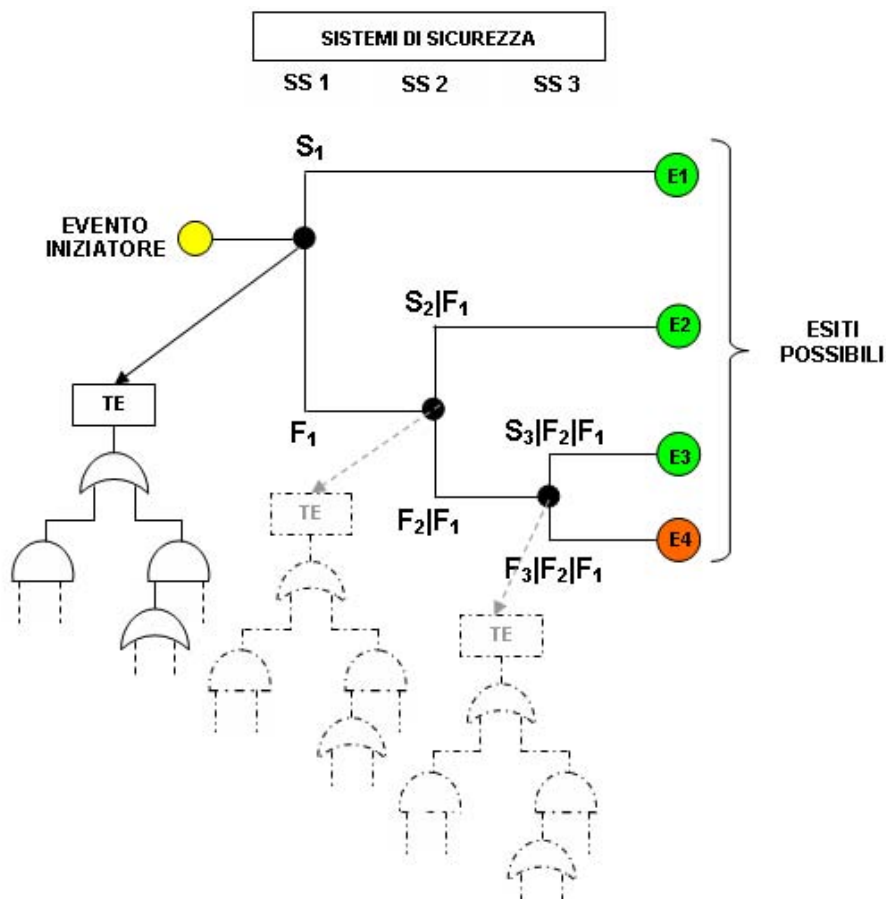
$$P(E6) = P(F3|(S2|S1)) \cdot P(S2|F1) \cdot P(F1)$$

$$P(E7) = P(S3|(F2|F1)) \cdot P(F2|F1) \cdot P(F1)$$

$$P(E8) = P(F3|(F2|F1)) \cdot P(F2|F1) \cdot P(F1)$$

$$\sum_1^8 P(E_i) = 1$$

In generale, per il calcolo delle singole probabilità si possono utilizzare i risultati di una FTA che prevede come TOP EVENT il NON FUNZIONAMENTO/GUASTO del relativo sistema di sicurezza dato gli insuccessi dei sistemi che lo precedono, così come mostrato nella figura che segue.





### 3.4.4.6 Analisi dei risultati delle sequenze incidentali

Per evidenziare le diverse sequenze si utilizzano delle lettere che distinguono l'evento iniziatore e i mancati interventi delle funzioni di sicurezza; in questo modo ogni sequenza sarà identificata da una serie di lettere diverse.

Generalmente una o più sequenze possono essere senza conseguenze per l'impianto, per i lavoratori e per la popolazione, e quindi permettono un ritorno al normale esercizio senza nuovi problemi. Altre possono avere delle conseguenze sull'impianto e richiedere quindi l'arresto dello stesso; altre ancora, quelle più importanti dal punto di vista della sicurezza, conducono a conseguenze più o meno gravi e per l'impianto e/o l'ambiente esterno, nonché per le persone (sono quelle che, in pratica, danno luogo ad un incidente vero e proprio, al Top Event). Questa situazione rimanda, in qualche modo, al concetto di

In genere si rende necessaria un'analisi quantitativa delle sequenze incidentali, per valutare la loro significatività. La quantificazione è svolta avendo a disposizione dei dati affidabilistici di tutte le funzioni di sicurezza. E' possibile a questo punto anche ridurre l'albero, eliminando tutte quelle sequenze che hanno una probabilità inferiore ad una soglia stabilita. Oltre a calcolare la probabilità d'accadimento di ogni scenario è opportuno identificare una variabile che quantifichi l'aspetto che si vuole studiare, nel nostro caso il tempo complessivo richiesto per l'esecuzione di un'attività.

Si vuole porre l'accento su come il risultato del rischio associato a ciascuno scenario individuato, sia il prodotto delle probabilità d'accadimento di ciascun ramo che porta allo scenario considerato: è quindi indipendente dall'ordine dei fattori che costituiscono detto prodotto<sup>12</sup>. Di fatto quindi, l'Event Tree così considerato, è indipendente dall'ordine (temporale) con cui si considera l'intervento delle singole funzioni di sicurezza, se non per quanto questo influenzi eventualmente il risultato dei Fault Tree utilizzati nel calcolo delle probabilità condizionate.

---

<sup>12</sup> Izquierdo, E. Melendez, " Relationship between probabilistic dynamics and event trees", Reliab. Engrg. Syst. Safety 52 (1996)

## **4. L'APPROCCIO IAEA PER UNA METODOLOGIA DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DI DEPOSITI SUPERFICIALI – IL PROGETTO ISAM**

### **4.1 INTRODUZIONE**

Lo smaltimento dei rifiuti radioattivi deve essere effettuato in modo da assicurare un livello accettabile di sicurezza dimostrando di rispettare i requisiti e i criteri stabiliti dalle norme di riferimento. Diverse tecniche di valutazione di sicurezza sono utilizzate per valutare la prestazioni di un impianto di smaltimento dei rifiuti e il suo impatto sull'ambiente e sulla salute dell'uomo.

Prima della metà del 1990, un notevole sforzo sia a livello nazionale che internazionale è stato profuso nello sviluppo e nell'applicazione di metodologie di valutazione di sicurezza per impianti di smaltimento dei rifiuti radioattivi per lo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alto livello (HLW) e di combustibile esaurito [4.1, 2]. Mentre alcuni singoli paesi erano impegnati nello sviluppo di analoghe metodologie formali per valutare la sicurezza di un deposito superficiale per rifiuti radioattivi a bassa e media attività (LILW), a livello internazionale non si era dato lo stesso impulso per questo tipo di depositi. Un primo tentativo di migliorare il grado di conoscenza della comunità scientifica internazionale ed gli approcci di valutazione della sicurezza per gli impianti di smaltimento in superficie si riscontra in ambito IAEA [4.3, 4] tra il 1990 ed il 1995. In particolare ci si concentrava sull'ottenimento di un maggiore grado di fiducia nella modellazione dei processi fisici connessi con la sicurezza dell'impianto di smaltimento attraverso un confronto tra gli approcci relativi a casi-test specifici.

Queste attività si sono dimostrate di grande utilità, in quanto hanno chiaramente individuato la necessità di miglioramenti da apportate al processo globale di valutazione della sicurezza, in particolare sulla metodologia da adottare e sui vari strumenti analitici necessari per applicare tale metodologia. Così, a partire dal 1998, è stato ha deciso di istituire un gruppo di lavoro internazionale, sotto egida IAEA, che avrebbe posto speciale l'accento sulla revisione e il miglioramento delle metodologie correnti e degli strumenti analitici da utilizzare a loro supporto per la valutazione della sicurezza post-chiusura di un deposito di smaltimento superficiale di rifiuti radioattivi. I risultati di questo progetto denominato “*Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities – ISAM – IAEA INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY 2004*” costituiscono, ad oggi, un costante riferimento per la definizione di una metodologia di valutazione che costituisca un valido supporto decisionale nella fase di selezione dei siti di destinazione dei sistemi di confinamento.

L'obiettivo di questa sezione è quello di fornire un quadro generale dei risultati di queste attività presentando in modo sintetico i punti essenziali della metodologia di valutazione della sicurezza e di soffermarsi in modo più approfondito sul tema dell'analisi degli scenari, punto essenziale di ogni

della metodologia di valutazione della sicurezza dei depositi di materiale radioattivo, indipendentemente dalla tipologia dell'impianto (temporaneo, superficiale o geologico)

## **4.2. IL CAMPO DI APPLICAZIONE**

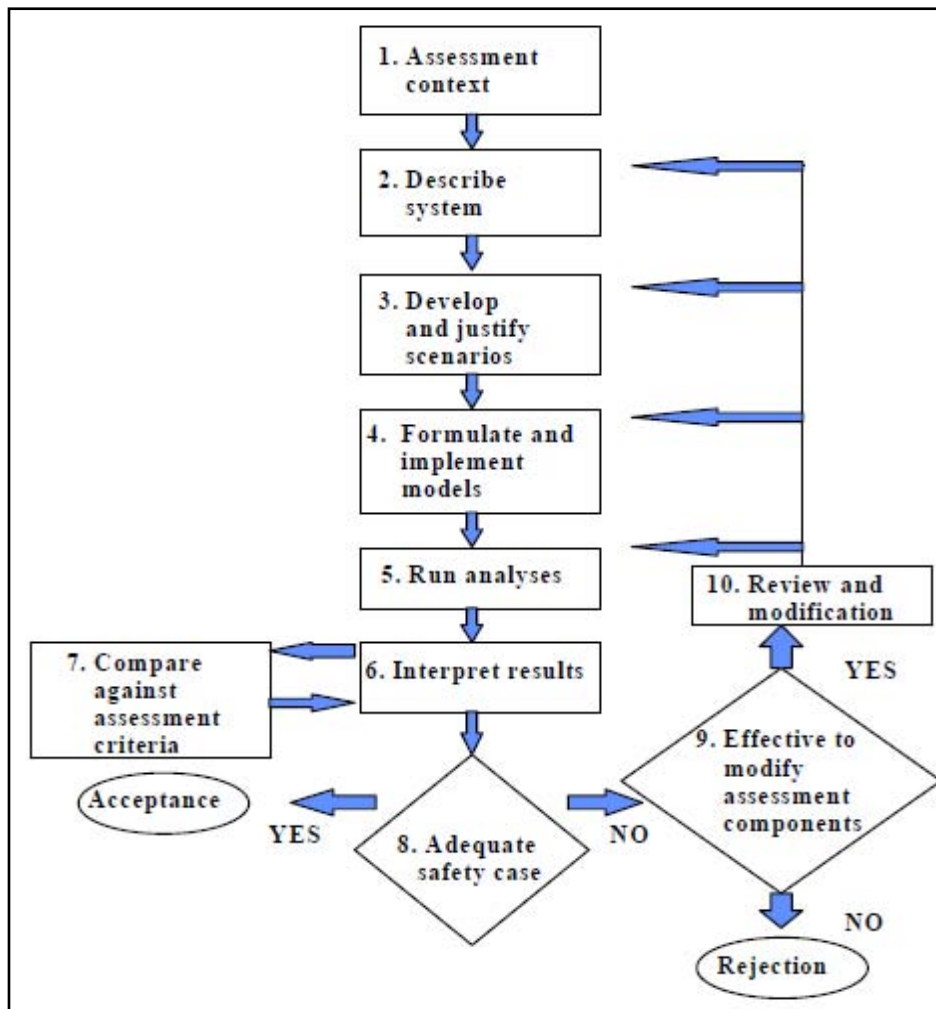
Nei rapporti di revisione e di valorizzazione degli aspetti metodologici per valutazione della sicurezza a lungo termine per impianti superficiali di smaltimento dei rifiuti radioattivi, effettuato nell'ambito del progetto ISAM [4.24], ci si riferisce alle tipologie di rifiuti di basso e medio livello che potrebbero essere generati nel ciclo di combustibile nucleare o derivanti dalla ricerca, industriale, medico, o da altre applicazioni di materiali radioattivi. Le attività non si sono riferite alla valutazione della sicurezza di deposito di smaltimento geologico in profondità per i rifiuti ad alto livello, sebbene molti aspetti della metodologia di valutazione sono simili. Né ha ritenuto di occuparsi di questioni relative alla sicurezza durante le fasi operative (costruzione e riempimento), sebbene vi sia spazio per l'applicazione della metodologia del progetto ISAM anche a tali questioni.

## **4.3. I PRINCIPALI TEMI PRESENTATI**

La relazione mette a fuoco informazioni sulla struttura del progetto ISAM e le principali attività intraprese durante la sua realizzazione. Vengono descritti i passaggi della metodologia di progetto ISAM e delle sue componenti principali che riguardano in modo esplicito la problematica degli scenari. Questi passaggi sono: la specificazione del contesto di valutazione; la descrizione del sistema di smaltimento; lo sviluppo e giustificazione di scenari, le liste dei FEPs mentre non ci si è soffermati sullo sviluppo di modelli concettuali e matematici, la loro implementazione in codici di calcolo, la relativa analisi dei risultati e la costruzione di fiducia. In conclusione sono stati presentati alcuni approcci metodologici, ritenuti tra i più significativi: lo sviluppo formale degli scenari generici, gli scenari dell'intrusione umana e la metodologia ipotizzata per la realizzazione di depositi su territorio italiano.

## **4.4. LA STRUTTURA DELLA METODOLOGIA**

I componenti chiave della metodologia di valutazione della sicurezza di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi sono (vd. figura 4.1):



**Figura 4.1 Il procedimento iterativo della metodologia ISAM**

- la specificazione del contesto di valutazione;
- la descrizione del sistema di smaltimento;
- lo sviluppo e la giustificazione di scenari;
- l'elaborazione e l'implementazione di modelli;
- l'analisi dei risultati e la costruzione della fiducia.

#### 4.4.1. La specificazione del contesto di valutazione

La valutazione della sicurezza post-chiusura di un impianto di smaltimento di rifiuti radioattivi, oltre a rispondere ad ineludibili esigenze etico-morali e ad ottemperare al rispetto di regole e norme, è generalmente intrapreso al fine di infondere la fiducia al governo, autorità di regolamentazione, grande pubblico e personale tecnico/scientifico che l'impianto è stato localizzato, costruito, controllato e gestito per garantire la sicurezza delle persone e la protezione dell'ambiente per tempi lunghi. Tuttavia, questo obiettivo generico non fornisce una descrizione molto precisa di ciò che deve essere considerato nella valutazione.

Il contesto della valutazione è destinato a fornire il successivo livello di descrizione e deve rispondere sostanzialmente a due domande:

- a) Che cosa è in corso di valutazione?
- b) Perché è in corso di valutazione?

In una valutazione quantitativa, queste domande diventano:

- a) Cosa viene calcolato?
- b) Perché viene calcolato?

Se le due questioni si riferiscono alla forma dei rifiuti e al loro confinamento in fusti nel deposito, le risposte saranno:

- (a) la liberazione dei radionuclidi dal deposito alla geosfera;
- (b) per fornire l'input per la valutazione nella geosfera.

Se le due questioni si riferiscono alla geosfera, le risposte saranno:

- (a) il rilascio di radionuclidi dalla geosfera alla biosfera
- (b) per fornire l'input per la valutazione nella biosfera.

Se le due questioni si riferiscono alla biosfera, le risposte non saranno così semplici ed immediate:

Per quanto riguarda ciò che deve essere calcolato, in generale non vi è accordo su quale tipo di rischio per la dose o calcolare: dose a chi? rischio di cosa? Per quanto riguarda il perché, a volte le intenzioni sarebbero "per fornire la valutazione della dose", in altri casi, l'obiettivo è di dimostrare che un livello di dose limite non sarà mai superata. Senza una opportuna guida di riferimento metodologico, l'esecutore della valutazione nella biosfera potrebbe giungere a conclusioni

incoerenti, sia nell'ambito del sistema complessivo della valutazione stessa che nel confronto con altre esperienze valutative. (vd. Capitolo 2)

Il contesto di valutazione ha lo scopo di fornire un quadro per l'esecuzione della valutazione della sicurezza, che consenta di superare questo tipo di difficoltà e che copra i seguenti aspetti fondamentali:

- scopo;
- quadro normativo;
- punto finale della valutazione;
- filosofia della valutazione;
- caratteristiche del sistema di smaltimento;
- scale dei tempi.

#### **4.4.1.1. Lo scopo della valutazione**

La maggior parte delle valutazioni di sicurezza degli impianti di smaltimento dei rifiuti radioattivi, hanno il principale obiettivo a dimostrare che un livello accettabile di protezione della salute umana e dell'ambiente sarà raggiunto, ora e in futuro. Oltre a questa dimostrazione di sicurezza globale non ci può essere una varietà di scopi aggiuntivi. Tuttavia, una valutazione può variare da un test sulle idee iniziali del concetto di smaltimento con semplici calcoli fino ad una dettagliata e specifica valutazione della sicurezza rispetto a rigidi criteri di regolamentazione.

Il pubblico al quale presentare i risultati della valutazione della sicurezza, deve essere ben definito in anticipo. L'obiettivo generale della valutazione e la natura del pubblico cui ci si rivolge (ad es, regolatori, operatori, produttori di rifiuti, enti pubblici locali, politici regionali e nazionali) avrà un ruolo chiave nella definizione del termine della valutazione, sulle ipotesi relative al sistema di smaltimento e sull'individuazione e giustificazione degli scenari.

#### **4.4.1.2 Il quadro normativo**

Nell'intraprendere una valutazione della sicurezza è fondamentale considerare i requisiti normativi che occorre rispettare. Ad un estremo questi requisiti possono essere di tipo *prescrittivo-quantitativi*, e dall'altro potrebbero essere prestazioni non prescritte od requisiti orientativi o anche non essere completamente sviluppate. Occorre osservare, di contro, che anche se i requisiti delle normative nazionali variano notevolmente, esiste per lo più, un collegamento alle raccomandazioni internazionali in materia di sicurezza della gestione dei rifiuti radioattivi [4.5, 6, 7, 8, 9].

#### **4.4.1.3. I punti finali della valutazione**

L'end-point di una valutazione di sicurezza deve corrispondere alle finalità previste e agli associati requisiti normativi e deve tener conto delle ipotesi su cui si basa la valutazione stessa, soprattutto in termini di *scala dei tempi* e *gruppi critici*. E' importante assicurare che i punti finali, come la dose e il rischio, siano adeguatamente definiti. Un'ulteriore considerazione è che la tendenza delle valutazioni più recenti è quella di non affidarsi ad un singolo punto finale, come la dose individuale o il rischio, ma a sviluppare linee di ragionamento tese a definire una molteplicità di punti finali. L'utilizzo di una più ampia gamma di argomenti e di punti finali, infatti, contribuisce con più forza a stabilire il giusto grado di adeguatezza alla valutazione. In questo senso, abbiamo visto nel Capitolo 2 come una varietà di indicatori supplementari possono essere utilizzati a complemento di quelli di dose e di rischio (flussi , concentrazioni di radionuclidi, ecc.).

#### **4.4.1.4. La filosofia della valutazione**

Diversi approcci possono essere applicati al calcolo del punto finale della valutazione. Non solo la natura del punto finale deve essere chiaramente definita, ma anche la natura dell'approccio utilizzato per calcolare l'end-point ha bisogno di essere chiaro. La filosofia della valutazione è proprio l'esposizione dell'approccio che sarà applicato per realizzarla.

In particolare, è necessario considerare:

- la natura della strategia generale utilizzata per la valutazione (ad es.: sistematica, iterativa);
- la natura delle ipotesi da adottate (ad es.: realistica, prudente);
- la disponibilità di dati da utilizzare nella valutazione (ad es.: generici, site-specific)
- l'approccio adottato per il trattamento delle fonti di incertezza (ad es. scenario, modello e dati).

#### **4.4.1.5. Le caratteristiche del sistema di smaltimento**

Il sistema di smaltimento può essere considerato composto dai seguenti tre elementi: il deposito ed il *near field* , la geosfera, e la biosfera. Questi componenti sono descritti in dettaglio successivamente. È utile prevedere una panoramica preliminare del sistema e documentare qualsiasi ipotesi rilevante ad esso associata. Tra queste ultime, le più importanti sono: una descrizione iniziale delle caratteristiche del sistema e le ipotesi riguardanti le future azioni umane ( livello di sviluppo tecnologico, tipo di società, base per le abitudini, caratteristiche delle abitudini, ecc..)

Allo stesso modo, devono essere definite le ipotesi sulle caratteristiche di ogni gruppo di persone, che potrebbero essere potenzialmente esposte a radionuclidi rilasciati dall'impianto di smaltimento.

#### 4.4.1.6. Le scale dei tempi

Lo smaltimento dei rifiuti radioattivi dovrebbe garantire una equa tutela delle attuali e future generazioni. I fattori legati al tempo che devono essere considerati in una valutazione della sicurezza comprendono:

- la durata del periodo operativo;
- la durata del periodo di controllo istituzionale (sia il periodo di controllo attivo e il periodo di controllo passivo);
- i cambiamenti indotti naturali e umani ambientali;
- il degrado del sistema artificiale;
- il tempo di dimezzamento dei radionuclidi rilevanti.

Deve essere indicato il termine per la valutazione della sicurezza post-chiusura, riconoscendo inerenti limitazioni e incertezze negli approcci valutativi, nonché i vincoli sull'attendibilità scientifica delle stime a lungo termine delle prestazioni del deposito, tenuto conto dalle dimensioni dei possibili futuri cambiamenti ambientali. Le scale dei tempi di interesse per una valutazione può essere funzione della natura del sistema di smaltimento dei rifiuti, delle influenze dei fattori esterni su di esso e della longevità dei radionuclidi nei rifiuti. Per questo motivo le scale temporali cui si riferisce una valutazione dovrebbero essere giustificate caso per caso, anche se possono essere imposti dai requisiti normativi.

#### 4.4.2. La descrizione del sistema di smaltimento

Il sistema di smaltimento può essere considerato composto dai seguenti componenti:

- il campo vicino: i rifiuti, l'area di smaltimento, le barriere ingegneristiche del deposito compresa la zona disturbata delle barriere naturali che circondano la struttura del deposito;
- la geosfera: rocce e materiali non consolidati che si trovano tra il campo vicino e la biosfera; esso può consistere sia nella zona insatura (al di sopra delle acque sotterranee) e la zona satura (al di sotto delle falde acquifere);
- la biosfera: il supporto fisico (atmosfera, suolo, sedimenti e acque superficiali) e gli organismi viventi (incluso l'uomo) che interagiscono con il supporto fisico.

La divisione tra queste componenti del sistema di smaltimento, in particolare tra geosfera e biosfera, è in qualche modo arbitrario per un deposito superficiale che si trova o pochi metri della superficie del suolo. Tuttavia, anche per questo tipo di soluzione di contenimento è comodo continuare a distinguere ancora le tre componenti. E' quindi importante fornire una chiara definizione di tali componenti e delle loro interfacce associate (come l'interfaccia geosfera/biosfera). Nello sviluppo



di modelli concettuali (vedi § 4.4.4), è particolarmente importante considerare come la natura e la posizione di queste interfacce potrebbe cambiare in funzione del tempo e in funzione del particolare meccanismo di rilascio dei radionuclidi dalla struttura di smaltimento.

La descrizione di un sistema di smaltimento deve contenere informazioni su:

- campo vicino
  - origine dei rifiuti;
  - natura, quantità e proprietà dei rifiuti;
  - inventario dei radionuclidi;
  - barriere ingegneristiche (imballaggi dei rifiuti, unità di stoccaggio, coperture) (vd. Appendice A4.1);
  - estensione e proprietà della zona disturbata;
  
- geosfera
  - geologia;
  - idrogeologia ;
  - geochimica;
  - condizioni tettoniche;
  - condizioni sismiche;
  
- biosfera
  - clima;
  - atmosfera;
  - bacini idrici;
  - attività umana;
  - biota;
  - litostratigrafia superficiale;
  - topografia;
  - localizzazione ed estensione geografica.

È importante garantire che i dati raccolti siano pertinenti al contesto della valutazione. Dato che la sicurezza a lungo termine di un impianto di smaltimento si basa essenzialmente sulle caratteristiche del sistema multi-barriera proposto (come la scelta di: un sito specifico di smaltimento, una particolare formazione geologica a determinate profondità, specifiche barriere artificiali e naturali), è particolarmente importante garantire che le caratteristiche salienti di tutto il sistema multi-barriera siano ben documentate sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

La descrizione del sistema di smaltimento deve essere effettuata in modo rispondente al contesto di valutazione (in particolare, con: obiettivo di valutazione, punto finale, filosofia e scala temporale) in modo da raccogliere i dati con l'opportuno grado di dettaglio.

Per eseguire una prima applicazione del metodo, l'accento potrebbe essere posto soprattutto sulla raccolta dei dati esistenti, piuttosto che sulla raccolta di nuovi dati. Per le applicazioni successive, l'enfasi potrebbe spostarsi verso la raccolta di nuovi dati.

Quando si descrive il sistema di smaltimento, è importante riconoscere che vi sono due importanti fonti di incertezza che devono essere prese in considerazione in modo da poter documentare anche il loro peso sui risultati della valutazione. In primo luogo, vi è l'incertezza associata alla caratterizzazione del sistema come è attualmente. In secondo luogo, vi è l'incertezza associata con l'evoluzione futura del sistema. Come già sottolineato in precedenza, il sistema può essere suscettibile di evolversi nel corso della scala dei tempi considerati nella valutazione. Tipicamente, la descrizione del sistema si riferisce al suo stato assunto a chiusura dell'impianto di smaltimento (origine temporale dei calcoli di impatto), mentre le ipotesi sulla sua evoluzione in seguito sono tipicamente affrontate nel quadro dello sviluppo degli scenari e del loro processo di giustificazione.

#### **4.4.3. Lo sviluppo e la giustificazione di scenari**

In una valutazione della sicurezza di un impianto di smaltimento rifiuti, è importante valutare le prestazioni del sistema di smaltimento nelle condizioni attuali e future, tenendo conto anche di eventi poco probabili. Ciò significa che molti fattori quali, ad esempio: modello concettuale, incertezze, lunghi periodi di tempo, comportamento umano, cambiamenti climatici, dovrebbero essere presi in considerazione e valutati in modo coerente, spesso in assenza di dati quantitativi.

Questa difficoltà è comunemente affrontata attraverso la formulazione e l'analisi di una serie di scenari.

Gli scenari sono descrizioni di alternative, internamente coerenti, di future evoluzioni e future condizioni del sistema di confinamento nel suo complesso, che permettono di gestire l'incertezza futura direttamente con la descrizione di diversi esiti alternativi, attraverso una miscela di analisi quantitative e giudizi qualitativi.

Il principale scopo del processo di generazione degli scenari, nella valutazione di sicurezza *post-closure* di depositi superficiali di rifiuti radioattivi, è quello di utilizzare il giudizio di esperti scientificamente ben informati come guida nello sviluppo della descrizione del sistema di confinamento e delle sue future condizioni. Gli scenari selezionati devono, tutti insieme, fornire un quadro adeguato e completo del sistema e i suoi possibili percorsi evolutivi sulla base del contesto

della valutazione e della descrizione del sistema. La scelta di appropriati scenari e dei relativi modelli concettuali è un processo molto importante e influenza fortemente le fasi successive dell'analisi di sicurezza del sistema di smaltimento dei rifiuti.

In alcuni paesi gli scenari sono indicati da parte del regolatore, anche se l'operatore può anche scegliere di considerarne di diversi. In altri paesi, l'operatore può selezionare gli scenari ed è tenuto a giustificare la selezione del regolatore.

Esistono diversi metodi che possono essere utilizzati per generare scenari, ognuno dei quali presenta un sufficiente livello di validità. Questi approcci comprendono metodologie quali: giudizio di esperti, albero dei guasti e albero degli eventi. È sempre più riconosciuto che le tecniche sistematiche sono particolarmente utili, in particolare perché essi sviluppano una procedura di controllo giustificata e documentata che rafforzano la trasparenza e la difendibilità della valutazione. Dovrebbe essere ricordato che nella maggior parte dei casi, le conclusioni raggiunte dalle diverse tecniche sono molto simili; dove il risultato è, o dovrebbe essere, la scelta di un ridotto insieme di scenari che comprenda la maggior parte delle possibilità in termini di impatto potenziale.

Un elemento comune in molti metodologie di generazione di scenari è la costruzione iniziale di un elenco di tutti i FEP (Features, Events and Processes – Caratteristiche, Eventi e Processi) che potrebbero direttamente o indirettamente, influenzare il sistema di smaltimento e la migrazione e il destino dei radionuclidi all'interno di esso. Questi FEP sono di solito identificate nella descrizione del sistema di smaltimento assegnando loro una importanza relativa ed il loro elenco dovrebbe essere generato e documentato in modo sistematico. Quando l'elenco è completo, l'importanza relativa di ogni FEP viene rivista, spesso utilizzando giudizio degli esperti. Questa classificazione per importanza consente di selezionare i FEP in quelli che possono essere esclusi e quelli che devono essere considerati ulteriormente nell'analisi di sicurezza. Spesso, la selezione di un FEP può essere supportata da calcoli specifici. Il FEP può, pertanto, essere escluso con criteri quantitativi o qualitativi, o con entrambi. La lista risultante di FEP viene utilizzata, insieme alla descrizione del sistema, per il processo di formulazione di scenari. L'insieme di scenari selezionato dipende, quindi, dallo scopo della valutazione e fornisce un quadro di evoluzione futura, delle criticità e della robustezza del sistema, tenendo conto del contesto della valutazione

#### **4.4.4. La formulazione e l'implementazione di modelli**

A seconda della natura dello scenario, si deve scegliere un approccio adeguato per la sua analisi. In alcuni scenari potrebbe essere opportuno utilizzare un metodo qualitativo; in particolare, quando i dati non sono, tutti o in parte, disponibili. Per gli scenari che devono essere quantitativamente valutati, dovrebbero essere organizzati in una forma che può essere rappresentata matematicamente. Per ciascuno di questi scenari, si rendono necessarie, una serie di ipotesi a livello di modello circa:

dimensionalità, condizioni al contorno, FEP, relazioni tra FEP. Questi presupposti costituiscono il così detto *modello concettuale* ed il rapporto tra modello e scenario è del tipo molti-a-uno, cioè: più di un modello concettuale può essere coerente con le informazioni disponibili per uno scenario.

Un modello concettuale deve comprendere un descrizione di:

- FEP del modello;
- relazioni tra i FEP;
- campo di applicazione del modello in termini spaziali e temporali (vale a dire il suo dominio).

Una descrizione del campo di applicazione del modello è necessaria per registrare i presupposti secondo quale è stato sviluppato e le situazioni alle quali si applica. Questo a sua volta è importante al fine di garantire l'idoneità al suo scopo e per evitare l'uso improprio del modello al di fuori del previsto dominio di applicabilità. Il modello concettuale costituirà la base del modello matematico che verrà utilizzato per descrivere il comportamento del sistema e stimare le sue prestazioni nel tempo. I modelli concettuali per ogni scenario sono espressi in forma matematica come un gruppo di equazioni algebriche ed equazioni differenziali con adeguate e sufficienti condizioni iniziali e al contorno che devono poi essere risolti. Queste equazioni possono essere basate su leggi fisiche o su risultati sperimentali, a seconda del livello di comprensione e di informazioni relative ai processi rappresentati.

Ancora una volta, più di una formulazione matematica potrebbe essere appropriata per il modello concettuale considerato. Queste equazioni ed i loro parametri associati costituiscono la base dei modelli matematici che derivano direttamente dal modello concettuale e la loro risoluzione è generalmente ottenuta con l'ausilio di tecniche numeriche e di strumenti informatici.

Al fine di consentire agli strumenti informatici l'esecuzione di calcoli risolutivi dei modelli matematici, devono essere specificati tutti i parametri di input dei modelli. I dati riguardanti i parametri del sistema di smaltimento (dimensioni del deposito, lunghezze dei percorsi per i flussi), i parametri di esposizione umana (ratei di consumo di alimenti, i tassi di occupazione), e i parametri dei radionuclidi (i coefficienti di distribuzione, fattori di trasferimento, coefficienti di dose) sono obbligatori.

Nello specificare i dati, occorre tenere in considerazione il trattamento delle incertezze associate con i valori di ciascun parametro che dovrebbero essere affrontati coerentemente con la filosofia della valutazione. Le incertezze possono sorgere a causa di una serie di fattori quali: la variabilità spaziale e temporale dei valori dei parametri, le incertezze nella misurazione e la derivazione dei valori. Se gli strumenti informatici sono in grado di utilizzare i parametri in modo probabilistico

(cioè con il campionamento dei parametri di ingresso), allora occorre specificare le distribuzioni di tali parametri.

Il livello di dettaglio a cui i modelli sono sviluppati e la qualità dei dati richiesti sarà funzione non solo del contesto di valutazione, ma anche della fase di iterazione del processo di valutazione. Per esempio, durante iterazioni iniziali (come la selezione dei siti o le indagini iniziali) potrebbe essere sufficiente generare modelli relativamente semplici, implementandoli usando strumenti informatici semplici, come fogli di calcolo e utilizzando dati costanti e facilmente disponibili. Successivamente, in fase di revisione dei risultati potrebbe essere adeguato migliorare alcuni modelli e raccogliere ulteriori dati per implementarli con codici informatici più sofisticati. I modelli e i dati per iterazioni successive, in particolare per il caso finale di sicurezza, potrebbero essere ancora più completa.

La fiducia può essere costruita a partire dalla capacità degli strumenti informatici di risolvere i modelli matematici correttamente e accuratamente attraverso l'uso di verifiche. La verifica è un processo dimostrativo del fatto che un modello matematico, o il codice corrispondente del computer, si comporta come previsto, vale a dire che riproduce una rappresentazione matematica corretta del modello concettuale e che le equazioni sono correttamente codificate e risolte. Ulteriore fiducia può essere costruita nel modello se possono essere riprodotti risultati sperimentali sul campo, con sufficiente precisione (processo di validazione), anche se le scale temporali su cui tale convalida è possibile sono evidentemente limitate.

Le incertezze associate con i modelli concettuali e matematici e con i valori dei parametri loro associati può essere valutata in vari modi. Ad esempio con l'utilizzo di strumenti informatici probabilistici che consentono la produzione di risultati in formato probabilistico (valori medi e relativi intervalli di confidenza) confrontati con strumenti di calcolo di tipo deterministico che ricercano la soluzione relativa a diversi modelli concettuali e matematici e/o valori dei parametri.

Nonostante l'importanza di sviluppare un adeguato controllo in ogni fase del processo di costruzione del modello, è particolarmente importante che le esperienze acquisite nell'applicazione del modello e nell'interpretazione dei suoi risultati dovrebbero essere utilizzati per rivisitare le ipotesi e le decisioni prese nel corso dello sviluppo del modello. È probabile che tali informazioni possano essere utilizzate per perfezionare il modello stesso, individuando FEP particolarmente importanti o parametri sensibili.

#### **4.4.5. L'analisi dei risultati e la costruzione della fiducia**

Una volta che gli scenari e i relativi modelli concettuali e matematici sono stati sviluppati e dopo aver eseguito i calcoli, si procede con la valutazione dell'impatto dell'impianto di smaltimento. I risultati ottenuti devono essere raccolti, analizzati e presentati. L'interpretazione dei risultati

rappresenta la prima opportunità per l'analista di esaminare quantitativamente i risultati della modellazione degli scenari. I risultati devono essere comparati con i criteri applicabili nel contesto della valutazione definito precedentemente. I risultati possono anche essere confrontati con i risultati di altre valutazioni per aiutare a costruire la fiducia, anche se occorre verificare con cura la compatibilità del confronto. L'interpretazione e l'analisi dei risultati deve tener conto dei diversi tipi di incertezze associate a tale valutazione della sicurezza di tipo puramente quantitativo, che possono derivare da tre fonti [4.10]:

- incertezza nell'evoluzione del sistema di smaltimento nel corso della scala dei tempi di interesse (incertezza di scenario);
- incertezza nei modelli concettuali, matematici e informatici utilizzati per simulare il comportamento e l'evoluzione del sistema di smaltimento (incapacità di modelli di rappresentare il sistema completamente, approssimazioni utilizzate per risolvere le equazioni del modello, errori di codifica e di approssimazione numerica),;
- incertezza nei dati e parametri utilizzati come input nella valutazione della sicurezza.

E' anche importante porre la dovuta cura e attenzione alla presentazione dei risultati. Diversi metodi possono essere utilizzati per la presentazione dei risultati, ciascuno dei quali è efficace per un particolare tipo di pubblico ed è di fondamentale importanza garantire che la forma di presentazione utilizzata sia la più appropriata per il pubblico a cui i risultati sono presentati.

Uno degli scopi principali delle valutazioni di sicurezza è quello di fornire un livello di fiducia a tutte le parti interessate che la scelta per il programma di smaltimento dei rifiuti è ragionevole e che la salute umana e l'ambiente siano protetti per lunghissimi periodi di tempo. Il rafforzamento della fiducia è coinvolto in tutti gli aspetti dello sviluppo di una valutazione di sicurezza. Nella sua forma più fondamentale, la fiducia implica la pratica di citazioni bibliografiche e l'utilizzo del ragionamento logico trasparente, con più linee di ragionamento, e dati di fatto che sostengano la valutazione della sicurezza. In questo senso l'applicazione di un programma di controllo della qualità può essere un buon modo di assicurare una corretta costruzione di fiducia. Considerazioni basate su evidenze scientifiche e sulla buona ingegneria pratica, nonché un'analisi di sensibilità sulle incertezze possono aggiungere un ulteriore livello di fiducia alla valutazione. Solo attraverso questo tipo di approccio, può essere dimostrata la robustezza complessiva del sistema di smaltimento-

Interpretazione, analisi e presentazione dei risultati sono seguiti dal processo decisionale. Questo processo è multiforme e variegato. Molto spesso, per giungere ad una decisione se il sistema e la valutazione sono adeguati, vi confluiscono diversi fattori a volte concorrenti. L'intero processo di valutazione è iterativo (vd. figura 4.1) e il primo passaggio di solito dovrebbe essere seguito da uno o più iterazioni a prescindere dall'ottenimento iniziale di risultati favorevoli. Le iterazioni successive spesso contribuiscono in modo decisivo alle decisioni di accettabilità della valutazione

di sicurezza, oppure consentono di operare ulteriori miglioramenti al progetto del deposito e del sistema di smaltimento attraverso cambiamenti di scenario, di modelli concettuali e /o di dati, ritenuti più rappresentativi delle evoluzioni possibili per il particolare sito di localizzazione selezionato.

## **4.5. LO SVILUPPO E LA GIUSTIFICAZIONE DI SCENARI**

### **4.5.1. Introduzione**

Come più volte affermato, gli obiettivi e la serie di principi concordati a livello internazionale sulle attività di gestione dei rifiuti radioattivi, perseguono lo scopo di salvaguardare la salute umana e l'ambiente, ora e in futuro, senza imporre inutili oneri a carico delle generazioni future [4.5]. Uno sforzo importante in una valutazione della sicurezza post-chiusura della impianti per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi è quindi quello di determinare quale sia, in futuro, l'effetto potenziale dello smaltimento sulle generazioni e sull'ambiente. Queste valutazioni devono anche considerare quali condizioni generali possano esistere in futuro, situazione che ovviamente non è nota con certezza.

A seconda delle caratteristiche dei rifiuti smaltiti, la valutazione di sicurezza post-chiusura di un deposito può arrivare a interessare periodi continuativi di impatto potenziale dell'ordine di 200-300 anni per i depositi superficiali e di molte migliaia di anni per quelli geologici profondi.

In entrambi i casi l'incompleta conoscenza di come il sistema di smaltimento si evolverà in futuro è una delle principali fonti di incertezza nella valutazione. Una delle difficoltà è che la valutazione deve essere spesso eseguita prima che il sistema di smaltimento venga costruito. La valutazione potrebbe quindi essere influenzata negativamente da fattori quali: potenziali differenze tra il progetto originario dell'impianto di smaltimento e l'impianto costruito, il calendario di messa in servizio previsto, la reale collocazione dei rifiuti e la loro configurazione o un cambiamento delle condizioni politiche e sociali. Fattori come questi possono, in una certa misura, essere controllati su una base normativa e la cui incidenza valutata attraverso un continuo uso *iterativo* della valutazione della sicurezza durante il ciclo di vita dell'impianto di smaltimento.

Ci sono altri fattori, tuttavia, come le abitudini e il comportamento delle persone nel futuro, così come eventi dirompenti naturali congeniti o indotti da processi umani, che non possono essere controllati con le stesse modalità, e che dovrebbero essere affrontati in modo esplicito nella valutazione. L'approccio comunemente utilizzato nella valutazione della sicurezza post-chiusura per affrontare queste incertezze nella futura evoluzione di un sistema di smaltimento è lo sviluppo e l'analisi di scenari (vd. § 4.4.3).

Lo scenario non cerca di prevedere il futuro, anzi, il suo obiettivo è quello di identificare le modifiche salienti, sulla base di analisi di tendenza, entro il quale vengono esplorate le variabili di indagine al fine di valutare l'importanza della particolari fonti di incertezza. Si tratta quindi di fornire significativi illustrazioni di future condizioni per assistere il processo decisionale [4.11].

Il processo di generazione degli scenari è importante per la valutazione della sicurezza per diverse ragioni:

- non si possono analizzare le prestazioni a lungo termine di un sistema di smaltimento dei residui radioattivi senza considerare le possibili condizioni future del sito;
- gli scenari influenzano lo sviluppo dei modelli concettuali e la raccolta dei dati;
- gli scenari forniscono un importante canale di comunicazione tra i progettisti e gli sviluppatori del deposito con gli organi regolatori, e altri soggetti interessati alla sicurezza del deposito;
- hanno fornito, negli ultimi anni, un contributo importante sul clima di fiducia per la valutazione della sicurezza post-chiusura e per questo motivo, sono diventati anche un punto focale delle verifiche dei revisori indipendenti della valutazione stessa.

Una strategia di generazione di scenari mira a produrre una serie completa di scenari più rilevanti relativi, per completezza, alle sole questioni pertinenti. Gli scenari selezionati devono fornire un adeguato e completo quadro degli aspetti chiave del sistema, dei loro possibili percorsi evolutivi e degli eventi critici e della robustezza del sistema.

In questo contesto, è estremamente importante predisporre un sistematico approccio di generazione di scenari e di documentare tutte le fasi della generazione dei scenari. Questo consente di analizzare una serie ragionevole di scenari, che possono essere utilizzati per garantire la fiducia che il sistema rimarrà sicuro in futuro. La necessità di tali approcci formali ha portato alla produzione di un numero considerevole di documenti sugli scenari nella letteratura scientifica sulla gestione dei rifiuti radioattivi. Inoltre, ha portato allo sviluppo di una quantità significativa di terminologia specialistica.

## **4.5.2 Terminologia**

### **4.5.2.1. Gli scenari**

Il termine *scenario* ha molti significati ed a causa del suo uso generalizzato non sempre è possibile determinarne quello preciso. In tabella 4.1 vengono riportate le principali definizioni di *scenario*,



che risultano molto utili nei processi di definizione della metodologia per la loro generazione nell'ambito delle valutazioni di sicurezza di depositi.

Trovare una definizione per lo scenario che sarà più adatto per *tutti gli* analisti impegnati in una valutazione della sicurezza *postclosure* di un deposito superficiale è difficile. Nella migliore delle ipotesi una definizione operativa di scenario dovrebbe essere data a condizione che sia coerente con i metodi di generazione dello scenario stesso. Per IAEA è stata giudicata più appropriata la definizione 6 di tabella 4.1 e, come tale, è stata adottata nell'ambito del progetto ISAM.

	DEFINIZIONE	FONTE e COMMENTI
1	<p>Gli scenari sono sequenze ipotetiche di eventi costruiti allo scopo di focalizzare l'attenzione su processi causali e punti decisionali.</p> <p>Rispondono due tipi di domande:</p> <p>(1) Come potrebbe avvenire qualche situazione ipotetica passo per passo?</p> <p>(2) Quali alternative esistono per ogni protagonista della situazione, ad ogni passo, di prevenire, modificare, o facilitare il processo?</p>	<p><i>Kahn e [Wiener 1967], "The Year 2000, A Framework for Speculation", Macmillan, New York.</i></p> <p>Herman Kahn è ampiamente considerato come il padre dell'analisi di scenario che ha sviluppato questo metodo di analisi dei sistemi nel 1950, inizialmente nel contesto di adozione di decisioni relative alle opzioni misure di difesa civile in risposta alla guerra termonucleare, e poi nel contesto di altre ricerche futurologiche.</p>
2	<p>Uno scenario è una situazione particolare, specificata da un unico valore per ogni variabile di ingresso. Esso definisce un unico punto della superficie di risposta. Uno scenario può essere descritto come un vettore di valori per gli ingressi, per esempio: <math>X = (x_1, x_2)</math>.</p>	<p><i>Morgan e [Henrion 1990], "Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis", Cambridge Univ. Press, Cambridge .</i></p> <p>Questa è una definizione statistica. Per molti anni, è stata la definizione adottata dalla AECL nel loro metodo di valutazione post-chiusura, vale a dire uno scenario è una simulazione singola o un "Run" del loro codice SYVAC.</p>
3	<p>Scenario - Un assunta serie di condizioni ed eventi utilizzati nelle fasi di pianificazione/progetto dell'impianto o in attività di regolamentazione.</p>	<p><i>IAEA [1993], "Radioactive Waste Management Glossary", International Atomic Energy Agency, Vienna.</i></p> <p>Facendo riferimento per l'utilizzo del termine in una serie di differenti contesti nell'ambito della gestione dei rifiuti nucleari.</p>
4	<p>Uno scenario specifica una serie possibile di eventi e processi fornendo una grossolana descrizione della loro sequenza e delle loro caratteristiche.</p>	<p><i>NEA [1992], "Systematic Approaches to Scenario Development", A report of the NEA. Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal, Nuclear Energy Agency of the Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.</i></p> <p>Definizione che gode di elevato grado di accettabilità a livello internazionale</p>
5	<p>C'è un universo di possibili futuri, che è l'insieme di tutti gli eventi possibili all'interno dei <math>10^4</math> anni di tempo regolamentato. Per l'analisi, questo universo è diviso in sottoinsiemi di eventi-scenari che sono definiti in modo da includere futuri eventi simili. Ogni scenario è definito da una combinazione di occorrenza e non occorrenza di tutti gli eventi e dei processi potenzialmente pericolosi.</p>	<p><i>US DOE [1996], "Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant", 40 CFR Part 191, Volume 1, United States Department of Energy, Carlsbad Area Office, Carlsbad, New Mexico.</i></p> <p>Questa definizione è sviluppata a partire dalla rappresentazione del rischio come un insieme di terne ordinate (Che cosa può succedere? Qual è la probabilità che succeda? Qual è la sua conseguenza?) sviluppato in [4.12], che è la base per la rappresentazione dei risultati per WIPP [14].</p>
6	<p>Uno scenario è una sequenza ipotetica di processi e di eventi, facenti parte di una serie precostruita al fine di illustrare la gamma di futuri comportamenti e stati di un sistema di confinamento, da utilizzare nelle valutazioni di un caso di sicurezza.</p>	<p><i>Chapman et al. [1994], "Devising scenarios for future repository evolution: a rigorous methodology" MRS Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management, Kyoto, Japan.</i></p> <p>Si basa sull'esperienza del SKI SITO-94 [4.13] che ha dato particolare attenzione allo sviluppo di scenari attraverso tecniche formali, ad esempio, uso di diagrammi di processo influenza (PID).</p>

**TABELLA 4.1. Definizioni di scenario**

#### 4.5.2.2. FEP - Caratteristiche, eventi e processi

Un elemento comune in molte metodologie di generazione di scenari è la costruzione iniziale di un elenco completo di quelli che sono conosciuti come caratteristiche, eventi e processi (FEP) che potrebbero direttamente o indirettamente, influenzare il sistema di smaltimento e la migrazione e il destino dei radionuclidi all'interno di esso. Questi FEP sono di solito identificati dalla fase di descrizione del sistema di smaltimento. I tentativi di definire autonomamente questi termini per lo sviluppo di un caso di sicurezza non sono state finora realizzate poiché, molto probabilmente, se una entità fisica è pensata come una caratteristica, un evento o un processo essa dipenderà dalla scala temporale e spaziale in cui viene osservata. Le definizioni di F, E e P [4.15], illustrano questo punto:

- *Caratteristica - una parte di primo piano o distintivo o caratteristica (del sistema di contenimento o del suo ambiente);*
- *Evento - un cambiamento qualitativo o quantitativo o un complesso di cambiamenti situati in una porzione limitata di spazio e tempo;*
- *Processo - un fenomeno caratterizzato da cambiamenti gradualmente che conducono verso un risultato particolare.*

Il termine FEP è stato originariamente proposto da esperti (Jim Campbell e Bob Cranwell) del Sandia National Laboratory negli Stati Uniti d'America, e fu in seguito adottato dal NEA. In [4.16] si afferma che: *"... analisi di sicurezza ... implica la considerazione di tutte le funzioni possibili, Eventi e Processi, FEP, che potrebbero, direttamente o indirettamente, influenzare il rilascio e il trasporto di radionuclidi dal deposito "*.

In linea di principio è possibile identificare le caratteristiche specifiche (la protezione ingegneristica, muri di cemento, ecc.), gli eventi (le precipitazioni, la collocazione dei rifiuti, i riempimenti, ecc.) e i processi (il cambiamento climatico, il flusso delle acque sotterranee, ecc.) per l'utilizzo di tali definizioni in una valutazione della sicurezza. Il problema risiede nel fatto che se si modificano le scale spaziali e temporali da cui questi FEP sono visti, allora un processo potrebbe diventare un evento, ad esempio, il flusso delle acque sotterranee. Di conseguenza, tutto ciò che risente da come il FEP è rappresentato nel modello utilizzato per valutare un caso di sicurezza. È quindi chiaro che definire, in modo specifico, una caratteristica, un evento o un processo potrebbe essere un elemento critico dello sviluppo di un caso di sicurezza *postclosure*.

Per aggirare questo problema, in Canada (AECL) hanno preferito utilizzare il termine "Fattore" [4.17] e "issue" [4.18], nelle loro analisi di sicurezza e negli sviluppi dello scenario. Questo approccio a più ampia prospettiva non è influenzato da definizioni temporali e spaziali delle caratteristiche, eventi e processi.

Il gruppo di lavoro NEA sul FEP Database [4.19] ha discusso sui termini “FEP” e “fattore” concludendo che: “Il termine *fattore* è preferibile a *FEP* per alcuni aspetti, perché coglie il più ampio significato di tutte le cose che dovrebbero essere considerate in una valutazione, anche fattori non fisici (ad esempio, contesto della valutazione). Il termine FEP, tuttavia, è così ben definito nella letteratura delle valutazioni di sicurezza che è stato deciso di utilizzare il termine FEP”.

In ambito IAEA e quindi ISAM, è stata proposta la seguente definizione per i FEP:

*Il FEP è una caratteristica, un evento, un processo o altro fattore, che può essere necessario prendere in considerazione in una valutazione di sicurezza di un deposito. Questo include le caratteristiche fisiche, gli eventi e i processi che potrebbero direttamente o indirettamente, influenzare il rilascio e il trasporto di radionuclidi dal deposito o successive esposizioni alle radiazioni per l'uomo, più altri fattori, come ad esempio requisiti normativi o problemi di modellazione, che delimitano o concentrano l'analisi.*

#### **4.5.2.3. Gli scenari di riferimento e gli scenari alternativi**

Nella maggior parte delle valutazioni, si sviluppa un unico scenario *di riferimento* per l'esame iniziale e alcuni scenari *alternativi* che sono sviluppati per studiare l'impatto sulla valutazione di scenari che differiscono in misura più o meno marcata dallo scenario di riferimento. Infatti, in alcuni casi, gli scenari alternativi possono essere visti come poco più che analisi di sensitività dello scenario di riferimento. Lo scenario di riferimento è spesso, ma non sempre, considerato lo scenario più probabile per la data di valutazione della sicurezza, ma di solito è considerato uno scenario di riferimento rispetto al quale l'impatto di scenari alternativi può essere confrontabile. Termini come *normale evoluzione, di progetto, caso di base, centrale* sono stati usati in una varietà di valutazioni al posto del termine *di riferimento*. Allo stesso modo termini come *evoluzione alterata* ed *evoluzione deteriorata* sono stati utilizzati al posto di *alternativo*. La questione fondamentale è garantire che tutti i termini che vengono utilizzati per descrivere i diversi tipi di scenario in valutazione siano definiti e la loro finalità chiaramente spiegate.

### **4.6. L'APPROCCIO ALLA GENERAZIONE DEGLI SCENARI NEL PROGETTO ISAM**

#### **4.6.1. Generalità**

La generazione di scenari come un metodo per affrontare le incertezze legati alla futura evoluzione del sistema di smaltimento è stato oggetto di numerosi studi. Tuttavia, prima del progetto ISAM, questi studi sono stati limitati ai sistemi di smaltimento geologico, mentre poco era stato fatto sugli impianti di smaltimento in prossimità della superficie [4.20]. Con l'introduzione del progetto ISAM,

questo trend è cambiato e hanno preso il via una serie di attività per la generazione di scenari con metodi formali relativamente a sistemi di smaltimento in superficie.

Un approccio alternativo agli approcci più formali per generare scenari, che spesso è stato utilizzato per i sistemi di smaltimento in superficie, sono gli scenari generici. In alcuni paesi, le autorità di regolamentazione hanno istituito gruppi di scenari generali e generici che servono come guida da considerare per la definizione dello scenario specifico riferito alla particolare tipologia di struttura. Per derivare scenari generali, due approcci possono essere identificati.

#### **4.6.2. Approccio sistematico per la generazione di scenario**

Un approccio sistematico per la generazione di scenari, aiuta a fornire la garanzia che tale valutazione abbia effettivamente affrontato tutti i FEP potenzialmente rilevante e tenuto conto dei modi in cui le combinazioni di questi FEP possono produrre risultati qualitativamente diversi. Inoltre, un approccio sistematico dovrebbe fornire l'impostazione per dimostrare come le incertezze legate alla evoluzione futura del sistema di smaltimento siano state affrontate e assimilate al caso di sicurezza.

Alcuni requisiti di base possono essere identificati per stabilire un approccio sistematico alla generazione di scenario. In particolare, l'approccio deve cercare di assicurare:

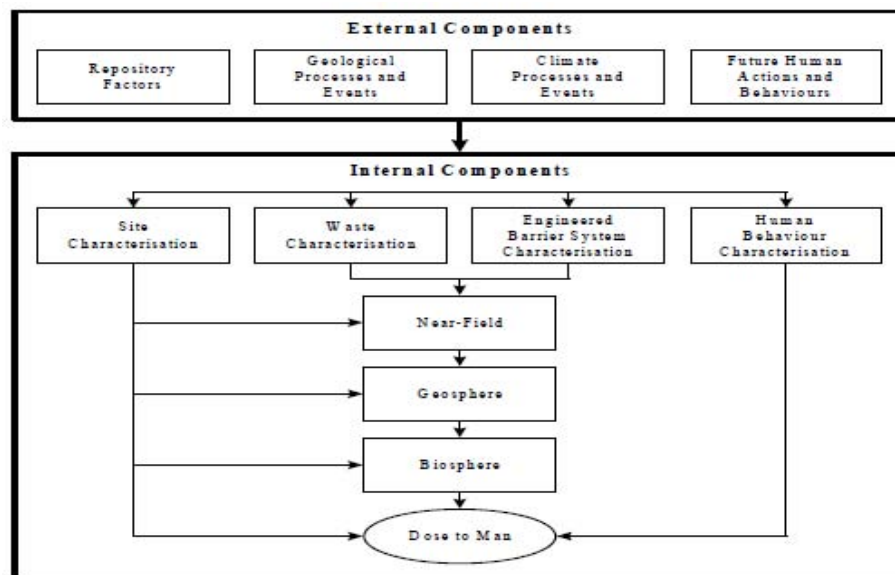
- trasparenza, compreso un piano per la documentazione e la gestione del giudizio di esperti;
- completezza, tutte le possibili FEP, che influenzano in maniera significativa il rilascio di radionuclidi, dovrebbero essere considerati;
- che rilevanti evoluzioni future vengano descritti;
- che le tematiche critiche siano prevedibili;
- che venga valutata la robustezza del sistema.

#### **4.6.3. La lista ISAM di FEP**

Un elenco FEP per gli impianti di smaltimento in prossimità della superficie è importante perché si tratta di una comune iniziale attività per l'approccio alla generazione degli scenari. La novità introdotta dal progetto ISAM è stata quella di modificare la banca dati internazionale NEA di funzioni, eventi e processi rilevanti per la sicurezza post-chiusura dei depositi geologici per rifiuti solidi radioattivi [4.19] e di procedere ad una sua revisione per renderla adatta alla generazione di scenari per depositi superficiali.

Poiché l'obiettivo generale di una valutazione della sicurezza è quello di determinare l'impatto dei rifiuti smaltiti avrà sugli individui e il loro ambiente in funzione del tempo, questo richiede di considerare come i radionuclidi possono essere rilasciati dal deposito, i percorsi lungo i quali possono migrare, e il loro impatto sulla salute umana. Per raggiungere questo obiettivo, si può sviluppare un sistema di processo. I componenti del sistema di processo possono essere convenientemente suddivisi in componenti interni ed esterni.

I componenti interni sono quei componenti che sono situati entro i confini spaziali e temporali del sistema di smaltimento, mentre i componenti esterni sono situati al di fuori di questi confini. La selezione del confine tra queste due classi di componenti è scelta dal valutatore, sulla base del livello di informazioni disponibili sui processi e sugli eventi importanti. Questi componenti possono spesso essere ulteriormente suddivisi in una numero di sottosistemi o parti, che sono interessati da vari FEP interni ed esterni, come presentato in figura 4.2.



**Figura 4.2 Distinzione tra componenti interni ed esterni nel sistema**

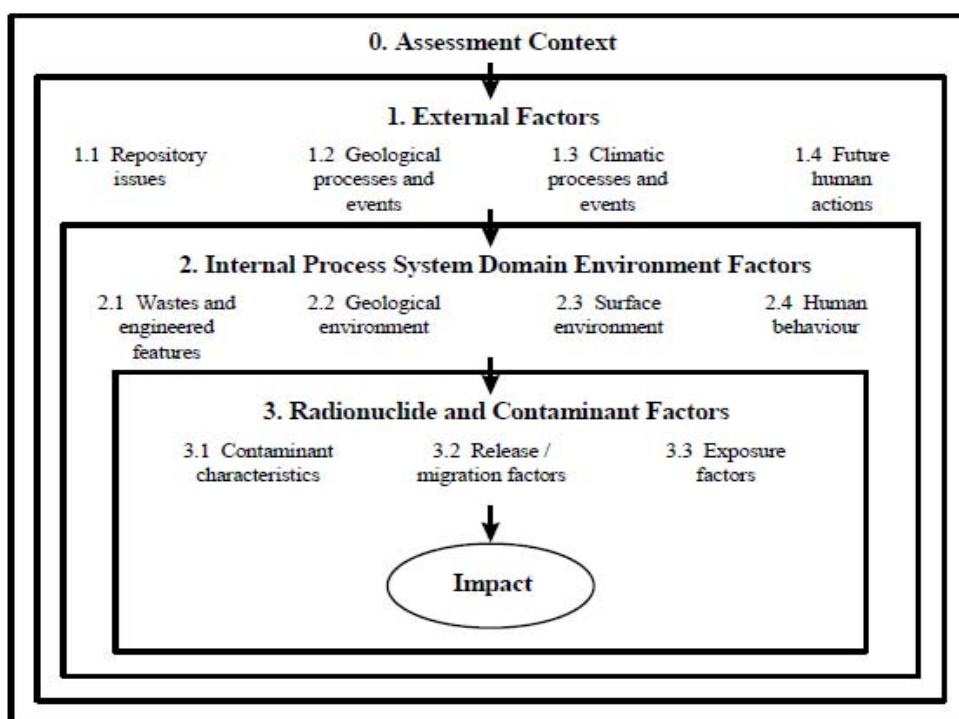
#### 4.6.3.1 Lo schema di classificazione della lista ISAM FEP

La figura 4.3 illustra lo schema di classificazione utilizzato nella lista ISAM FEP. Al centro, lo schema di classificazione include i processi relativi al rilascio di contaminanti, la migrazione e le esposizioni (Fattori di radionuclidi e contaminanti). E' anche necessario considerare le caratteristiche del sistema di smaltimento (rifiuti, barriere artificiali e naturali e del comportamento umano) ed eventi e processi, che possono causare evoluzioni future del sistema (fattori ambientali). Al di là di questo, ci sono processi e gli eventi provenienti al di fuori del sistema di smaltimento, ma che agiscono su di esso (fattori esterni). Questi fattori esterni (FEPs esterni) sono spesso considerati FEP di generazione di scenari (FGS). Modificando il loro status, diversi scenari possono essere generati. Per stabilire la portata di una valutazione, è necessario considerare non solo quei fattori

fisici che potrebbero essere rilevanti, ma anche gli orientamenti normativi e gli obiettivi della valutazione (ad esempio, periodi di regolamentazione e l'uso di gruppi critici come rappresentante delle future popolazioni umane a rischio). Quindi, è stato aggiunto un quarto livello, il contesto di valutazione.

Questi quattro livelli costituiscono la struttura della lista ISAM FEP (vd. figura 4.3)

- L0: Contesto della valutazione
- L1: Fattori esterni.
- L2: Dominio del Sistema di Smaltimento: fattori ambientali
- L3: Dominio del Sistema di Smaltimento: radionuclidi / fattori contaminanti;



**Figura 4.3 Schema di classificazione delle ISAM FEPs derivato da [4.19]**

Ciascun livello è suddiviso in categorie che sono descritte in modo esaustivo nel paragrafo seguente, è chiaro tuttavia che una FEP assegnata per una determinata categoria può avere conseguenze per FEP all'interno di altre categorie.

#### **4.6.3.2 Livelli e categorie dello schema di classificazione**

##### **Livello 0 : Contesto della valutazione**

I fattori del contesto di valutazione sono i fattori che l'analista prenderà in considerazione nel determinare la portata delle analisi, che possono comprendere fattori relativi ai requisiti normativi, la definizione di desiderato punto finale del calcolo o particolari esigenze in fase di valutazione. Le scelte a questo punto riguarderanno l'ambito fenomenologico di una particolare fase di valutazione,

vale a dire quali "FEP fisici" saranno inseriti. Per esempio, alcune classi di future azioni umane o eventi futuri estremi ed estranei al deposito possono essere esclusi.

I livelli 1, 2 e 3 sono identificati rispetto a una definizione di "Dominio del sistema di smaltimento". Il dominio è costituito dal sistema di smaltimento dei rifiuti, dagli ostacoli artificiali e, dalla geologia e dall'ambiente superficiale potenzialmente contaminabile, più la geologia ulteriore, il comportamento umano che sono generalmente considerati insieme ai primi al fine di stimare il movimento dei radionuclidi e l'esposizione per l'uomo, dopo la chiusura del deposito. Il dominio è quindi sia spaziale che temporale.

### **Livello 1: Fattori esterni**

I fattori esterni sono FEP con le cause o le origini al di fuori del dominio del sistema di smaltimento, cioè fattori naturali o umani di natura più globale e i loro effetti immediati. In questo livello sono incluse decisioni relative alla progettazione del deposito, il funzionamento e la chiusura in quanto questi sono al di fuori del limite temporale del dominio del sistema di smaltimento. In generale, i fattori esterni non sono influenzati, o solo debolmente influenzati da processi all'interno del dominio del sistema di smaltimento. Nello sviluppo di modelli del dominio del sistema di smaltimento, i fattori esterni sono spesso rappresentati come condizioni al contorno o come eventi iniziatori di processi all'interno del dominio del sistema di smaltimento. Le categorie utilizzate nel livello 1 sono le seguenti:

**1.1 Deposito** - le decisioni sulla progettazione e sulla allocazione dei rifiuti, e anche eventi collegati all'indagine del sito, le operazioni di costruzione e la chiusura;

**1.2 Processi geologici ed effetti** - processi derivanti dal più ampio contesto geologico e processi a lungo termine;

**1.3 Processi climatici ed effetti** - processi relativi al cambiamento climatico globale e conseguenti effetti regionali;

**1,4 Future azioni umane** - le azioni umane e le pratiche regionali nel periodo di post-chiusura, che potenzialmente possono influire sulle prestazioni delle barriere ingegneristiche e/o geologiche, come le azioni intrusive, ma non il comportamento passivo e le abitudini della popolazione locale (cfr 2.4);

In generale, ci sono poche significative interazioni dirette tra FEP nelle diverse categorie del livello 1.

### **Livello 2. Dominio del sistema di smaltimento: fattori ambientali**



I fattori ambientali nel dominio del sistema di sono le caratteristiche e i processi che si verificano nell'ambito del dominio spaziale e temporale il cui principale effetto è quello di determinare l'evoluzione delle condizioni fisiche, chimiche, biologiche e umane del dominio e che sono rilevanti per stimare il rilascio e la migrazione dei radionuclidi e la conseguente esposizione per l'uomo (cfr **Livello 3**). Le categorie utilizzate nel livello 2 sono le seguenti:

**2.1 Rifiuti e sistema ingegneristico** - caratteristiche e processi all'interno di questi componenti;

**2.2 Ambiente geologico** - caratteristiche e processi all'interno di questo ambiente, in particolare: caratteristiche e processi idrogeologici, geomeccanici e geochimiche, sia allo stato pre-deposito che post-closure e di altri cambiamenti a lungo termine;

**2.3 Ambiente superficiale** - caratteristiche e processi all'interno di questo ambiente, come: falde acquifere superficiali e sedimenti non consolidati, ma escluse le attività e comportamento umano (vedere **1.4** e **2.4**);

**2.4 Comportamento umano** - le abitudini e le caratteristiche individuale/i o della popolazione/i, ad esempio, gruppo critici per i quali vengono calcolate le esposizioni, escluse le attività che possono avere un impatto sulle prestazioni delle barriere ingegneristiche e/o geologiche (vedere **1.4**);

Le possibili interazioni tra FEP nelle varie categorie del livello 2 possono essere molto importanti.

### **Livello 3: Dominio del Sistema di Smaltimento: radionuclidi / fattori contaminanti**

I radionuclidi e i fattori contaminanti sono i processi che interessano direttamente il rilascio e la migrazione dei radionuclidi nell'ambiente dal deposito, o che influenzano direttamente la dose ai membri di un gruppo critico a partire dalle concentrazioni dei radionuclidi nelle matrici ambientali. Le categorie utilizzate nel livello 3 sono le seguenti:

**3.1 Caratteristiche del contaminante** - le caratteristiche di radio-chemio-tossicità e specie tossiche che potrebbero essere considerati in una valutazione della sicurezza post-chiusura;

**3.2 Fattori di rilascio/migrazione** - i processi che interessano direttamente il rilascio e/o la migrazione dei radionuclidi nel dominio del sistema di smaltimento;

**3.3 Fattori di esposizione** - i processi e le condizioni che influenzano direttamente la dose per i membri del gruppo critico, dato da concentrazioni di radionuclidi in matrici ambientali.

Si osserva, tuttavia, che i confini tra i diversi livelli e le categorie sono soggettivi e dipendono dai giudizi dei singoli analisti

#### ***4.6.3.3 Il progetto della lista ISAM FEP***

L'elenco ISAM FEP è un elenco di FEP rilevanti per la valutazione della sicurezza a lungo termine di un deposito superficiale di rifiuti radioattivi, che tenta di essere esauriente entro limiti ragionevoli. Consiste di 141 FEP il cui elenco è di seguito presentato in Tabella 4.2 sulla base dello schema di classificazione del § 4.6.3.2.

Nella tabella 4.2 ad ogni FEP è stato assegnato un numero identificativo con una sequenza di tre numeri (n1,n2,n3) che si riferisce alla sequenza logica (LIVELLO : CATEGORIA : NUMERO):

**TABELLA 4.2 – Elenco FEP ISAM secondo lo schema di classificazione adattato da [4.19]**

## **0 CONTESTO DELLA VALUTAZIONE**

- 0.01 Valutazione punto finale
- 0.02 Scale dei tempi di interesse
- 0.03 Dominio spaziale di interesse
- 0.04 Ipotesi sul deposito
- 0.05 Ipotesi su azioni umane future
- 0.06 Ipotesi su futuri comportamenti umani (gruppi target)
- 0.07 Ipotesi sulla risposta umana alle dosi da radiazioni
- 0.08 Scopo della valutazione
- 0.09 Requisiti normativi ed esclusioni
- 0.10 Modellazione e uso dei dati

## **1 FATTORI ESTERNI**

### **1.1 Deposito**

- 1.1.01 Sito di localizzazione
- 1.1.02 Progettazione del deposito
- 1.1.03 Costruzione del deposito
- 1.1.04 Posizionamento dei rifiuti nel deposito
- 1.1.05 Chiusura del deposito
- 1.1.06 Segnalazione del deposito
- 1.1.07 Riempimento del deposito
- 1.1.08 Il controllo di qualità
- 1.1.09 Calendario e pianificazione
- 1.1.10 Controllo amministrativo del sito
- 1.1.11 Monitoraggio del deposito
- 1.1.12 Incidenti ed eventi imprevisti
- 1.1.13 Recuperabilità dei rifiuti

### **1.2 Processi geologici e effetti**

- 1.2.01 Orogenesi e relativi processi tettonici ai confini di placche
- 1.2.02 Processi non orogenetici e tettonici (deformazione elastica, plastica e fragile)
- 1.2.03 Sismicità
- 1.2.04 Attività vulcanica e magmatica

**TABELLA 4.2 – Elenco FEP ISAM secondo lo schema di classificazione adattato da [4.19]**

- 1.2.05 Metamorfismo
- 1.2.06 Attività idrotermale
- 1.2.07 Erosione e sedimentazione
- 1.2.08 Formazione di rocce da sedimenti
- 1.2.09 Dissoluzione e diapirismo salina
- 1.2.10 Risposta idrologica/idrogeologica ai cambiamenti geologici

### **1.3 Processi climatici ed effetti**

- 1.3.01 Cambiamenti climatici, a livello mondiale
- 1.3.02 Cambiamento climatico, regionale e locale
- 1.3.03 Cambiamento del livello del mare
- 1.3.04 Effetti di glaciazioni estese
- 1.3.05 Effetti di locali formazioni glaciali
- 1.3.06 Effetti del clima caldo (tropicale e desertico)
- 1.3.07 Risposta idrologica/idrogeologica ai cambiamenti climatici
- 1.3.08 Risposta dell'ecosistema ai cambiamenti geologici
- 1.3.09 Risposte umane ai cambiamenti climatici
- 1.3.10 Altre variazioni geomorfologiche

### **1.4 Future azioni umane**

- 1.4.01 Influenza dell'uomo sul clima
- 1.4.02 Azioni involontarie/deliberate
- 1.4.03 Attività di perforazione (intrusione umana)
- 1.4.04 Miniere e altre attività sotterranee (intrusione umana)
- 1.4.05 Indagini intrusive del sito
- 1.4.06 Scavi in superficie
- 1.4.07 Inquinamento
- 1.4.08 Sviluppo del sito
- 1.4.09 Archeologia
- 1.4.10 Gestione delle risorse idriche (pozzi, serbatoi, dighe)
- 1.4.11 Sviluppo sociale e istituzionale
- 1.4.12 Sviluppo tecnologico
- 1.4.13 Misure preventive
- 1.4.14 Esplosioni e impatti

## **2 DOMINIO DEL SISTEMA DI SMALTIMENTO: FATTORI AMBIENTALI**

### **2.1 Sistema ingegneristico e rifiuti**

- 2.1.01 Inventario, di radionuclidi e altro materiale
- 2.1.02 Caratteristiche e processi di degrado dei materiali sotto forma di rifiuti
- 2.1.03 Caratteristiche e processi di degrado dei materiali di contenimento
- 2.1.04 Caratteristiche e processi di degrado dei materiali del modulo
- 2.1.05 Caratteristiche e processi di degrado dei materiali dei sistemi di barriere ingegneristiche (EBS)
- 2.1.06 Caratteristiche e processi di degrado di altri materiali del deposito
- 2.1.07 Condizioni e processi meccanici (rifiuti e EBS)
- 2.1.08 Condizioni e processi idraulici/idrogeologico (rifiuti e EBS)
- 2.1.09 Condizioni e processi chimici/geochimici (rifiuti e EBS)
- 2.1.10 Condizioni e processi biologici/biochimici (rifiuti e EBS)
- 2.1.11 Condizioni e processi termici (rifiuti e EBS)
- 2.1.12 Fonti di gas e gli effetti (in rifiuti e EBS)
- 2.1.13 Effetti delle radiazioni (in rifiuti e EBS)
- 2.1.14 Criticità nucleare
- 2.1.15 Materiali estranei

### **2.2 Ambiente geologico**

- 2.2.01 Litologia zona disturbata
- 2.2.02 Litologia
- 2.2.03 Altre unità litologiche
- 2.2.04 Discontinuità, su vasta scala (in geosfera)
- 2.2.05 Caratteristiche dei percorsi di trasporto dei contaminanti (in geosfera)
- 2.1.06 Condizioni e processi meccanici (in geosfera)
- 2.1.07 Condizioni e processi idraulici/idrogeologici (in geosfera)
- 2.1.08 Condizioni e processi chimici/geochimici (in geosfera)
- 2.1.09 Condizioni e processi biologici/biochimici (in geosfera)
- 2.1.10 Condizioni e processi termici (in geosfera)
- 2.2.11 Fonti di gas e gli effetti (in geosfera)
- 2.2.12 Caratteristiche non rilevate (in geosfera)
- 2.2.13 Risorse geologiche

### **2.3 Ambiente superficiale**

**TABELLA 4.2 – Elenco FEP ISAM secondo lo schema di classificazione adattato da [4.19]**

- 2.3.01 Topografia e morfologia
- 2.3.02 Suolo e dei sedimenti
- 2.3.03 Sistemi acquiferi in prossimità della superficie
- 2.3.04 Laghi, fiumi, torrenti e sorgenti
- 2.3.05 Caratteristiche costiere
- 2.3.06 Caratteristiche marine
- 2.3.07 Atmosfera
- 2.3.08 Vegetazione
- 2.3.09 Fauna
- 2.3.10 Meteorologia
- 2.3.11 Regime idrologico e bilancio idrico (vicino alla superficie)
- 2.3.12 Erosione e deposizione
- 2.3.13 Sistemi ecologici / biologici / microbici
- 2.3.14 Intrusioni animali e vegetali

## **2.4 Comportamento umano**

- 2.4.01 Caratteristiche umane (fisiologia, metabolismo)
- 2.4.02 Variazioni delle caratteristiche fisiologiche con l'età (anziani, adulti, bambini, neonati)
- 2.4.03 La dieta e l'assunzione di liquidi
- 2.4.04 Abitudini (comportamento non correlato alla dieta)
- 2.4.05 Gruppi critici
- 2.4.06 Preparazione del cibo e trattamento delle acque
- 2.4.07 Abitazioni
- 2.4.08 Utilizzo delle acque e delle aree naturali e selvagge
- 2.4.09 Utilizzo delle acque e del territorio rurale e agricolo (inclusa la pesca)
- 2.4.10 Utilizzo delle acque e delle aree urbane ed industriali
- 2.4.11 Utilizzo dell'ambiente nel tempo libero

## **3. DOMINIO DEL SIST. DI SMALTIM. : RADIONUCLIDI / FATTORI CONTAMINANTI**

### **3.1 Caratteristiche dei contaminanti**

- 3.1.01 Decadimento radioattivo
- 3.1.02 Stabilità chimica delle specie tossiche
- 3.1.03 Caratteristiche dei solidi/soluti inorganici
- 3.1.04 Specie volatili e potenziale di volatilità

## **TABELLA 4.2 – Elenco FEP ISAM secondo lo schema di classificazione adattato da [4.19]**

- 3.1.05 Caratteristiche di specie radiotossiche organiche o che possono formare composti organici
- 3.1.06 Gas nobili

### **3.2 Fattori di rilascio/migrazione**

- 3.2.01 Dissoluzione, precipitazione e cristallizzazione dei contaminanti
- 3.2.02 Solubilità dei contaminanti
- 3.2.03 Capacità di adsorbimento/deadsorbimento dei contaminanti in fase solida
- 3.2.04 Interazione e trasporto dei contaminanti in fase colloidale
- 3.2.05 Effetti e trasporto dei contaminanti con agenti chimici
- 3.2.06 Processi microbici/ biologici che influenzano i contaminanti
- 3.2.07 Trasporto di contaminanti tramite acqua
- 3.2.08 Trasporto di contaminanti in mezzo solido
- 3.2.09 Trasporto di contaminanti in mezzo gassoso
- 3.2.10 Trasporto atmosferico di contaminanti
- 3.2.11 Trasporto di contaminanti mediato da animali, vegetali e microorganismi
- 3.2.12 Trasporto di contaminanti mediato da azioni umane
- 3.2.13 Contaminazione di catene alimentari

### **3.3 Fattori di esposizione**

- 3.3.01 Concentrazioni di contaminanti in acqua potabile, derrate alimentari e farmaci
- 3.3.02 Concentrazioni di contaminanti nei comparti ambientali
- 3.3.03 Concentrazioni di contaminanti nei prodotti non alimentari
- 3.3.04 Modalità di esposizione
- 3.3.05 Dosimetria
- 3.3.06 Tossicità radiologica / effetti
- 3.3.07 Tossicità non-radiologica / effetti
- 3.3.08 Esposizione al radon

In Appendice 2 del presente rapporto viene riportata una descrizione ancora più dettagliata dell'elenco delle FEPs ISAM, che può rendere meno complesso il processo di modellazione e di identificazione delle correlazioni funzionali tra diverse FEPs.

#### 4.7 LINEE GUIDA DELL'APPROCCIO METODOLOGICO SECONDO ISAM

L'approccio metodologico presentato in questo paragrafo fa riferimento ad un deposito ancora in fase di progettazione. I passi principali della procedura sono:

- a) Effettuare un primo screening della lista ISAM FEP, sulla base del contesto di valutazione e della descrizione del sistema. Registrare la motivazione per l'esclusione di eventuali FEP.
- b) Individuare un numero limitato di scenari rappresentativi piuttosto che definire esaustivamente ogni possibile scenario.
- c) Concentrarsi inizialmente su uno scenario di riferimento definito *scenario di progetto*, che rappresenta come il sistema potrebbe essere suscettibile di evolversi se tutte le ipotesi di progettazione, si svolgessero come previsto. Questo approccio è stato adottato in quanto l'impianto è ancora in fase di progettazione, ma se lo *scenario di progetto* non dovesse dare risultati accettabili, è improbabile che lo sviluppo dell'impianto di smaltimento procederebbe secondo l'attuale progetto. In questo senso è importante riconoscere la differenza tra lo *scenario di progetto* (come il sistema si evolverà assumendo che tutto vada secondo i piani) e uno *scenario normale* o *scenario centrale* (come il sistema è più probabile che si evolva).
- d) Decidere lo stato dei FGS (FEP che generano scenari) esterni, per lo *scenario di progetto*.
- e) Identificare le caratteristiche rilevanti per la sicurezza e le relative funzioni di sicurezza per lo *scenario di progetto*.
- f) Sviluppare una descrizione dello *scenario di progetto*. Questo include le stime della durata prevista delle prestazioni e delle caratteristiche considerate rilevanti per la sicurezza e le loro funzioni di sicurezza.
- g) Identificare gli *scenari alternativi* ad alto livello attraverso una rassegna delle ISAM FEPs, contrandosi in particolare sui FEP esterni, e selezionare quali *scenari alternativi* dovrebbero essere valutati nel dettaglio.
- h) Decidere lo stato dei FEP esterni per tutti gli *scenari alternativi* da valutare.
- i) Identificare le funzioni rilevanti per la sicurezza e le relative funzioni di sicurezza per tutti gli *scenari alternativi* da valutare.
- j) Sviluppare una descrizione per tutti gli *scenari alternativi*. Questo include le stime della durata prevista delle prestazioni e delle caratteristiche considerate rilevanti per la sicurezza e le loro funzioni di sicurezza.
- k) Analisi dei FEP dello *scenario di progetto* e loro delle possibili interazioni per consentire lo sviluppo degli associati modelli concettuali.
- l) Analisi dei FEP degli *scenari alternativi* e delle loro possibili interazioni per consentire lo sviluppo degli associati modelli concettuali.



#### 4.8 LO SVILUPPO FORMALE DI SCENARI GENERICI – LE COMBINAZIONI DEGLI STATI

Per le valutazioni di sicurezza di un deposito superficiale, alcuni paesi hanno sviluppato delle descrizioni generiche di scenari che possono essere applicate in base alle impostazioni specifiche, ai tipi di deposito e al tipo di rifiuti e di condizionamento. I criteri che possono essere seguiti per raggruppare gli scenari da utilizzare per la valutazione sono:

Status: progettazione, funzionamento;

Ubicazione: zone costiere, zone interne, pianura, altipiani;

Clima: temperato, arido, secco, tropicale;

Tempistica: a breve termine (meno di 1000 anni), a lungo termine (più di 1000 anni);

Progetto: a trincea, a volta, in pozzo, in tunnel;

Rifiuti: LLW, ILW, a vita breve, a vita lunga, sciolto, confezionato;

Riempimento: copertura del terreno, contenitori in cemento, contenimento in acciaio;

Sulla base di ipotesi semplificate di deposito superficiale si possono generare una serie di scenari pertinenti, come riassunto nella tabella 4.3.

CLASSE DI SCENARIO	SCENARIO		
<i>Scenario di progetto.</i>  (Qualora i processi di degradazione avvengano secondo quanto previsto in fase di progetto)	Percorsi dei gas e delle acque sotterranee	da	erosione di scogliera; infiltrazioni d'acqua, lisciviazione, avvezione, diffusione, migrazione; scarico superficiale, in fiume, su scogliere tutti con un potenziale di ritorno in mare; ingestione di acqua, assunzione di cibo.
<i>Scenario alterato da intrusione</i>  (insorgere di venti non intenzionali causati dagli esseri umani, animali, flora che causano una accelerazione dei processi di degradazione e di migrazione di radionuclidi rispetto a quanto previsto in fase di progetto)	Rottura del deposito	da	occupazione del sito (residenziale, agriturismo, agricoltura); sviluppo costruzioni (edifici, strade, trivellazione di pozzi).
<i>Scenari isolati</i>	incendio, incidente aereo, tsunami, inondazioni, eventi sismico, cambiamenti climatici, cambiamento delle catene alimentari, vento estremo, glaciazione.		

**Tabella 4.3**

Di seguito viene descritto un esempio di approccio formale allo sviluppo di una serie di scenari generici utilizzato per la derivazione di criteri di accettazione quantitativi post-chiusura per un deposito superficiale di rifiuti radioattivi e basato sul criterio della *combinazione degli stati*. Questo approccio, si basa sui seguenti punti:

- Definire gli elementi principali da considerare nella valutazione: i componenti del deposito e l'accesso umano al sito;
- Definire gli stati di componenti del sistema di smaltimento: le barriere e i comportamenti umani;

- Costruire le combinazioni degli stati;
- Verificare gli scenari generati e raggrupparli in categorie principali.

La prima componente del sistema di smaltimento è data dai rifiuti.

Essi possono essere miscelati con una matrice o non, chiusi dentro contenitori o non.

I loro possibili stati sono indicati come:

- Struttura di contenimento inalterata: solo una determinata quantità minima di acqua può filtrare attraverso il contenimento e interagire con i rifiuti;
- Struttura di contenimento in parte degradata a causa di: agenti atmosferici, invecchiamento o difetti, una quantità sempre maggiore sostanziale di acqua può filtrare attraverso il contenimento e interagire con i rifiuti;
- Struttura di contenimento totalmente degradata o perdita totale della struttura di contenimento: la forma dei rifiuti non è un fattore limitante del flusso idrico e del fenomeno di lisciviazione di radioattività

La seconda componente del sistema di smaltimento è costituita dalle caratteristiche della struttura di ingegneria del deposito (la copertura in particolare).

Lo stato della copertura che pregiudica la portata d'acqua in ingresso e la possibilità di intrusione, potrà essere:

- Copertura inalterata: bassa portata di acqua in ingresso;
- Copertura in parte degradata: la portata di acqua tende ad aumentare con il tempo;
- Copertura totalmente degradata o assente: assenza di ostacoli al flusso di acqua in ingresso.

Le caratteristiche della geosfera (zona satura ed insatura) e della biosfera sono considerate ampiamente determinate e tempo invariante.

La componente del comportamento umano è correlato solo al controllo umano del sito (barriera sociale). I suoi tre stati principali sono:

- L'esistenza di un periodo di controllo istituzionale dove si previene qualsiasi intrusione sul sito e si garantisce la manutenzione del deposito;
- L'esistenza di una fase (terminale) di controllo istituzionale dove una limitata possibilità di accesso, ma senza intrusione nel sistema, può essere concessa da uno scadimento delle prestazioni del controllo istituzionale (sorveglianza ambientale e monitoraggio limitati) che evitano soggiorno e costruzioni, ma non pesanti intrusioni casuali;

- Dopo il periodo di controllo istituzionale dove il sito è rilasciato al pubblico dominio, comportando la possibilità di accesso senza restrizioni.

Dopo aver definito gli elementi principali di valutazione con i loro diversi stati, è possibile combinarli, in modo da ottenere i  $3 \times 3 \times 3 = 27$  combinazioni (vd Figura 4.4).

#### 4.8.1 Lista degli scenari generici

Al fine di comprendere correttamente e analizzare le combinazioni mostrate in figura 4.3 è necessario, in questa fase, conoscere elementi relativi al del sistema, che si è visto discutere sui fenomeni rilevanti per analisi di scenario.

Gli scenari SCE1 a SCE9 SCE3 e si riferiscono a situazioni off-site, nel senso che il gruppo critico è situato principalmente al di fuori della struttura di smaltimento. Gli scenari SCE4 a SCE8, descrivono situazioni locali per le quali il gruppo critico interagisce direttamente con il deposito.

Lo scenario SCE1 corrisponde all'uso di acqua contaminata nella biosfera, in un punto all'interfaccia con la geosfera, dopo la migrazione dei radionuclidi attraverso la geosfera. La concentrazione di radionuclidi in acqua a livello di interfaccia non dipende solo dalle caratteristiche rifiuti e dalle prestazioni della copertura del deposito, ma anche dalle caratteristiche della geosfera. Ad esempio, l'esistenza o meno di una zona insatura sotto il deposito e le proprietà idrogeologiche della geosfera sono caratteristiche importanti da prendere in considerazione durante la fase di modellazione. L'interfaccia tra la geosfera e la biosfera può essere un pozzo che intercetta il plume radioattivo nella geosfera a valle dell'impianto di smaltimento o un corpo idrico superficiale. Occorre considerare che il corpo idrico superficiale è situato in una posizione precisa rispetto al deposito, mentre il pozzo può trovarsi in una posizione arbitraria al di fuori del sito in cui la concentrazione è più alta (ad esempio al confine a valle del sito). Tuttavia non va dimenticato che vi è la necessità di verificare la coerenza tra la disponibilità di acqua e le assunzioni fatte sulla natura della biosfera. Quindi, la biosfera può essere rappresentata da una piccola azienda agricola quando non ci sono limiti di approvvigionamento idrico, o solamente di un orto, quando le riserve di acqua sono scarse.

Lo scenario SCE2 differisce da SCE1 a causa del fatto che la copertura è scomparsa, o non è del tutto presente, e che il contenimento dei rifiuti è, almeno in parte, degradato. Questa situazione comporta l'erosione del vento del contenimento dei rifiuti con il successivo trasferimento in atmosfera e conseguente deposizione di particelle radioattive nel punto in cui è posizionato il gruppo critico. Inoltre, a seconda delle caratteristiche del sito (morfologia del terreno), l'erosione dell'acqua e il trasporto di radionuclidi nel flusso d'acqua processi portano alla contaminazione della biosfera off-site.

Nello scenario SCE3 si ritiene possibile che, allo stesso tempo, non ci sia più copertura e sia possibile un accesso casuale, ma di breve durata, al sito. In tali condizioni, durante queste intrusioni di breve durata nell'impianto di smaltimento, può verificarsi sia l'esposizione casuale on-site che off-site.

Negli scenari on-site SCE4 e SCE5, l'esistenza di una copertura e la condizione inalterata/parzialmente degradata del contenimento dei rifiuti limitano la vulnerabilità del sito, con conseguente riduzione dei percorsi di trasporto. Si ritiene, altresì, che possano presentarsi delle perforazioni del deposito. Nel caso particolare di SCE4, si prevede che l'acqua derivante da un accumulo di perdite (Effetto vasca da bagno) potrebbe contaminare un sistema residenziale con una sovra portata. Tuttavia, ancora una volta, è necessario sottolineare la necessità di una valida giustificazione di un tale scenario (disponibilità di acqua e tempo necessario per riempire il deposito prima della condizione di sovra portata).

Negli scenari on-site SCE6 e SCE7, i rifiuti sono considerati totalmente degradati. Se dovessero essere dissotterrati, il loro stato potrebbe comportare percorsi di esposizione multipli. Tuttavia, occorre tenere in considerazione lo stato e lo spessore della copertura, che offre una certa protezione contro le intrusioni, proprio grazie ad uno spessore che protegga efficacemente. Inoltre, nel caso di depositi completamente allestiti (rifiuti in moduli e deposito a volta), è necessario prendere in considerazione ipotesi come il fatto che la maggior parte degli elementi strutturali di copertura siano persi, e che le persone a non possano utilizzare sistemi tecnologici di analisi del sistema. Per tutto questo, il suggerimento è quello di presumere che tali scenari non possano avvenire prima di un periodo di tempo, nell'ordine dei 500 anni, in linea con i tempi di degradazione del cemento armato.

Infine, per gli scenari SCE8 e SCE9, anche se la copertura è assente, il fatto che il contenimento dei rifiuti restino invariate, o si degradino solo in parte, limita l'esposizione potenziale ai materiali radioattivi, perché il numero di percorsi di trasporto possibili è molto ridotto per un caso del genere.

Dopo aver definito questo insieme rilevante di scenari, è necessario riordinarli secondo le loro probabilità di occorrenza. Tutti quegli eventi per cui si è quasi certi che si verifichino devono essere utilizzati per definire il così detto *scenario di normale evoluzione* o *scenario normale* (talvolta chiamato anche scenario di riferimento). Le ipotesi utilizzate nello sviluppo di questo *scenario normale* si basano su estrapolazioni delle condizioni esistenti nel futuro e sull'incorporazione dei cambiamenti previsti per la verifica con il passare del tempo non considerando, di solito perturbazioni significative del sistema.

In genere, uno scenario off-site SCE1, dove si trova una piccola azienda agricola a valle del deposito, è un scenario di normale evoluzione di tipo rilevante. In genere, l'utilizzo di un'azienda di

allevamento è un modo per assicurarsi di valutare una vasta gamma di percorsi di esposizione possibili. Eventi, che sono meno probabilità di verificarsi, e che possono introdurre perturbazioni significative per il sistema richiedono lo sviluppo dei cosiddetti *scenari alternativi* o *scenari alterati*. Anche se la loro occorrenza non è certa, alcuni di essi sono di solito considerati su base deterministica. In genere, tali scenari sono situazioni on-site come SCE6, relativo alla presenza di edilizia residenziale sopra l'impianto di smaltimento e SCE7 relativo alla costruzione di una strada che interessi tutta l'area dell'impianto di smaltimento. Inoltre, alcune situazioni sono considerate molto improbabili, ma che conducono ad importanti ripercussioni radiologiche. Per esempio, il contatto con un campione *hot-spot* di materiale ad alta concentrazione (SCE5 e SCE8) possono produrre un impatto non trascurabile, ma con una bassa probabilità di accadimento. In tali casi, la probabilità di accadimento potrebbe essere valutata allo stesso tempo con la dose associata. In generale, off-site scenari come SCE1 e scenari on-site come SCE6 o SCE7, anche se considerati nella stessa procedura di valutazione della sicurezza, sono assunti indipendenti l'uno dagli altri. Una difficoltà che si pone è l'apparente discrepanza tra le ipotesi che sorreggono situazioni off-site, per i quali è massimizzata la lisciviazione dei rifiuti iniziali, e le ipotesi legate a scenari on-site, dove la perdita di radioattività dalla sorgente è minimizzata assumendolo solo derivante dal decadimento radioattivo. In realtà, gli scenari on-site sono spesso previsti alla fine del periodo di controllo istituzionale durante il quale il deposito è ancora mantenuto. Se la copertura è stata correttamente progettata, il tasso di infiltrazione si può presumere essere costante e ridotto nel corso del periodo di controllo, che conduce ad una limitata lisciviazione dei rifiuti. Inoltre, la scelta di scenari off-site è giustificata sulla base del fatto che gli elementi radioattivi devono migrare attraverso la geosfera. Tale migrazione di solito richiede più tempo rispetto alla durata periodo di controllo, tranne forse per un radionuclide molto mobile come il trizio. Tuttavia, si deve essere consapevoli dell'esistenza di queste discrepanze, tanto più che alcuni scenari possono spiegare situazioni miste, in parte off-site e in parte in on-site (vedi ad esempio SCE3 e SCE9).

Alla luce di quanto detto sopra, è possibile proporre una serie limitata e giustificata di scenari da prendere come base per la valutazione. Per questo esempio, gli scenari da considerare sono:

- Il sistema di piccole aziende agricole che utilizzano l'acqua estratta da un pozzo o da un corpo idrico superficiale come scenario off-site (scenario di lisciviazione - SCE1);
- La costruzione della strada come scenario on-site (scenario di costruzione di strade - SCE7);
- Lo scenario di soggiorno sul sito, con rifiuti totalmente degradati (scenario di residenza sul sito - SCE6)
- Per la sua rilevanza, si suggerisce di tener conto anche di uno scenario di residenza con contaminazione da percolato accumulato nel deposito (lo scenario on-site - SCE4).

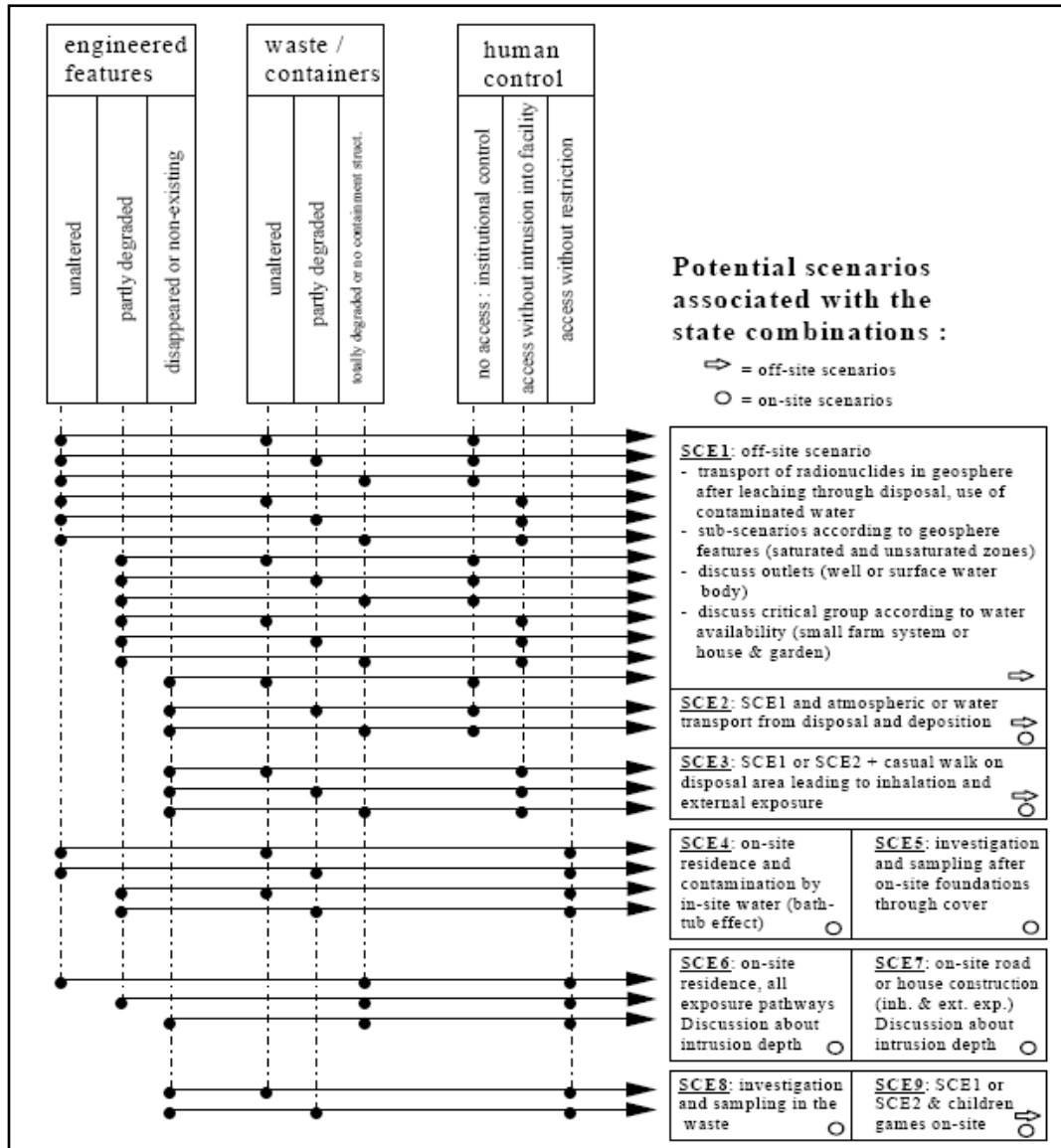


Figura 4.4

#### 4.9 GLI SCENARI PER L'INTRUSIONE UMANA

Una questione importante, nella valutazione della sicurezza dei depositi superficiali, è l'approccio utilizzato per esaminare le future azioni umane, poiché presentano un notevole potenziale di provocare un'esposizione. Vi è consenso generale che nell'ambito della valutazione di sicurezza debbano essere considerate solo intrusioni umane involontarie. Intenzionali azioni future dell'uomo, incluse le azioni quali il sabotaggio o qualsiasi bonifica non prevista o di recupero, sono da considerarsi fuori del campo di applicazione della valutazione. L'argomento è che la società attuale non è in grado di proteggere società future dalle loro azioni qualora esse non ne comprendessero le potenziali conseguenze.

ICRP [4.22] divide gli scenari di esposizione da intrusione umana, in due grandi categorie: quelli avviati da processi naturali e quelli derivati dalle attività umane. Per la definizione di questi ultimi, occorre analizzare il contesto locale di valutazione, in termini di raccomandazioni internazionali in materia di vincoli di protezione radiologica, la definizione dei gruppi critici, così come i tempi. Gli scenari che considerano la futura attività umana possono essere definiti, come per gli altri scenari, dall'iniziale screening della Lista FEP.

Dalla struttura della lista FEP, si evidenziano:

- fattori legati al motivo dell'interazione involontaria dell'uomo con il deposito (attività di perforazione, minerarie e di altre attività clandestine, scavi di superficie, la gestione delle acque, ecc);
- fattori di sistema (caratteristiche dei rifiuti, barriere ingegneristiche, caratteristiche geologiche, ambiente superficiale, comportamento umano),
- fattori dei contaminanti (caratteristiche dei contaminanti, rilascio e migrazione, fattori di esposizione).

#### **4.9.1. Identificazione delle attività umane**

Le attuali attività umane possono influire nella prestazione di sistema su scala globale, per esempio i cambiamenti climatici a causa del rilascio di gas serra in atmosfera. Possono interessare anche l'area circostante l'impianto, su scala locale, ad esempio, abstraction delle acque sotterranee o attività estrattive. Gli scenari che esplorano possibili future attività umane illustrano il potenziale comportamento del sistema, mentre gli scenari che considerano attività umane correnti (globali o locali), possono essere considerati come meno speculativi. L'analisi delle attività riferite alla popolazione attuale e la demografia può, in linea di principio, dare una stima sulle future attività umane, evitando speculazioni circa il livello di sviluppo sociale, tecnologico e scientifico.

#### **4.9.2. Descrizione dello scenario**

In seguito alle raccomandazioni ICRP [4.22], al fine di valutare la resistenza del deposito alle possibili conseguenze, devono essere considerati uno o più plausibili scenari di intrusione umana. Durante il processo di licenziamento del deposito, il proponente si impegna ad eseguire varie valutazioni: per la scelta del sito, la progettazione impianto di smaltimento, l'ottimizzazione, ecc.. A seconda degli scopi prefissati, gli scenari di intrusione possono mostrare alcune differenze. Ad esempio, se la valutazione viene eseguita per la selezione del sito, una maggiore enfasi dovrebbe essere data per le attività umane orientate allo sfruttamento delle risorse naturali. In fase di progettazione, la maggiore enfasi può essere data al comportamento delle barriere e alla loro resistenza alla perforazione. Un problema rilevante in considerazione delle future attività umane

nella valutazione della sicurezza è quello dei “controlli istituzionali”, che svolgono un ruolo significativo nell’evitare la possibilità di intrusioni umane nel sito (almeno durante il periodo di controllo istituzionale).

#### **4.9.3. Raggruppamento in famiglie di scenari**

Come con altri scenari, è possibile raggruppare gli scenari di intrusione umana in famiglie, secondo le vie di trasporto e le potenziali conseguenze radiologiche di ipotetiche esposizioni dei gruppi critici. Scenari diversi possono avere diverse probabilità di accadimento che variano con il tempo, e il picco del rischio radiologico non sempre corrisponde al picco della dose. Dovrebbe, quindi, essere importante stimare, per ogni gruppo critico di esposizione, le probabilità connesse agli scenari di intrusione. Tuttavia, rispetto a questa posizione si osserva che, a causa della mancanza di base scientifica per la previsione della natura di future attività umane non è opportuno prendere in considerazione le probabilità di tali eventi [4.22]. ICRP ritiene che: "... Nel caso in cui l'intrusione dell'uomo potrebbe portare a dosi di coloro che vivono intorno al sito sufficientemente elevate che l'intervento con gli attuali criteri protettivi e mitigativi sarebbe quasi sempre giustificato, dovrebbe essere fatto un ragionevole sforzo per ridurre la probabilità di intrusione umana o di limitarne le conseguenze. A questo proposito, una dose annuale di circa 10 mSv può essere utilizzato come un livello di riferimento generico al di sotto del quale l'intervento non si ritiene giustificabile.

Nel Capitolo 6 del presente documento viene descritto un approccio più dettagliato per la valutazione del fenomeno dell'intrusione umana, all'interno del processo di valutazione di sicurezza per un deposito superficiale di rifiuti radioattivi.

#### **4.10 LA METODOLOGIA ENEA PER DEPOSITI SUL TERRITORIO ITALIANO**

E' consentita la costruzione dei depositi in aree adeguate definite nella SANM (Suitable Areas National Map [4.24]) mediante l'adozione di alcuni criteri di esclusione. Questi criteri di esclusione possono essere utilizzati per aiutare la selezione delle FEP nella lista ISAM FEP. Il processo è sintetizzato nella tabella 4.4.



<b>CRITERI DI ESCLUSIONE</b>	<b>FEPs ESCLUSI</b>	<b>FEPs MINIMIZZATI</b>
Isole	0.09 Requisiti normativi ed esclusioni	
Aree entro 50 Km dalle frontiere nazionali interne	0.09 Requisiti normativi ed esclusioni	
Aree ambientali protette	0.09 Requisiti normativi ed esclusioni 2.4.04 Abitudini (comportamento non correlato alla dieta) 2.4.11 Utilizzo dell'ambiente nel tempo libero	
Aree comprese entro una certa distanza dal perimetro urbanizzato delle città	1.4.11 Sviluppo sociale e istituzionale 2.4.04 Abitudini (comportamento non correlato alla dieta) 2.4.11 Utilizzo dell'ambiente nel tempo libero	2.4.10 Utilizzo delle acque e delle aree urbane ed industriali
Aree comprese entro una certa distanza dalla rete di trasporti	1.4.11 Sviluppo sociale e istituzionale	2.4.10 Utilizzo delle acque e delle aree urbane ed industriali
Le aree con altezza superiore a 800 m .s.l.;	1.3.04 Effetti di glaciazioni estese 1.3.05 Effetti di locali formazioni glaciali 2.3.01 Topografia e morfologia	2.3.12 Erosione e deposizione
Le aree con pendenza superiore al 30%	2.3.01 Topografia e morfologia	2.3.12 Erosione e deposizione
Aree pianeggianti attorno a fiumi corrispondenti al plio-pleistocene e depositi alluvionali holocenici	1.3.03 Cambiamento del livello del mare 2.3.10 - Meteorologia	1.2.07 Erosione e sedimentazione
Le aree con sismicità pari o superiore al IX grado della scala Mercalli	1.2.03 Sismicità 1.2.04 Attività vulcanica e magmatica	

**Tabella 4.4. I criteri di esclusione (FEP escluse) per l'istituzione di aree idonee alla costruzione di depositi superficiali di rifiuti radioattivi in Italia**

#### **4.10.1 Considerazioni sul contesto della valutazione**

Per la definizione dello scenario di progetto sono stati considerati i seguenti componenti del contesto di valutazione:

- 1) Le finalità per cui la valutazione sarà effettuata è, in primo luogo, la valutazione e la comparazione dei siti in termini di sicurezza delle prestazioni di contenimento del sistema deposito-geosfera-biosfera (FEP 0.08 considerato);
- 2) Gli effetti e le conseguenze sul gruppo critico a causa di smaltimento costruzione sarà calcolato in termini di dose individuale annuale o rischio individuale annuo (FEP 0.01 considerato);
- 3) Il periodo di tempo durante il quale la dose individuale annuale e/o il rischio individuale annuo sarà calcolato sono  $10^4$  anni (FEP 0.02 considerato);
- 4) La valutazione prenderà in considerazione solo il dominio spaziale che sarà necessario per costruire il modello concettuale utilizzato al fine di simulare il trasporto dei contaminanti dal deposito alla biosfera (FEP 0.03 considerato);
- 5) La valutazione ha inizio solo dopo la chiusura del deposito, che sarà considerato chiuso con successo dopo la sua fase operativa. Non è possibile di recuperare i rifiuti dal deposito dopo la sua chiusura. Il periodo di controllo istituzionale è di 300 anni. (FEP 0.04 viene considerato, mentre FEP 1.1.02, 1.1.03, 1.1.04, 1.1.05, 1.1.06, 1.1.07, 1.1.08, 1.1.09, 1.1.10, 1.1.11, 1.1.12 e 1.1.13 vengono vagliati).
- 6) Il livello scientifico/tecnologico e il comportamento umano dovrebbe rimanere lo stesso per i prossimi 10,000 anni (FEP 0.05 e 0.06 considerati);
- 7) L'equazione utilizzata per il calcolo del rischio individuale (FEP 0.07 considerato) è la seguente:  

$$\text{Rischio individ.} = (\text{dose}) \cdot (\text{probab. di esposizione}) \cdot (\text{probab. di cancro letale per unità di dose})$$
- 8) Il limite di dose adottato per l'analisi è  $0.3 \text{ mSv y}^{-1}$ . Il limite di rischio sarà  $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ y}^{-1}$  (FEP 0.09 considerata);
- 9) La valutazione sarà effettuata per mezzo di un modello matematico e codici di calcolo. Un approccio conservativo per la definizione e la valutazione dei modelli di inserimento dei dati verrà utilizzato quando risultassero insufficienti o inattendibili i dati dal punto di vista qualitativo/quantitativo. Una procedura per il trattamento dell'incertezza sulla base di un'analisi di sensibilità dovrà essere definito e applicato al modello per la sua validazione (FEP 0.10 in esame).
- 10) Si presume che tutte le indagini su aspetti geologici, geomorfologici, idrologici ed idrogeologici che saranno effettuate presso i siti saranno considerati idonei per escludere il FEP 1.1.01. I dati sulle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e climatiche dei siti sono assunti essere costanti (FEP di categorie 1.2 e 1.3 e FEP 1.4.01 esclusi).
- 11) Attualmente, non viene considerata la possibilità di un evento di intrusione umana (FEP 1.4.02, 1.4.03, 1.4.04, 1.4.05, 1.4.06, 1.4.07, 1.4.08, 1.4.09, 1.4.10, 1.4.11 esclusi).

#### **4.10.2 Esame del dominio del sistema di smaltimento: i fattori ambientali**

*Rifiuti e sistema ingegneristico:* Per la valutazione preliminare, l'inventario del deposito contiene solo i radionuclidi che vengono considerati importanti in termini di iniziale attività, tempo di dimezzamento (considerando il periodo di tempo cui la valutazione sarà effettuata), radiotossicità e le loro proprietà di assorbimento nel *near-field* e nel *far-field* (FEP 2.1.01 considerato). Il modello di simulazione dovrà essere istituito con lo scopo specifico di dare al valutatore la flessibilità di modificare le proprietà idrauliche dei contenitori di rifiuti, materiali e progetto delle barriere ingegneristiche. Lo scenario di progettazione dovrà essere elaborato tenendo in considerazione la possibilità di un lento degrado del sistema multi-barriera del deposito, una volta che sia terminato il periodo di controllo istituzionale (FEP 2.1 in esame).

*Ambiente geologico:* Per la valutazione si terrà conto che il trasporto di radionuclidi è una conseguenza di infiltrazioni di acqua piovana attraverso la copertura di smaltimento, con la loro migrazione a seguito dell'inquinamento nel sistema di flusso delle acque sotterranee. Le zone sature ed insature e la falda acquifera sottostante il deposito sono caratterizzati da un flusso poroso disciplinato dal flusso di Darcy. (Tutti i FEP del livello 2.2 esclusi, tranne 2.2.05 e 2.2.07).

*Ambiente superficiale:* Il modello di valutazione preliminare per ogni sito prende in considerazione le seguenti caratteristiche:

Caratteristiche acquifero superficiale (FEP 2.3.03 considerato);

Caratteristiche del corpo idrico superficiale (FEP 2.3.04 considerato);

Caratteristiche dell'ambiente costiero (FEP 2.3.05), anche in rapporto con le caratteristiche marine (FEP 2.3.06 considerato);

Caratteristiche idrologiche (FEP 2.3.10 considerato);

Caratteristiche del regime idrologico e bilancio idrico (infiltrazioni superficiali) (FEP 2.3.11 considerato).

I FEPS rimanenti del livello 2.3 sono esclusi.

*Comportamento umano:* la dose e calcolo del rischio dovrà tenere conto del consumo di acqua degli esseri umani per il gruppo critico potenzialmente esposto (FEP 2.4.03 considerato).

Il FEP rimanente del livello 2.4 sono esclusi essenzialmente perché si presume che aree attualmente poco sviluppate dal punto di vista agricolo presenti nei siti di localizzazione del deposito, continueranno ad esserlo per i prossimi  $10^4$  anni.

### 4.10.3 Esame delle caratteristiche del contaminante

Nella valutazione e nello sviluppo degli scenari saranno considerati i radionuclidi che rimangono stabili in termini di decadimento radioattivo e in crescita (FEP 3.1.01 escluso). Le caratteristiche di assorbimento radionuclidi saranno prese in considerazione per mezzo del parametro  $K_d$  dei contenitori di rifiuti, moduli, barriere ingegneristiche e ambientali (FEP 3.2.03 esaminato). La migrazione e il destino dei radionuclidi sarà il risultato di infiltrazione di acqua piovana attraverso la struttura di copertura e dei sistemi di contenimento artificiali, con seguente movimento avvertivo dei contaminanti nel sistema di circolazione delle acque sotterranee (FEP 3.2.07 considerato). I FEPs rimanenti di livello 3 saranno esclusi.

### 4.10.4 Gli scenari selezionati

Con riferimento all'esame dei FEPs riportati nella precedente sotto-sezioni, si prevede l'indagine di due scenari: uno *scenario di progetto* e di uno *scenario alterato* (fallimento del sistema multi-barriera). Uno scenario dove si preveda l'intrusione umana, dovrebbe essere introdotta nella prossima fase dello studio.

*Scenario di progetto*: Durante il periodo di controllo istituzionale tutti i componenti dell'impianto di smaltimento sono tenuti in completo stato di funzionamento. In questo periodo non si prevede il verificarsi del fenomeno di lisciviazione dei contaminanti. Dopo 300 anni di periodo di controllo istituzionale, è prevista una degradazione progressiva del sistema d'ingegneria multi-barriera. In termini di effetto di barriera idraulica, questo significa che dopo  $10^4$  anni l'efficienza dei sistemi di contenimento artificiali è ridotto del 30%. Questa stima è derivata dall'analisi del processo di degrado del cemento in un deposito di smaltimento dei rifiuti radioattivi [4.23]. Le dosi per il gruppo critico saranno calcolate sulla base di un apporto di 2 litri/day di acque sotterranee, estratte da un pozzo situato a 1 Km a valle dell'impianto di smaltimento. A seconda dell'utilizzo geografico, idrologico, idrogeologico e del terreno tipico per ciascun sito, si dovranno calcolare le dosi per tutte le vie di trasporto di radionuclidi rilevanti.

*Scenario alterato* (fallimento del sistema multi-barriera): Questo scenario presuppone che insorga un evento di rottura delle barriere dopo la chiusura dell'impianto di smaltimento. Si esaminano tre opzioni:

- Rottura dopo 1 anno;
- Rottura dopo 300 anni;
- Rottura dopo 400 anni.

Il fallimento causerà l'infiltrazione nel sistema di flusso delle acque sotterranee flusso del 2% del totale inventario del deposito al tasso annuo medio di infiltrazione, per un periodo di un anno. Nei primi due casi, in cui la rottura si verifica durante il controllo istituzionale, il danno sarà riparato e

il processo di lisciviazione sarà arrestato. Le caratteristiche e l'evoluzione dopo la rottura ed il calcolo della dose utilizzati per questo scenario sono identici a quelli già descritti per lo *scenario di progetto*.

#### 4.11 BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 4

- [4.1] CADELLI N, COTTONE G, ORLOWSKI S, BERTOZZI G, GIRARDI F AND SALTELLI A (1988). PAGIS (Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste) Summary. European Commission Report EUR 11775 EN. European Commission, Luxembourg.
- [4.2] SKI, SKI SITE-94 Deep Repository Performance Assessment Project. SKI Report 96:36 (2 volumes), Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1996).
- [4.3] HOSSAIN S AND GRIMWOOD P D, Results of the IAEA Co-ordinated Research Programme on the Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities. Proceedings of an International Symposium on Experience in the Planning and Operation of Low Level Waste Disposal Facilities, Vienna, 17 – 21 June 1996, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp 453 – 467, (1997).
- [4.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities: Model Intercomparison Using Simple Hypothetical Data (Test Case 1). First Report of NSARS, IAEA-TECDOC-846, Vienna (1995).
- [4.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Fundamentals “The Principles of Radioactive Waste Management”, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna (1995).
- [4.6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, GS-R-1 Legal, Governmental Infrastructure on Nuclear, Radiation, Transport and Waste Safety, IAEA.
- [4.7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment for Near Surface Disposal, Safety Standard Series No. SS-G-1.1., IAEA, Vienna (1999).
- [4.8] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (1998). Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste. International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 77. Pergamon Press.
- [4.9] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (1998). Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 81. Pergamon Press.
- [4.10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Report on Radioactive Waste Disposal. Technical Report Series No. 349, IAEA, Vienna (1993).
- [4.11] WATTS, L., CLEMENTS, L., EGAN, M., CHAPMAN, N., KANE, P., THORNE, M., Development of Scenarios within a Systematic Assessment Framework for the Drigg Post-Closure Safety Case. In Scenario Development Methods and Practices. Proceedings of a NEA Workshop on Scenario Development, Madrid, 10 – 12 May 1999. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, pp 133-144, (2001).
- [4.12] US EPA 40 CFR Part 191 - Environmental Radiation Protection Standards for Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High level and Transuranic Radioactive Wastes .40 CFR 191, September 1985, revised through July 1991, amended at December (1993).

- [4.13] SKI, SSI, HSK Regulatory Guidance for Radioactive Waste Disposal - an Advisory Document. Swedish Nuclear Power Inspectorate, Swiss Nuclear Safety Inspectorate and Swedish Radiation Protection Institute .SKI Technical Report 90:15, Stockholm, Sweden (1990).
- [4.14] US EPA 40 CFR Part 194 - Criteria for the Certification and Re-certification of the Waste Isolation Pilot Plant's Compliance with the 40 CFR Part 191 Disposal Regulations. Environmental Protection Agency, (1995).
- [4.15] LONGMAN Dictionary of the English Language, 2nd edition. Longman Group UK Limited, ISBN 0-582-07038-4, (1991).
- [4.16] ANDERSSON, J. ,(Ed.) The Joint SKI/SKB Scenario Development Project .SKI Technical Report 89:14, Stockholm, Sweden (1989).
- [4.17] STEPHENS, M.E., et al. Analysis of Safety issues for the Preliminary Safety Analysis Report on the Intrusion Resistant Underground Structure. AECL-MISC-386, Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario, Canada (1997).
- [4.18] GOODWIN, B.W., et al. Scenario Analysis for the Post closure Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal. Atomic Energy of Canada Ltd, Report No. AECL 10969, COG-94-247 (1994).
- [4.19] NUCLEAR ENERGY AGENCY, Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International Database. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris (2000).
- [4.20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Analysis Methodologies for Radioactive Waste Repositories in Shallow Ground, Safety Series No. 64, IAEA, Vienna (1984).
- [4.21] NEA, Shallow Land Disposal of Radioactive Waste: Reference Levels for the Acceptance of Long-Lived Radionuclides. A Report by a NEA Expert Group, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris (1987).
- [4.22] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 81. Pergamon Press (1998).
- [4.23] BERNER, U. R., Evolution of Pore Water Chemistry during Degradation of Cement in a Radioactive Waste Repository Environment, Waste Management, Vol. 12, pp 201- 219 (1992).
- [4.24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, *Results of a co-ordinated research project Volume 1 Review and enhancement of safety assessment approaches and tools* IAEA, Vienna (2004).

## 5. LINEE GUIDA DELLA METODOLOGIA NIREX PER LA DEFINIZIONE DI SCENARI NELLE VALUTAZIONI DI SICUREZZA DI DEPOSITI DI RIFIUTI RADIOATTIVI SUPERFICIALI E PROFONDI

### 5.1 GENERALITÀ SULLA METODOLOGIA NIREX

Al fine di supportare le fasi decisionali del processo di valutazione della sicurezza di un deposito di rifiuti radioattivi e le relative ipotesi di modellazione, United Kingdom Nirex Limited NIREX ha proposto un quadro procedurale sistematico a cinque fasi per tener conto dei diversi gradi di incertezza che caratterizzano le valutazioni di sicurezza relative ad un deposito superficiale/geologico di rifiuti radioattivi:

FASE 1: Analisi dei FEPs - Compilazione e strutturazione di una banca dati FEP;

FASE 2: Sviluppo del modello concettuale di scenario;

FASE 3: Sviluppo del modello matematico;

FASE 4: Sviluppo di software specifico;

FASE 5: Costruzione e stima del grado di fiducia dei risultati.

In questo Capitolo verranno sviluppati i concetti principali della metodologia proposta da NIREX, relativamente alle sole prime due fasi, che riguardano più da vicino il tema della generazione di scenari.

Il punto di partenza della metodologia NIREX è l'identificazione delle *caratteristiche significative, degli eventi e dei processi (FEP)* per la definizione del “modello concettuale” di un deposito di rifiuti radioattivi utilizzato per la valutazione di sicurezza.

Lo schema generale della metodologia proposta da NIREX è riportato in figura 5.1.

Per lo sviluppo e la strutturazione di una banca dati (database) FEP, viene utilizzata una struttura logico-decisionale del tipo Master Directed Diagram (MDD) facente parte della famiglia dei *database relazionali gerarchici* ed il cui schema generale è mostrato in figura 5.2. Questo tipo di struttura è utilizzata per identificare i diversi modelli concettuali di scenario a partire da un più ampio insieme di FEP's definite nell'ambito più generale degli impatti di un deposito di stoccaggio di rifiuti radioattivi (vd. Capitolo 2 e Appendice 2), così come mostrato in figura 5.3. Il MDD consente di rappresentare ciascun componente del sistema considerando tutte le sue possibili evoluzioni attraverso l'individuazione e la rappresentazione degli scenari significativi in termini di conseguenze radiologiche con la possibilità di stimare la relativa probabilità di accadimento e l'entità del potenziale danno.

La metodologia descrive la possibile evoluzione di un sistema di smaltimento in termini di:

- uno scenario di base;



- una rappresentazione ampia e ragionevole della naturale evoluzione del sistema;
- una serie di varianti o *scenari alterati*, che rappresentano gli effetti di eventi e processi probabilistici opportunamente selezionati nel database FEPs.

Il MDD è stato usato per identificare i modelli concettuali necessari a rappresentare lo scenario di base, mentre le interazioni tra questi modelli concettuali vengono sistematicamente strutturate tramite una tecnica di *diagramma a matrice* (DM) .

Come elemento centrale della metodologia, viene proposto un meccanismo per la combinazione probabilistica di FEP's che consenta la costruzione di scenari *multi FEPs* che rappresentano varianti rispetto allo scenario di base e costruiti con sequenze definite di eventi cadenzati temporalmente e per i quali è sempre possibile stimarne le conseguenze radiologiche rispetto ad un membro di un ben definito *gruppo potenzialmente esposto* (PEG).

La valutazione di sicurezza è basata su una procedura iterativa, ispirata a modelli e principi conservativi, che combina opportunamente i rischi condizionali e le probabilità di accadimento dei diversi scenari ipotizzabili e confrontando le conseguenze attese con i requisiti normativi di riferimento.

Si ritiene che la metodologia di sviluppo del modello proposto da NIREX possa costituire un solido quadro di riferimento per valutazioni sulla sicurezza di elevato grado di dettaglio, sia di un deposito superficiale che di un deposito geologico. Inoltre, questa metodica consente di stabilire le priorità per le future attività di ricerca scientifica e di sviluppo di software specializzato al fine di ottenere un continuo miglioramento nella valutazione della sicurezza di un deposito di rifiuti radioattivi attraverso il controllo delle incertezze associate a questo tipo di analisi.

I principali benefici di un'analisi FEP per lo sviluppo del modello di scenario sono:

- garantire un approccio globale nel considerare tutte le tematiche potenzialmente importanti per la performance a medio e lungo termine di un deposito;
- fornire uno strumento di controllo e di verifica per tutte le decisioni prese durante il processo di valutazione della sicurezza del deposito;
- fornire una esaustiva base descrittiva per la presentazione di una valutazione dettagliata sulla sicurezza del deposito.

Ogni approccio scientifico alla valutazione delle prestazioni di un sistema è affetto da incertezza. In questo contesto, l'incertezza, assume il significato di una mancanza o di una limitazione delle conoscenze pertinenti. Le principali fonti di incertezza nella valutazione della performance di un deposito possono essere così classificate:

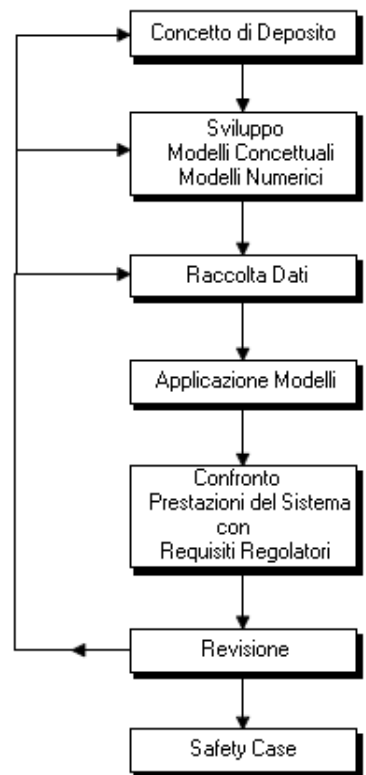
- incertezza sull'evoluzione degli stati futuri del sistema ingegneristico (ES) e dell'ambiente;

- incertezza nei modelli, compresa la selezione o la formulazione di modelli concettuali, la loro traduzione in modelli matematici e la loro implementazione numerica;
- incertezza nei dati iniziali, dovuta principalmente a scarsità o mancanza di questi ultimi;
- incertezza sul futuro comportamento umano.

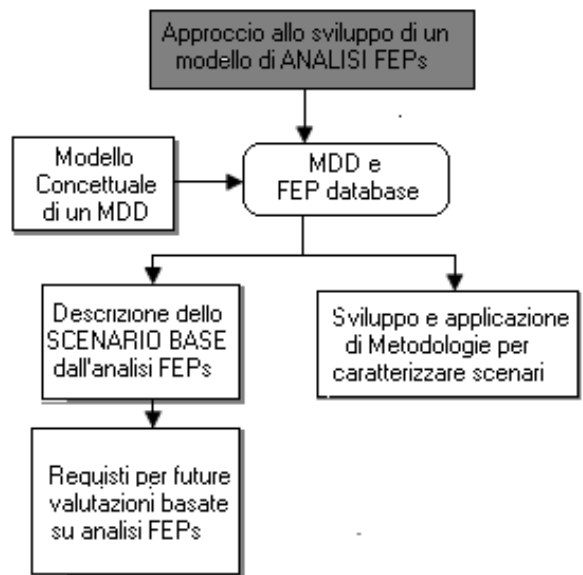
L'incertezza sull'evoluzione futura del deposito viene gestita attribuendo l'esplicito riconoscimento di una incertezza nelle prestazioni dei componenti del sistema di smaltimento: deposito (ES), geosfera (GEO) e biosfera (BIO). L'incertezza sul modello concettuale può essere stimata attraverso il concetto degli scenari alternativi. Il grado di fiducia nei modelli matematici e nei risultati dei codici di calcolo specifici può essere ottenuto mediante esercizi di verifica e di convalida, all'interno di un regime rigoroso di certificazione della qualità, con la possibilità di operare una revisione dei modelli, a partire da una vasta gamma di documentazione scientifica opportunamente aggiornata.

L'incertezza dei dati è esplicitamente riconosciuta dalla definizione delle relative funzioni di densità di probabilità per ciascuno dei parametri del modello e dal campionamento dei risultati sulla stima delle conseguenze possibili, secondo un approccio probabilistico alla valutazione della sicurezza.

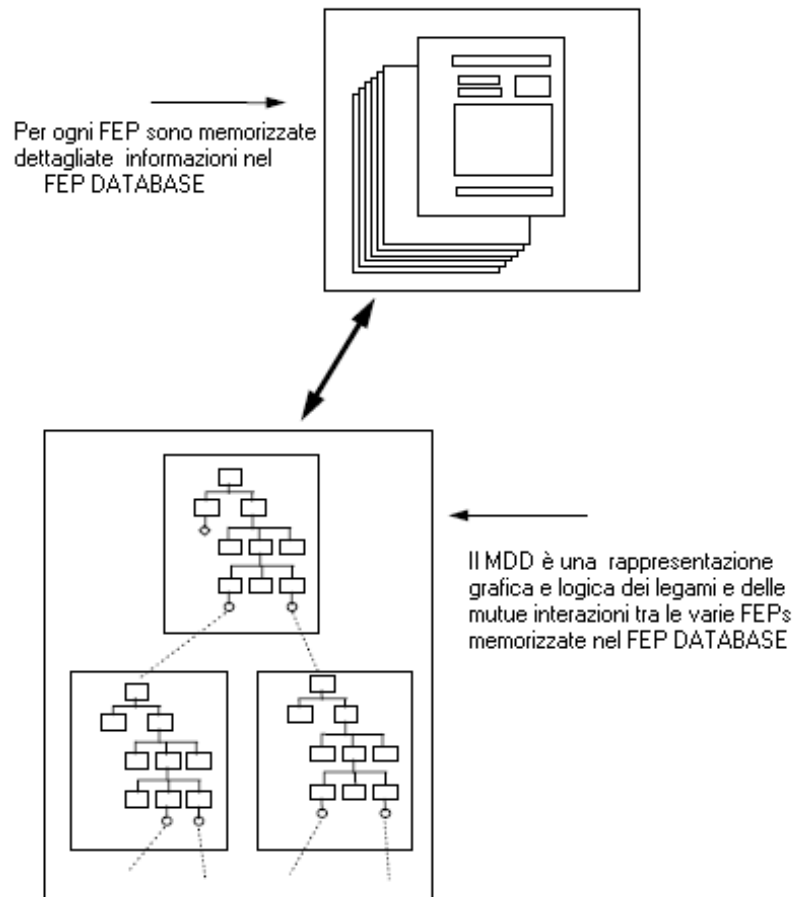
L'incertezza in merito al comportamento futuro dell'uomo può essere valutata attraverso la definizione di scenari futuri alternativi che identificano situazioni per cui il comportamento ipotizzato potrebbe realmente danneggiare il deposito o avere effetti sulla sua integrità strutturale (ad es: penetrazione del deposito per perforazione del terreno sovrastante). Tali scenari porteranno alla definizione di ulteriori PEG. In situazioni in cui il comportamento umano non ha un impatto significativo diretto sull'integrità del sistema di confinamento, ma che può influenzare il valore della dose potenziale derivata dal deposito (ad es: la pesca nelle acque limitrofe al sito di localizzazione), può essere sufficiente semplicemente definire PEG alternative per gli scenari già esistenti.



**Figura 5.1**



**Figura 5.2**



**Figura 5.3**

## 5.2. APPROCCIO ALLO SVILUPPO DELLA METODOLOGIA NIREX

La figura 5.4 illustra l'approccio allo sviluppo della metodologia secondo un diagramma di flusso, che mostra i passi salienti di ogni fase.

Nella FASE 1 vengono raccolti tutti i necessari dati di partenza per lo sviluppo di una corretta valutazione di sicurezza per un deposito di rifiuti radioattivi.

Lo scopo principale della FASE 2 è la strutturazione di un Master Directed Diagram (MDD) [1], che verrà descritto nel successivo § 5.3.1. Nello sviluppo del MDD ci si deve concentrare sul rischio radiologico per l'uomo, anche se l'approccio è applicabile in considerazione di altri indicatori, come il flusso di *near-field* (vd. § 5.3.3). L'obiettivo di questa fase, può essere indicato come l'identificazione di un insieme completo e sufficiente dei FEPs rilevanti per l'evoluzione post-chiusura del sistema di smaltimento.

Nella FASE 3, il MDD viene utilizzato per definire una serie di scenari che dovranno essere simulati in modo dettagliato nei calcoli. Il MDD è anche utilizzato per identificare i gruppi di FEPs che possono essere trattati insieme come modelli concettuali in ogni scenario. Per registrare e tener conto delle interazioni tra questi modelli concettuali si utilizzano diagramma a matrice (DM) (cfr. § 5.3). Caratteristiche e prestazioni di entrambi i diagrammi saranno discussi di seguito. Oltre all'individuazione degli scenari della valutazione, il risultato di questa fase principale è l'identificazione e la documentazione dei requisiti di modellazione necessari per la rappresentazione di questi scenari. Il documento dei requisiti di modellazione deve considerare il contesto dei modelli concettuali e le interazioni tra di essi [2]. Tali requisiti di modellazione possono essere utilizzati per esaminare i software di valutazione già esistenti e per individuare aree dove si ritiene necessaria la ridefinizione di nuovi modelli od il miglioramento di quelli esistenti. L'obiettivo della FASE 3 è quindi l'identificazione delle influenze tra FEPs significativi, al fine di facilitare lo sviluppo di modelli concettuali di evoluzione futura del deposito.

Nella FASE 4, sia per le aree consolidate che per quelle caratterizzate da esigenze di ricerca e sviluppo, si procede alla selezione e descrizione completa delle trattazioni fisico-matematiche (modelli, ipotesi, equazioni, modalità risolutive e dati necessari) che sono in grado di descrivere l'impatto radiologico per tutti gli scenari di riferimento. A completamento di questa fase, si devono stilare le specifiche tecniche dei programmi di calcolo, ad un livello di dettaglio sufficiente da poter essere utilizzate dal team incaricato di ricercare software esistente o di svilupparne di nuovo.

Durante la FASE 5 si individuano o si realizzano software dedicati e che rispondano alle specifiche tecniche emerse in FASE 4.

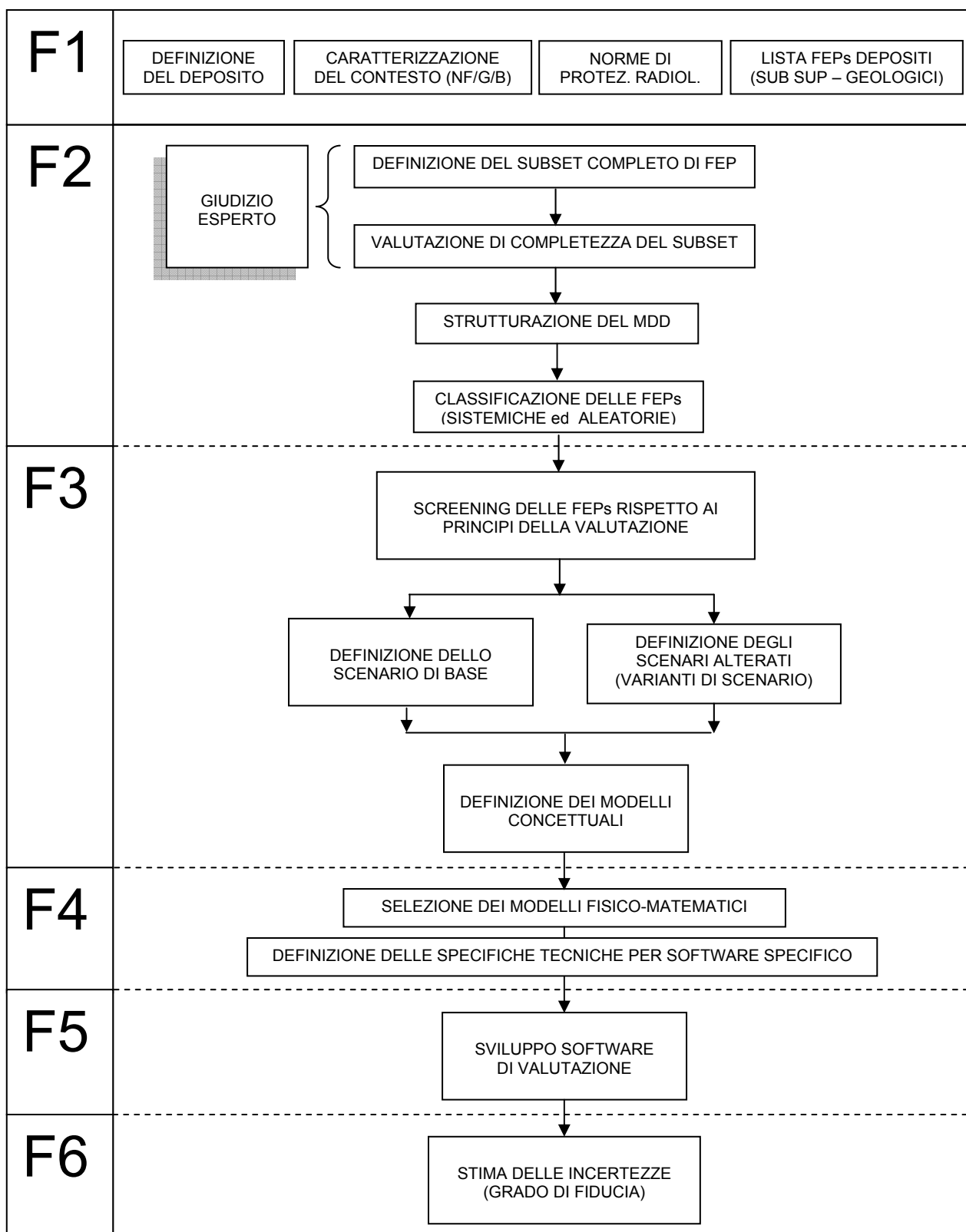
La FASE 6 è interamente dedicata all'ottenimento dei risultati della valutazione e alla stima del loro grado di fiducia. Quest'ultima si basa sull'applicazione di tecniche di valutazione dell'incertezza sul risultato di scenario in funzione delle incertezze relative ai modelli di scenario, ai dati, ai parametri, ai modelli matematici e alle tecniche risolutive.

In questa sede va osservato che il cuore della metodologia risiede nell'approccio schematico dello sviluppo del MDD e dei DM, che risultano fondamentali per ottenere un insieme completo e sufficiente di FEPs, dal quale possano essere costruiti scenari e modelli concettuali. Altre metodologie [3] utilizzano il criterio degli schemi di influenza, ma un tale approccio è stato ritenuto insoddisfacente da NIREX [1].

Il MDD, anche se inizialmente costruito in FASE 2, è un importante strumento usato in tutto il processo metodologico, ad esempio per individuare scenari (vd § 5.4) e dei modelli concettuali (vd. § 5.5). In pratica, il MDD è una architettura di dati e di relazioni che, utilizzato durante tutte le sue fasi della valutazione, è un riferimento costante durante tutto il processo di sviluppo della metodologia.

Una caratteristica necessaria di qualsiasi processo di sviluppo del modello è il giudizio di un team di esperti al fine di avvalersi, a suo sostegno, delle migliori informazioni scientifiche disponibili al momento. E' essenziale che tutte le decisioni prese da questi gruppi siano pienamente documentate, con motivazioni chiare e, ove possibile, debitamente documentate, per esempio, da calcoli specifici o da riferimenti alla letteratura scientifica pubblicata.

La grande maggioranza dei FEPs sul MDD vengono identificati nel corso di sessioni di elicitazione di team esperti. Ogni sessione è dedicata ad un particolare componente o aspetto del sistema di smaltimento: *near-field*, geosfera, biosfera, il percorso del gas e l'intrusione umana. Altre riunioni si tengono per prendere in considerazione le interfacce tra queste componenti. In questo ambito risulta molto utile l'applicazione ai risultati *in progress* delle attività del team di opportune metodologie di analisi dei processi elicitori. (vd. Capitolo 6).



**Figura 5.4**

### 5.3 L'ANALISI DEI FEP

La prima fase del processo di sviluppo della metodologia NIREX è l'identificazione di quei FEP che possono avere un potenziale impatto sulle prestazioni a lungo termine di un deposito di rifiuti radioattivi.

La tecnica di costruzione dei MDD è stata sperimentata per la prima volta nell'ambito del programma NIREX, dove si è ritenuto che un approccio *ab initio*, fosse il più appropriato. Tuttavia, la banca dati NIREX FEP è stata confrontata con l'attuale database internazionale FEP NEA [4] e la verifica ha confermato l'assenza di omissioni o carenze.

L'obiettivo è quello di sviluppare FEP a un livello di dettaglio sufficiente a formare la base per l'identificazione di scenari e per lo sviluppo del modello concettuale. Ciò richiede la costruzione di un database contenente le descrizioni, le proprietà e l'impatto potenziale di tutti i FEP identificati.

L'approccio all'analisi NIREX FEP comporta la costruzione di una MDD di FEP e le loro interazioni attraverso un processo a due fasi: In una prima fase, per ottenere una base di dati completa e sufficiente, sono inclusi tutti i FEP di potenziale rilevanza, senza tener conto della loro importanza relativa ed in una successiva fase si procede alla rimozione dei FEP non ritenuti significativi per le prestazioni del sistema.

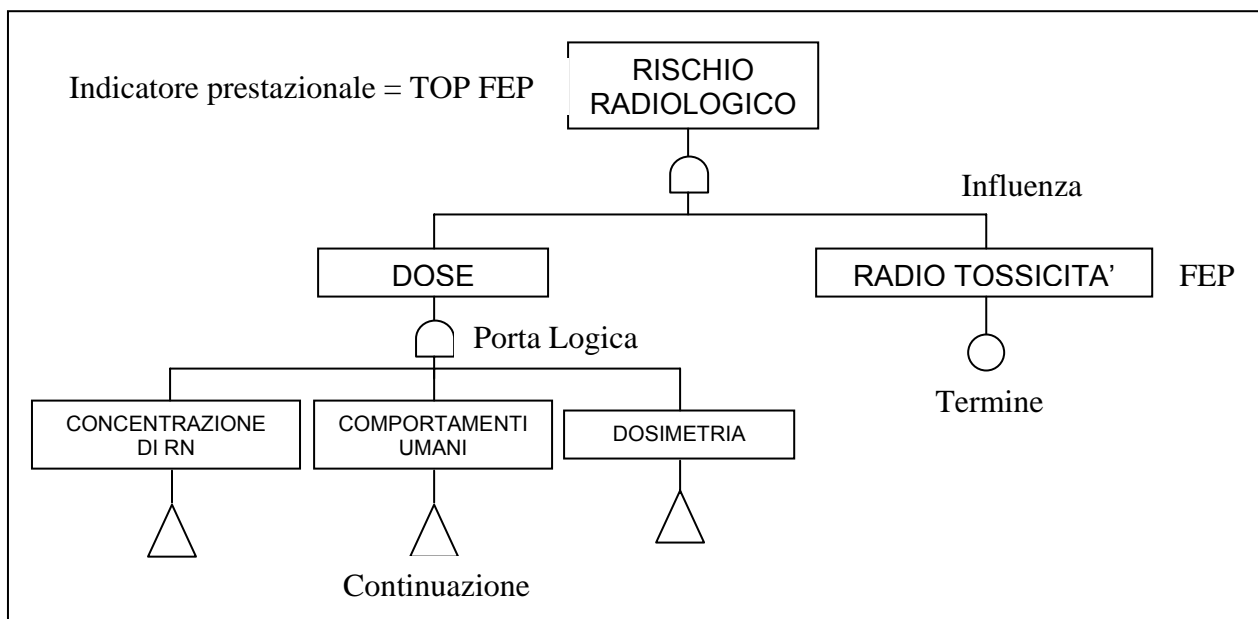
#### 5.3.1 Struttura del MDD

Un Master Directed Diagram MDD è un diagramma diretto (non ciclico) su cui i nodi rappresentano FEP e le connessioni rappresentano le interazioni. A differenza di un diagramma di influenza i FEP sono organizzati in una gerarchia di livelli (vd. Fig. 5.5)

Sotto questi livelli, nei rami di un MDD si prendono in considerazione tutte le aree rilevanti per la sicurezza di un deposito di rifiuti, per esempio, ci sono rami del MDD che riguardano la biosfera, la geosfera e il sistema ingegneristico. Naturalmente, molti FEP, come quelle relative ai processi di trasporto di radionuclidi, sono pertinenti a diverse aree del sistema di smaltimento e di conseguenza si incontreranno in più di un ramo del MDD.

Nella realizzazione del MDD si deve prestare attenzione a garantire che ogni FEP è univocamente definita, cioè che in tutta la struttura sottostante un particolare FEP è identico a ciascuna delle sue occorrenze. Questa particolarità, anche se il MDD è presentato e sviluppato come struttura gerarchica *ad albero*, di ripetizioni multiple di FEP conferiscono a quest'ultimo anche le proprietà di una rete.





**Figura 5.5**

I principali elementi del MDD sono:

FEP	Una caratteristica, un evento o processo di potenziale rilevanza per le prestazioni del sistema di smaltimento.
INFLUENZA	Una linea sul MDD che indica che le proprietà di un FEP stabiliscono, determinano totalmente o parzialmente, le proprietà di un altro FEP.
PORTA LOGICA	L'indicazione del tipo di rapporto tra un genitore e il suo FEP figlio. Una porta logica può essere di tipo 'AND' o di tipo 'OR' AND = implica la necessaria conoscenza di tutti i figli FEP per determinare il FEP genitore OR = qualsiasi sottoinsieme dei FEP figli può definire il FEP genitore
TERMINE	Un simbolo che indica che un FEP non sarà scomposto ai livelli più bassi sul diagramma, e per il quale non vi è giustificazione per non farlo.
CONTINUAZIONE	Un simbolo che indica che il diagramma prosegue (verso il basso) in altre pagine.

Si può vedere dalla figura 5.5 che, come procede lo sviluppo del diagramma, la sua larghezza aumenta, e il livello di dettaglio è associato all'aumento dei FEP.

Le due questioni principali che devono essere considerate dal gruppo di esperti durante la costruzione del MDD sono:

- garantire che ad ogni livello del diagramma sia riportata una serie completa di FEP (COMPLETEZZA ORIZZONTALE);

- garantire che i FEP siano sviluppati ad un livello di dettaglio sufficiente per il successivo sviluppo del modello (COMPLETEZZA VERTICALE);

Il MDD copre tutti gli aspetti rilevanti per la sicurezza a lungo termine di un deposito di residui radioattivi ed il suo sviluppo prevede le sezioni che comprendono i principali componenti del sistema di smaltimento:

- sistema ingegneristico;
- geosfera;
- biosfera;
- percorsi dei radionuclidi;
- modalità d'intrusione umana.

### **5.3.2 Programmi di supporto per la stesura di un MDD**

NIREX ha sviluppato autonomamente un programma di gestione dei FEP e delle loro relazioni che consente, allo stesso tempo, di generare le matrici di interazioni tra i diversi modelli concettuali dei principali sistemi fisici del sistema di contenimento: sistema ingegneristico, geosfera e biosfera. Il programma denominato FANFARE concorre alla generazione di scenari e facilita il compito degli esperti nelle attribuzioni dei pesi probabilistici ai diversi scenari e dell'importanza delle relazioni tra FEP, elementi che risultano la base per la valutazione delle incertezze associate ai risultati dei modelli fisico-matematici di simulazione per ottenere gli indici di sicurezza richiesti dalla normativa.

### **5.3.3 Sviluppo di un MDD**

Lo sviluppo di un MDD segue un approccio di tipo "top-down". Al livello di top viene riportato l'indicatore prestazionale di riferimento chiamato anche "top FEP" (RISCHIO RADIOLOGICO di figura 5.5). Il MDD è poi sviluppato al livello successivo, considerando quei FEP necessari a determinare il top FEP. Sempre con riferimento alla figura 5.5 al livello successivo ci sono due FEP, 'DOSE RADIOLOGICA e 'RADIO TOSSICITA'', che sono collegati alla FEP superiore da una porta logica di tipo AND. Ciascuno di questi FEP secondo livello sono poi sviluppati allo stesso modo, e così via a livelli sempre più bassi di dettaglio.

Poiché l'obiettivo di un MDD è quello di fornire un insieme completo ed esaustivo di FEP. Per ogni FEP inserita nel MDD, si deve rispondere alla seguente domanda:

E' utile, ai fini di una corretta modellazione, includere FEP supplementari a livello immediatamente inferiore per la completa rappresentazione di questo FEP?

Se la risposta è NO, allora la MDD può essere considerata esaustiva a tale livello. (Per esempio, la decomposizione di 'RISCHIO RADIOLOGICO' conduce a due FEP, e l'esame eseguito da diversi gruppi di esperti non è riuscito a individuare eventuali FEP aggiuntivi necessari per quel livello).

Se la risposta alla domanda è 'NO' per ogni FEP inserito sul MDD, il database FEP può essere considerato esaustivo.

Durante lo sviluppo del MDD verso il basso, i FEP diventano sempre più specifici. Alla fine, si arriva ad un punto in cui il livello di dettaglio dei FEP è equivalente a quello che deve essere considerato un vero e proprio modello numerico del FEP. A questo punto si deve terminare il processo di sviluppo ulteriore di queste FEP, in quanto nessun beneficio supplementare sarà acquisito dalla decomposizione in maggiori livelli di dettaglio. Pertanto, il FEP al più basso livello sul MDD dovrebbe riflettere un adeguato livello di dettaglio per consentire lo sviluppo del modello matematico cui si riferisce.

Ciò solleva l'importante questione di quando il MDD può essere considerato terminato. In realtà il MDD non può mai considerarsi terminato, bensì solamente congelato. Tuttavia, può essere considerato *completato* nel senso che fornisce una descrizione globale del sistema, con una serie di FEP che siano sufficientemente dettagliate per successive attività di sviluppo del modello.

Va notato che ai livelli più bassi, il MDD non rappresenta necessariamente tutte le interazioni tra FEP, in quanto ciò può introdurre inutili complessità. Mentre, le interazioni tra FEP chiave devono essere necessariamente considerate attraverso l'utilizzo di un diagramma a matrice (MD) di supporto alla fase di sviluppo del modello concettuale.

La logica di selezione dei FEP per l'esame sullo schema matrice è indicato nel § 5.5.

A volte si può riscontrare che alcuni FEP di alto livello non necessitano di decomposizione, anche se il loro livello di dettaglio è insufficiente per lo sviluppo del modello matematico. Ciò potrebbe verificarsi quando, per esempio, la decomposizione ulteriore comporterebbe FEP che rispecchiano consigli forniti dagli enti di consulenza (e quindi non c'è sviluppo al di sotto della FEP 'RADIO TOSSICITA'), o qualora una decomposizione ulteriore porterebbe solo a FEP, che non hanno bisogno di essere considerate (come la FEP INTRUSIONI UMANE DELIBERATE che sono escluse sulla base degli orientamenti degli organi di regolamentazione in materia di sicurezza dei depositi di rifiuti radioattivi [5]).

La strutturazione del MDD non è un'attività isolata, ma costituisce un elemento di un processo complessivo dello sviluppo del modello, e così saranno probabilmente effettuati cambiamenti ed aggiunte durante successive analisi di scenario e/o durante le attività di sviluppo del modello concettuale. In effetti, questa è una caratteristica della maggior parte delle fasi del processo di sviluppo del modello. I lavori successivi portano a nuove intuizioni e idee che devono aggiornare tutte le precedenti tappe (procedura di autoaggiornamento).

Pur verificando che i MDD fino ad oggi eseguiti si sono concentrati sull'indicatore di performance 'RISCHIO RADIOLOGICO' come top FEP, in futuri lavori altri indicatori di performance potrebbero essere scelti come top FEP tra i quali: la concentrazione di radionuclidi in matrici ambientali o i flussi di radionuclidi all'esterno del *near-field* e queste scelte comporteranno lo sviluppo di nuovi MDD.

Tuttavia, l'esperienza suggerisce che le informazioni necessarie per affrontare tali indicatori di performance possono essere generate utilizzando modelli di sviluppo esistenti per la valutazione dei rischi. Ad esempio, le concentrazioni di radionuclidi in corpi idrici superficiali, in geosfera e in biosfera sono stimati con moduli di software di valutazione del rischio già esistenti.

### 5.3.4 Classificazione dei FEP

La fase finale di sviluppo del MDD è la classificazione dei FEP. Questo processo è un precursore necessario per la fase di sviluppo di scenario. Ogni FEP può essere collocato in una delle due categorie, a seconda della stima sulla probabilità di essere considerato *attivo* nei tempi della valutazione.

Le due categorie sono le seguenti:

Sistemic	I FEP sistemic sono quelli che sono certamente esistenti o di cui si è certi che si verifichino durante i tempi della valutazione. La probabilità della loro esistenza o del loro verificarsi è pari all'unità. Esempi di FEP sistemic includono il decadimento radioattivo, l'assorbimento,...
Probabilistici	I FEP probabilistici possono o non possono esistere o verificarsi durante il periodo di riferimento della valutazione. La probabilità della loro esistenza o del loro verificarsi è minore dell'unità. Esempi di FEP probabilistici sono: eventi sismici, di perforazione accidentale nel deposito, il degrado di alcune delle barriere o delle tenute...

Come con tutti gli altri aspetti della costruzione del MDD, l'assegnazione di queste classificazioni è effettuata da gruppi di esperti.

La classificazione dei FEP in questo modo è il compito finale della fase di analisi dei FEP. Quando anche questa fase si è conclusa il MDD è in condizioni idonee a consentire l'inizio dell'analisi di scenario. Ciò comporta la definizione di uno scenario di base e una revisione dei FEP probabilistici per identificare scenari di variante, ognuna da esaminare successivamente. L'analisi di scenario segue una procedura sistematica, come descritto nella sezione seguente.

## 5.4. SVILUPPO DI SCENARI

Questa sezione descrive la metodologia NIREX per identificare e selezionare gli scenari. Presentando questioni riguardanti i concetti di base del concetto di scenario, la metodologia per

l'identificazione di scenari a partire da un MDD, le specifiche dei calcoli di valutazione, l'analisi e la presentazione dei risultati. Ulteriori dettagli, inclusa una dimostrazione della applicazione pratica del metodo, sono presentati in [6].

L'analisi e la presentazione adottata assicura un approccio prudente e ragionevole per il calcolo del rischio totale per i membri rappresentativi ed identificati di gruppi potenzialmente esposti PEGs. L'approccio rientra nella valutazione di tipo iterativo, come discusso nel § 5.1, ed ha quindi la flessibilità *in-built* di affinare e migliorare la rappresentatività dello scenario e le prestazioni del sistema di contenimento.

#### **5.4.1. Concetto di scenario**

L'effettiva evoluzione delle prestazioni del sistema non può essere conosciuta. Tuttavia, l'orientamento normativo [7] richiede che tutte le situazioni che potrebbero dar luogo a esposizione radiologica ai membri dei PEGs individuati devono essere tenuti in debita considerazione. Per affrontare questo problema NIREX ha adottato un approccio di valutazione basato su scenari. L'uso degli scenari ha il vantaggio che una serie di possibili evoluzioni del sistema e di situazioni di particolare interesse, tra cui quelle che portano ad una conseguenza estremamente grave con bassa probabilità di accadimento.

In termini semplici, uno scenario è una descrizione *a grandi linee* di una possibile evoluzione futura del sistema, posto che sia riconosciuto che la reale evoluzione futura non può mai essere conosciuta. Nel contesto di un approccio che utilizzi il MDD, uno scenario può essere specificato in termini di un insieme di FEP con le loro interazioni. Questo insieme di FEP può essere strutturato in una serie di modelli concettuali, che può essere utilizzato per definire i modelli matematici che devono essere sviluppati per seguire l'evoluzione del sistema relativa a quello scenario, così come discusso nel Capitolo 5.

La metodologia NIREX propone che la possibile evoluzione di un sistema di stoccaggio di rifiuti radioattivi può essere affrontato nei seguenti in termini:

- uno scenario di base che fornisce una rappresentazione ampia e ragionevole della naturale evoluzione del sistema e del suo ambiente circostante (include soli i FEPs sistemici);
- un certo numero di scenari che costituiscono varianti dello scenario di base e che rappresentano gli effetti di eventi probabilistici sul sistema e sul contesto (include i FEPs probabilistici).

Qualsiasi FEP non considerato nello scenario di base deve essere eliminato nella fase di screening dei FEPs (con una giustificazione per la loro irrilevanza o trascurabilità) o essere considerato all'interno di uno scenario di variante.

Considerare un FEP in uno scenario di variante non implica necessariamente la rappresentazione esplicita dello specifico FEP, infatti, molti FEP hanno un impatto equivalente sulle prestazioni del sistema. Potrebbe essere quindi possibile rappresentare un certo numero di FEP da un unico FEP *rappresentante*.

Per esempio, il degrado precoce delle tenute e la presenza di acqua, su larga scala, nella geosfera sono FEPs diversi, ma entrambi hanno l'analogo effetto di fornire una potenziale *percorso veloce* per i radionuclidi dal deposito alla superficie.

L'approccio agli scenari comporta una migliore comprensione di tutto ciò che è importante in termini di prestazioni del deposito e permette quindi di concentrarsi sugli aspetti più importanti per la sicurezza. In particolare, l'approccio NIREX di analisi degli scenari, seguendo un principio di cautela, mira a garantire che non venga trascurato nessun contributo per i potenziali rischi di contaminazione. Anche se tale cautela risulta appropriata, è altresì necessario che il rischio non sia sopravvalutato inutilmente, per esempio, sommando i contributi di rischio da scenari incoerenti, o sommando contributi di rischio quando questi non si possono verificare nello stesso momento.

Per consentire di intraprendere calcoli dettagliati, deve essere sviluppata una esaustiva rappresentazione dello scenario. Poiché per alcuni scenari ci possono essere diversi modi di comportamento del sistema, in questo caso sarà richiesto un insieme di *rappresentazioni* di scenario. Le rappresentazioni di uno scenario sono descrizioni più dettagliate sullo stato del sistema in base alle ipotesi dello scenario. Le descrizioni devono essere sufficientemente dettagliate per fornire una base per la modellazione numerica. Questi modelli saranno condurre a valutazioni di un rischio condizionale, definito come il rischio che dovrebbe essere sostenuto da un individuo di uno dei PEG identificati, se lo scenario dovesse verificarsi.

Come esempio, si consideri uno scenario relativo al verificarsi di eventi sismici. Il semplice riferimento a 'eventi sismici' non tiene conto del fatto che gli eventi sismici possono essere sia di magnitudo sufficiente per avere un effetto significativo sul campo di flusso delle acque sotterranee e, quindi, sul trasporto dei radionuclidi, sia di magnitudo tale da generare un minore, al limite trascurabile, impatto sul sistema. Questi due casi avranno bisogno di diversi trattamenti matematici, e così sono trattati come *rappresentazioni* separate dello scenario *eventi sismici*.

Un secondo esempio può essere lo scenario di perforazione, in cui una rappresentazione di questo scenario potrebbe essere quella relativa ad un pozzo di trivellazione che interessa direttamente il deposito, e una rappresentazione alternativa potrebbe essere quella di un pozzo di trivellazione sufficientemente distante dal deposito, ma tale da disturbare il campo di flusso delle acque sotterranee in prossimità del deposito.

Il trattamento degli scenari può richiedere la stima di una probabilità di accadimento o di una frequenza di eventi iniziatori. Tuttavia, poiché lo scenario è una descrizione a grandi linee del sistema, non sarà generalmente opportuno assegnare una probabilità di uno scenario. Questo può essere effettuato solo una volta che una rappresentazione di scenario è stata correttamente definita. Ad esempio è possibile stimare una frequenza per una perforazione di un particolare tipo, in una determinata zona e ad una gamma di profondità specificato.

Uno dei principali vantaggi dell'approccio NIREX è che richiede la valutazione solo delle probabilità di eventi per quelle rappresentazioni di scenario che contribuiscono in modo significativo al rischio giustificandone, quindi, il trattamento esplicito.

I rischi condizionali e le probabilità degli eventi associati con la rappresentazione dello scenario identificato, sono la chiave di una dettagliata valutazione delle prestazioni di un deposito.

#### 5.4.2. FEP-scenario e scenario-FEP

Per facilitare la definizione di uno scenario e l'identificazione degli scenari di variante è conveniente identificare due sotto classi dei FEPs probabilistici.

<i>FEP-scenario</i>	Un FEP probabilistico è un <i>FEP-scenario</i> se la sua ritenuta esistenza o la sua comparsa fa parte della definizione stessa dello scenario.
<i>Scenario-FEP</i>	Un FEP probabilistico è uno <i>scenario-FEP</i> , se è rilevante per la prestazioni del sistema solo con il verificarsi o con la ritenuta esistenza di uno o più <i>FEP-scenario</i> . Più FEP che definiscono uno scenario.

Un esempio aiuterà a illustrare queste definizioni.

Consideriamo il *FEP-scenario: Intrusione Umana - Trivellazione di un pozzo industriale*. Gli *scenario-FEPs* per questo scenario sarebbero quei FEPs probabilistici che diventano attivi in conseguenza delle operazioni previste per la perforazione. In questo caso *Estrazione di materiale durante la perforazione di un pozzo* è un possibile *scenario-FEP* che potrebbe portare ad un percorso di esposizione attraverso il contatto umano con il materiale estratto. La costruzione di un modello rappresentativo del sistema per questo scenario dovrebbe tener conto sia dello *scenario-FEP* che dei *FEP-scenario*, così come tutti i FEPs nello scenario base.

Le proprietà dei *FEP-scenario*, insieme ad altri fattori, determineranno l'appropriata *rappresentazione* dello scenario per la costruzione del modello di sistema. Qualsiasi FEP probabilistico incluso nel MDD ma escluso dalla scenario di base è potenzialmente etichettabile come un *FEP-scenario*.

Poiché la selezione dei FEPs deve essere oggetto di accordo durante le sessioni di elicitazione degli esperti, si richiede una comprensione globale del comportamento del sistema e la corretta stesura del MDD fornisce un quadro sistematico per individuare tutti i *FEP-scenario*, risultando molto utile come supporto decisionale.

Con riferimento agli elenchi di FEPs riportati e descritti in Appendice 2 e successive modifiche [4] il MDD della NIREX [8] classifica circa 200 FEPs probabilistici e di questi 32 sono classificati come *FEP-scenario*. I restanti FEPs probabilistici sono *scenario-FEPs*, che saranno rilevanti per le prestazioni del sistema in uno o più dei *FEP-scenario*. Alcuni dei *FEP-scenario* hanno caratteristiche simili in modo tale da raggrupparli in *classi* dove condividono caratteristiche comuni rilevanti per la modellazione matematica delle prestazioni del sistema.

Generalmente si definiscono sei diverse *classi* di *FEP-scenario*:

Classe 1	Scenario base
Classe 2	Perforazioni per sfruttamento di risorse
Classe 3	Scavi di grandi entità
Classe 4	Precoce degrado della barriere artificiali
Classe 5	Incidenti di criticità
Classe 6	Danni nella geosfera e nel sistema ingegneristico

I *FEP-scenario* possono essere catalogati in queste classi sulla base della condivisione di una o più delle seguenti caratteristiche comuni:

- modifiche delle caratteristiche comportamentali dell'uomo che perturbano il sistema;
- alterazione significativa delle forze motrici idrogeologiche;
- alterazione significativa dei percorsi idrogeologici;
- precoce degrado delle barriere artificiali;
- alterazione significativa caratteristiche di rilascio di radionuclidi (ad es: modifiche del termine sorgente);
- alterazione significativa delle caratteristiche di migrazione di radionuclidi (ad es: modifiche dell'assorbimento).

La *classe* può essere utile nel valutare le combinazioni di *scenario-FEP*, ai fini della definizione di scenario di variante, come illustrato in figura 5.6 Ulteriori dettagli sui FEP inclusi nell'ambito delle *classi scenario* possono essere trovati nel riferimento [6].

### 5.4.3. Lo scenario base

Ai fini della valutazione di sicurezza, è conveniente definire uno scenario particolare, che si chiama "*scenario di base*" o "*scenario base*". Lo scenario di base comprende tutti i FEP di sistema e qualsiasi FEP probabilistico che soddisfano i seguenti criteri:



- FEP probabilistico che verosimilmente risulta rilevante per le prestazioni del sistema o per il rischio annuo individuale per un periodo considerevolmente lungo della valutazione;
- il FEP può essere adeguatamente caratterizzato per evitare l'introduzione di distorsioni indebite nello scenario base

Un esempio di FEP probabilistico che è incluso nello scenario di base è la perforazione di pozzi per il funzionamento di un'azienda agricola. Infatti, poiché non è possibile dire che un pozzo agricolo è certo di essere costruito nel corso del periodo di valutazione, nella procedura di classificazione formale i pozzi agricoli sono rappresentati da uno o più FEP probabilistici. Tuttavia, si ritiene che la probabilità che un pozzo agricolo possa essere realizzato è sufficientemente alta che dovrebbe essere incluso nella definizione scenario base. Ciò è coerente con il principio di garantire che nessun contributo potenziale di rischio venga trascurato.

In totale, otto dei 32 *FEP-scenario* (vd. § 4.2) vengono assegnati allo scenario di base. Questi *FEP-scenario*, non saranno utilizzati per sviluppare scenari separati, ma saranno descritti dai modelli matematici sviluppati per valutare i rischi condizionali nello scenario di base. Ad esempio, pozzi locali di approvvigionamento idrico saranno inseriti nei modelli per la distribuzione di acqua nella biosfera e gli effetti tettonici e gli eventi sismici di piccole dimensioni saranno inclusi nei modelli di normale evoluzione della geosfera e del sistema ingegneristico.

Lo scenario base è destinato a fornire una rappresentazione ampia e ragionevole del "evoluzione naturale del sistema e del suo ambiente circostante". L'evoluzione naturale del sistema può essere perturbata, ma non rivoluzionata, da parte di alcuni fenomeni a bassa probabilità, che possono includere anche caratteristiche e abitudini dell'uomo. Per esempio, il pompaggio in grande quantità di acque da pozzi potrebbe perturbare il flusso di acque sotterranee, che influenzano il termine sorgente dei radionuclidi nel *near-field*, ed è escluso dallo scenario di base. Al contrario, la stessa operazione su piccola scala avrebbe poca influenza perturbante e, quindi, è incluso nello scenario di base.

Ai fini della valutazione, allo scenario di base è assegnata una probabilità unitaria. Una descrizione del campo di applicazione proposto dallo scenario di base, ottenuto utilizzando l'approccio di analisi FEP, è data in riferimento [8].

I *FEP-scenario* esclusi dallo scenario di base, per il fatto che essi non sono considerati parte dell'evoluzione del sistema naturale, sono inseriti nella valutazione di sicurezza come elementi dello scenario di variante. Tale posizione rispetta la strategia globale della metodologia che mira a rappresentare il possibile comportamento futuro del sistema di stoccaggio e il suo contesto ambientale, attraverso l'analisi dello scenario di base e una serie di scenari di variante.

Il campo di applicazione dello scenario di base è inizialmente individuato dalla classificazione de FEPs nel MDD. Secondo le indicazioni fornite nelle analisi degli impatti radiologici, per lo scenario di base, si devono individuare anche una serie di PEG, cioè gruppi di persone considerate potenzialmente a rischio dalla possibile contaminazione radiologica.

La valutazione di sicurezza relativamente allo scenario di base consente di ottenere la comprensione delle prestazioni del sistema nel contesto dello scenario di base e di identificare il PEG che risulta esposto al maggiore rischio. In un calcolo probabilistico di valutazione della sicurezza (in cui i parametri di sistema sono incerti e campionati da funzioni di densità di probabilità), questo valore del rischio sarebbe il valore medio di un membro rappresentante del PEG.

Nel giudicare la valutazione di sicurezza, saranno individuati quei FEP e gruppi di FEPs ai quali il livello di sicurezza (rischio) è più sensibile. Sarà necessario verificare che tali gruppi di FEP non siano in contraddizione e cioè che il loro concorrere sia realistico. In questa fase del ciclo di valutazione alcune combinazioni di queste FEPs giustificano ulteriori indagini al fine di migliorare la comprensione concettuale e ridurre le incertezze (vd. § 5.2.1).

In questo senso, l'esame della probabilità attesa del verificarsi di un particolare gruppo di FEP, che dà luogo a un elevato rischio calcolato comporta che, se questa probabilità è molto minore di uno, sarà opportuno eliminare la combinazione FEP dallo scenario di base e permetterne un inserimento ed un trattamento più dettagliato nel contesto di uno scenario di variante.

#### **5.4.4. Lo scenario variante**

Lo scenario base costituisce anche una piattaforma da cui possono essere derivati e costruiti gli “*scenari di variante*” o “*scenari variante*”. Uno scenario variante può essere considerato come lo scenario di base con l'inserimento di uno o più *FEP-scenari* (e i loro associati *scenari-FEPs*). Gli scenari variante possono essere considerati come *single-FEP* o *multi-FEP* varianti.

Al fine di valutare uno scenario variante, è necessario sviluppare una descrizione più dettagliata delle condizioni operative previste per lo scenario per definire l'ambito dei possibili risultati.

L'evoluzione del sistema in qualsiasi rappresentazione di un particolare scenario è influenzata dall'assemblaggio di FEP ad esso associati. Pertanto, il modello di sistema per una rappresentazione di uno scenario di variante sarà determinato dai FEP nello scenario di base, da ulteriori *FEP-scenario*, e dai *scenario-FEPs* associati.

In alcuni casi, si può riscontrare che i modelli matematici dettagliati di un tale sistema non saranno dissimili da quelli per lo scenario di base. E' inoltre previsto che in molte situazioni l'evoluzione del sistema può essere ricondotta allo scenario di base con l'attivazione di ulteriori *FEP-scenario*.

Ad esempio, uno scenario di variante associato al degrado precoce della barriere artificiali può dar luogo ad un iniziale aumento del rischio per poi ripristinare l'evoluzione relativa allo scenario di base, anche se con minor rischio a causa del precoce esaurimento dell'inventario del deposito. Al fine di effettuare una valutazione per le rappresentazioni degli scenari di variante, è necessario esaminare i rapporti tra i FEP-scenario ed il periodo temporale in cui si verificano. Nell'approccio attuale, questo è stato affrontato mediante il concetto di linea temporale (*timeline*). Una scala cronologica inizia con il verificarsi del FEP-scenario e comprende una serie di intervalli delimitati dal verificarsi o dall'esistenza di eventi specificati o processi (gli scenario-FEP connessi al FEP-scenario).

Ad esempio, la timeline associata alla costruzione e gestione di un pozzo potrebbe includere un periodo di perforazione del pozzo, un periodo di pompaggio del pozzo con disturbo del campo di flusso delle acque sotterranee e il periodo successivo abbandono del pozzo, successione di stati del sistema che devono essere tutti affrontati nella modellazione. Ulteriori dettagli sulla costruzione ed applicazione dei *timelines* sono riportati in [6].

Calcoli e giudizio di esperti svolgono un ruolo importante nell'individuare le migliori e appropriate rappresentazioni per gli scenari di variante. L'obiettivo è di concentrare l'attenzione su quelli che danno luogo ad un più alto rischio radiologico. Il rischio associato alla rappresentazione di uno scenario di variante è il prodotto del danno potenziale con la probabilità che si verifichi (cioè il peso attribuito alla rappresentazione dello scenario), dove il danno potenziale non può che essere valutato relativamente ad uno specifico PEG.

Per la visualizzazione e la valutazione dell'importanza relativa delle rappresentazioni degli scenari è stato sviluppato, come mezzo pratico, il concetto di *diagramma di rischio pesato*. La figura 5.7 mostra un diagramma illustrativo del rischio pesato, della rappresentazione di uno scenario di base e di una rappresentazione di scenario di variante. In questo contesto è importante ricordare che un *diagramma di rischio pesato* si riferisce ad un singolo, determinato PEG, quindi dovranno essere predisposti diagrammi distinti per ciascun PEG. I due assi del *diagramma di rischio pesato* visualizzano il potenziale danno associato con la rappresentazione dello scenario e la stima della sua probabilità di occorrenza. Queste due grandezze saranno oggetto di un certo grado di incertezza, e questo è indicato nello schema da una croce. Il centro della croce identifica la coppia di valori di danno e di probabilità che corrispondono alla loro *migliore stima* e la lunghezza dei bracci della croce riflettono le incertezze in dette quantità. In pratica, a causa di un approccio conservativo adottato nel valutare danni e probabilità condizionali, le incertezze si estenderanno in prevalenza al

di sotto dei valori di *migliore stima*, e quindi, nell'ambito della valutazione di sicurezza, si è ritenuto opportuno considerare i valori della *migliore stima*.

Tutti i FEPs nello scenario base si ipotizzano avere una probabilità di occorrenza pari all'unità. Si tratta di un'ipotesi prudente e conservativa, che costituisce il punto di partenza per il processo di valutazione di sicurezza. In realtà, con il passare del tempo la probabilità dello scenario di base si riduce: all'aumentare del periodo di analisi, è più probabile che uno o più scenari di variante si verifichino e quindi la probabilità dello scenario base diminuisce con il tempo. Tuttavia, con una semplificazione conservativa si suppone che le probabilità degli scenari rimangano al *valore massimo* per tutto il periodo di valutazione e il *diagramma di rischio pesato* viene usato per tracciare questa probabilità.

Nel *diagramma di rischio pesato* mostrato nella figura 5.7, lo scenario di base comporta un danno di picco di  $10^{-8}$ . Le varianti A, B e C sono esempi di rappresentazioni di scenari di variante con danni calcolati maggiori rispetto allo scenario base.

#### **5.4.5. Sussumere scenari**

Dei 32 FEP-scenario identificati, otto sono stati assegnati allo scenario di base e i restanti 24 vengono assegnati alle altre cinque classi scenario presi in considerazione come variante. Il numero di calcoli possibili è ulteriormente aumentato dalla necessità di considerare scenari che coinvolgono due o più FEP-scenario. Teoricamente, ci sono oltre 1024 possibili combinazioni ordinate dei 24 rimanenti FEP-scenario definiti nel MDD, senza considerare le ripetute occorrenze di uno stesso FEP-scenario.

Una riduzione del numero di combinazioni può essere ottenuta selezionando solo i casi ritenuti completi rappresentanti di ciascuna delle classi scenario. È necessario pertanto, sintetizzare le rappresentazioni del tipo di impatto relativo ad ogni FEP-scenario. Ad esempio, per quanto riguarda la Classe 2 la rappresentazione di una perforazione di pozzi d'acqua può essere considerata, in termini di rischio, come rappresentativa della classe. Questa operazione di riduzione per rappresentatività di FEP-scenario sarà generalmente effettuata sulla base del giudizio di esperti e su calcoli specifici e corrisponde all'operazione di sussumere (ricondere un concetto particolare ad una categoria più ampia che lo comprenda) i FEP-scenario sulla base del criterio di conservatività del rischio.

Tutte le decisioni in merito alle riduzioni di FEP-scenario si devono basare sul principio di cautela e devono essere pienamente giustificate. Ridurre diverse rappresentazioni di scenari ad un solo scenario di riferimento implica la valutazione della sua rappresentanza specifica in relazione ad una casistica più generale. Se la rappresentazione dello specifico scenario, presenta un rischio che è

simile o inferiore rispetto al caso generale, questo può essere inglobato nel caso generale. Ad esempio, qualsiasi scenario di variante con un rischio inferiore o uguale a quello dello scenario base può essere ricondotto nello scenario base. Questa assunzione sarà sempre di tipo conservativo, a prescindere dalla probabilità di accadimento per lo scenario variante, in quanto allo scenario di base è assegnata una probabilità unitaria di accadimento.

Allo stesso modo, qualsiasi scenario variante multi-FEP con un rischio inferiore o pari a quello derivante da almeno uno degli scenari varianti single-FEP, può essere inglobato e ridotto (sussunto) nello scenario variante single-FEP. Dal momento che la probabilità assegnata allo scenario variante single-FEP riguarda solo la probabilità di accadimento del FEP-scenario, sussumere è anche un'operazione di tipo conservativo, sulla base della teoria della probabilità che mostra:

$$P(A \text{ and } B) \leq P(A) \text{ per ogni } A \text{ e } B, \text{ dove } A \text{ e } B \text{ sono "eventi FEP-scenario"}$$

Un punto degno di nota è che la sussunzione non richiede che le rappresentazioni degli scenari debbano essere qualitativamente simili. Tuttavia, quando si opera una sussunzione di scenari con rappresentazioni qualitativamente diverse, occorre esaminare se lo scenario sussunto è potenzialmente in grado di causare un impatto significativo se combinato con altri FEP-scenario.

Sussumere assicura che i contributi al rischio totale non vengano persi. Quando una rappresentazione di scenario è sussunta, si assume che il rischio di tale rappresentazione è lo stesso della rappresentazione a rischio più elevato. Pertanto, le rappresentazioni di scenario sussunte sono contabilizzate conservativamente nell'ambito della valutazione, anche se non richiedono un trattamento esplicito. In tal senso, va ricordato, che si sussume sulla base dei rischi relativi ad un PEG particolare ed è possibile che una rappresentazione di scenario possa essere ricondotta ad un PEG, ma non ad un altro.

#### **5.4.6. Strategia per la valutazione di scenari**

La strategia prevista per la valutazione di scenari è illustrata nel diagramma di flusso in figura 5.8. Le valutazioni degli scenari comporta un'analisi dettagliata, a sua volta, per lo scenario di base, gli scenari variante single-FEP e scenari variante multi-FEP.

In ognuno di questi passaggi ci sono possibilità di revisione e perfezionamento dei dati, dei metodi utilizzati e anche del progetto del deposito. Il ciclo di valutazione per lo scenario di base, scenari single-FEP e multi-FEP variante sono illustrati in dettaglio nelle figure 5.9, 5.10 e 5.11, rispettivamente.

La strategia mira a identificare le rappresentazioni scenario che richiedono un trattamento esplicito e che possono essere sussunti in scenari più generali, fermo restando che tutto il lavoro di valutazione deve essere effettuata nel contesto degli orientamenti normativi [7].

Questo ciclo iterativo di valutazione per lo scenario di base è illustrato in figura 5.8. Ogni iterazione del ciclo è pensata per aumentare la confidenza nella comprensione delle prestazioni del sistema di smaltimento. Come già detto in precedenza, la metodologia NIREX mirerebbe a dimostrare che il rischio ricevuto da un membro rappresentante del PEG a più alto rischio nello scenario di base sia coerente con i requisiti normativi. Se il rischio relativo allo scenario di base non è coerente con i requisiti normativi, lo sviluppatore dovrebbe riconsiderare il concetto di deposito selezionato, ricercando il continuo accordo con i criteri emanati degli organismi di regolamentazione.

Dopo aver definito lo scenario di base, individuati i FEP-scenario e classificati nelle classi scenario, si utilizzano calcoli e giudizi di esperti per stimare i rischi e le probabilità per quelle rappresentazioni degli scenari varianti single-FEP che sono giudicati risultare a rischio maggiore, (vd. figura 5.10). A questo punto, se le rappresentazioni di scenario sono state trattate in misura sufficiente dai calcoli e dall'analisi qualitativa, potrebbe essere possibile sussumere gli scenari single-FEP in altri scenario, sia nello scenario di base o in un altro scenario variante single-FEP, se c'è sufficiente fiducia nel limite superiore della valutazione del rischio a lui associato.

Le rappresentazioni degli scenari rimanenti saranno quelle che necessitano di ulteriori indagini. Per queste rappresentazioni di scenario dovranno essere eseguite valutazioni più dettagliate, per esempio utilizzando specifici programmi probabilistici (alberi degli eventi, vd. Capitolo 3) , per calcolare il picco medio di rischio per ogni scenario variante di un membro di ciascuna PEG identificata. Tali valutazioni comprenderanno controlli di fattibilità e l'individuazione di fonti di incertezza. Se necessario, saranno intrapresi ulteriori lavori, ad esempio la ricerca per ridurre le incertezze nei parametri o nella metodologia, ed il ciclo di valutazione ripetuto, finché non vi sarà sufficiente fiducia nel rischio condizionale calcolato per ogni rappresentazione di scenario.

Se uno qualsiasi dei rischi valutati per le rappresentazioni di scenario variante single-FEP è minore o uguale a quello individuato per lo scenario di base (per il particolare PEG), la variante è inglobata nello scenario base.

Per ogni rappresentazione di scenario single-FEP variante non sussunto viene stimata la probabilità del suo verificarsi. Questa probabilità considera solo che sussistano il FEP-scenario ed i loro scenario-FEP associati. Quindi, viene calcolato il contributo annuo di rischio individuale per i PEG individuati nell'ambito della rappresentazione dello scenario. Se questo contributo al rischio non è considerato accettabile nel confronto con il target dei rischi normativi (tenendo presente che, in questa fase, è solo un contributo al rischio totale) sarà necessario esaminare se la progettazione del sistema di smaltimento può essere ottimizzato, in tal caso, il processo di valutazione deve ricominciare come fase di revisione del progetto. Se l'ottimizzazione del progetto non sembra possibile, o non riesce, lo sviluppatore dovrà rivedere la strategia generale, come descritto in precedenza per lo scenario di base.

E' quindi necessario considerare le combinazioni di FEP-scenario che portano a scenari di variante giudicati potenzialmente in grado di dar luogo a conseguenze radiologiche gravi. Questo processo avviene in modo analogo alla valutazione delle varianti single-FEP, come illustrato in figura 5.11.

Dato il numero potenzialmente elevato di combinazioni possibili per gli scenari varianti multi-FEP, è necessario seguire un approccio sistematico e pragmatico. Poiché all'aumentare del numero di FEP-scenario si riduce progressivamente la probabilità associata alla loro combinazione, inizialmente vengono considerate scenari varianti a due FEP, seguiti da varianti a tre FEP e così via, fino a quando le probabilità sono tali che i contributi al rischio totale diventa insignificante.

Per ogni rappresentazione di scenario variante multi-FEP, sono identificati e valutati i rischi ed eventualmente sussunti in una rappresentazione di scenario single-FEP, se la rappresentazione multi-FEP non produce una maggiorazione del rischio.

Dopo aver completato il processo di analisi di scenario, per determinare se la valutazione delle prestazioni soddisfa l'obiettivo di regolamentazione del rischio, è necessario tracciare i contributi annuali per il rischio individuale per ogni PEG in funzione del tempo per ciascuno degli scenari di variante, come mostrato schematicamente in figura 5.12. Sarà inoltre necessario presentare il rischio derivante dallo scenario di base.

Idealmente, in ogni istante, la somma del rischio associato allo scenario di base sommato ai rischi associati a tutti gli scenari di variante non sussunti deve sempre essere minore del target identificato dalle specifiche prestazionali del deposito.

Nella metodologia NIREX di generazione e gestione di scenari, allo scenario di base è stato assegnato un valore di probabilità conservativo pari a uno, quindi l'aggiunta degli scenari variante aumenterà la somma di probabilità di sopra dell'unità. Questo approccio cautelativo è stato adottato a causa della intrinseca incertezza associata alla stima delle probabilità per le rappresentazioni di scenario e per massimizzare il numero di rappresentazioni che possono essere sussunte nello scenario base.

Tuttavia, in pratica, in un dato momento, se uno scenario di variante è operativo, lo scenario di base non può essere attivo. Pertanto, quando lo scenario variante ha un rischio più elevato rispetto allo scenario base, rimane conservativo rimuovere la componente di probabilità associata alla rappresentazione dello scenario variante dallo spazio di probabilità dello scenario di base, che equivale a ridurre il peso associato allo scenario di base di quello assegnato allo scenario variante.

La giustificazione di ciò è illustrato in figura 5.13. La parte superiore della figura 5.13 illustra uno scenario di base e due varianti (V1 e V2), con valori del rischio condizionale  $R_b$ ,  $R_{V1}$  e  $R_{V2}$  al tempo

T. La parte inferiore della figura 5.13 presenta questi rischi (al tempo T) in un diagramma di rischio condizionale pesato con pesi, rispettivamente,  $P_b$ ,  $P_{V1}$  e  $P_{V2}$ .

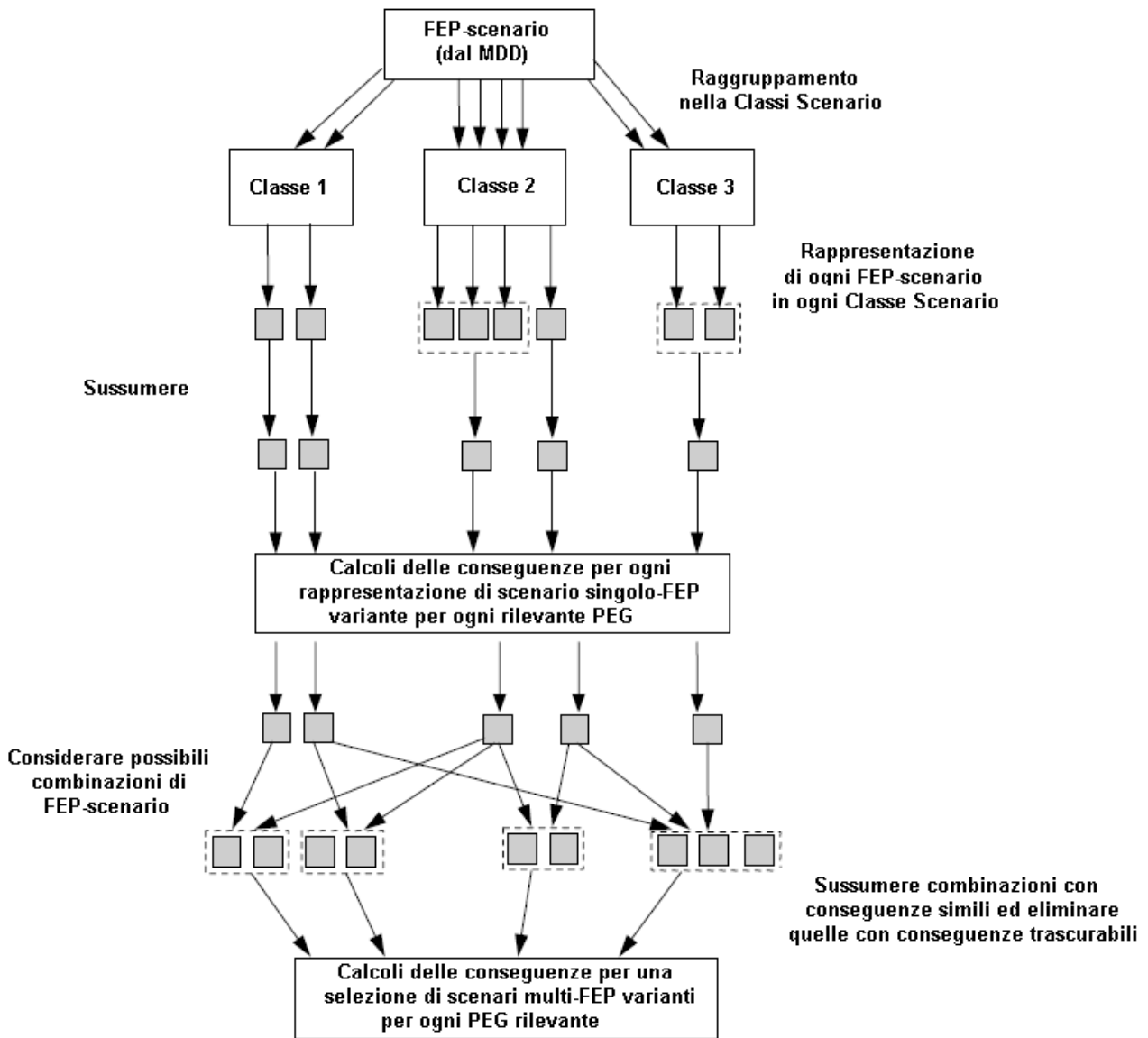
Dal momento che, usando la terminologia di diagramma di rischio pesato (al tempo T):

$$P_{V1} R_{V1} + (1-P_{V1}) R_b = P_{V1} (R_{V1}-R_b) + R_b \geq R_b$$

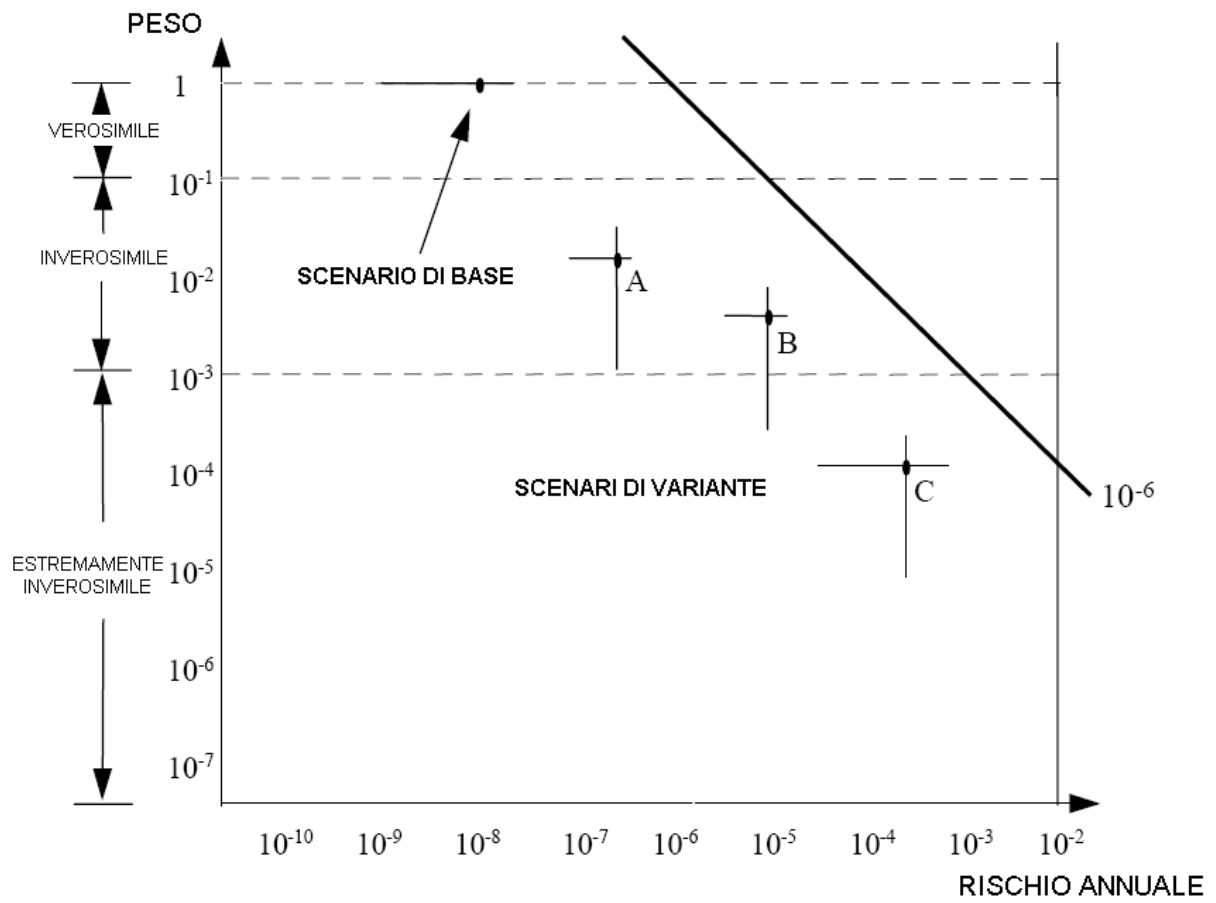
si deve osservare che è sempre conservativo riassegnare allo scenario di base lo spazio di probabilità assegnato a quello di uno scenario variante con un più alto rischio condizionale (in un determinato istante di tempo).

Questo processo può essere ripetuto per le varianti rimanenti per ottenere il contributo al rischio totale dallo scenario di base ad ogni istante di tempo. È importante notare che questo processo non è equivalente alla semplice riduzione della probabilità dello scenario di base alle probabilità assegnate agli scenari varianti, perché questo è un processo conservativo solo per quei tempi in cui uno scenario di variante ha un rischio condizionale più elevato rispetto allo scenario di base. Tutto questo assicura che la valutazione sia ancora conservativa e che i contributi al rischio che sono stati sussunti in precedenza non sono trascurati.

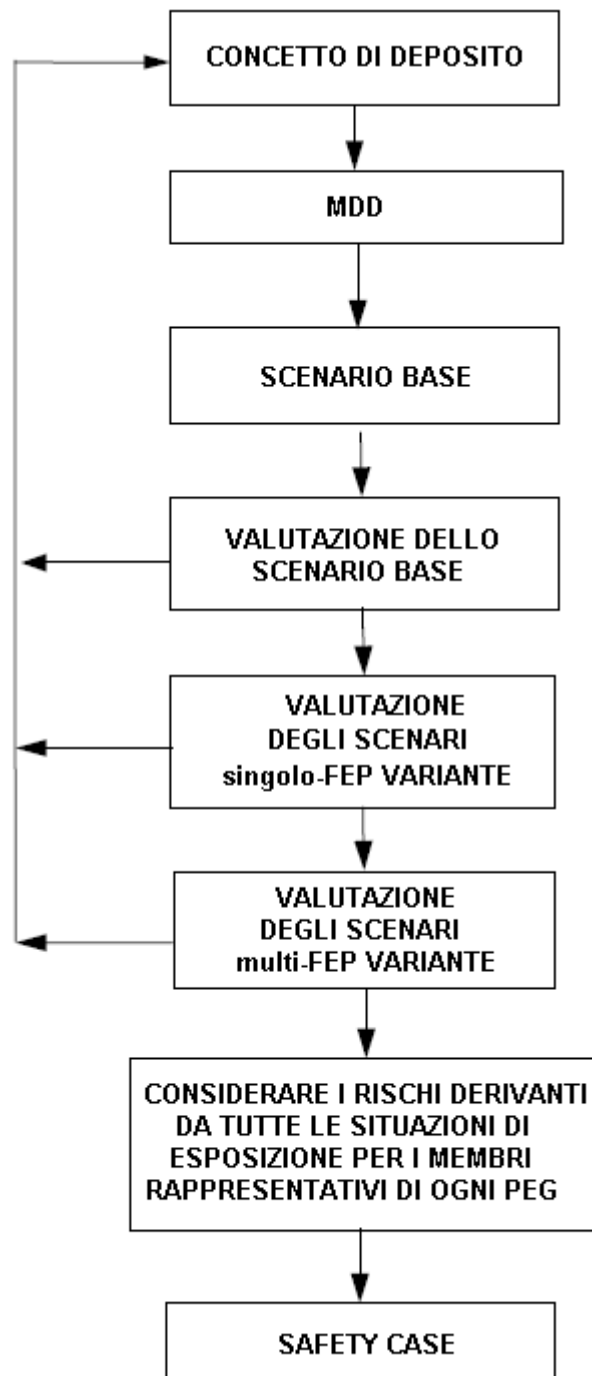




**Figura 5.6 - Diagramma illustrativo delle Classi Scenario e degli Scenari Variante**



**Figura 5.7 - Diagramma di rischio**



**Figura 5.8 - Strategia per la valutazione di scenario**

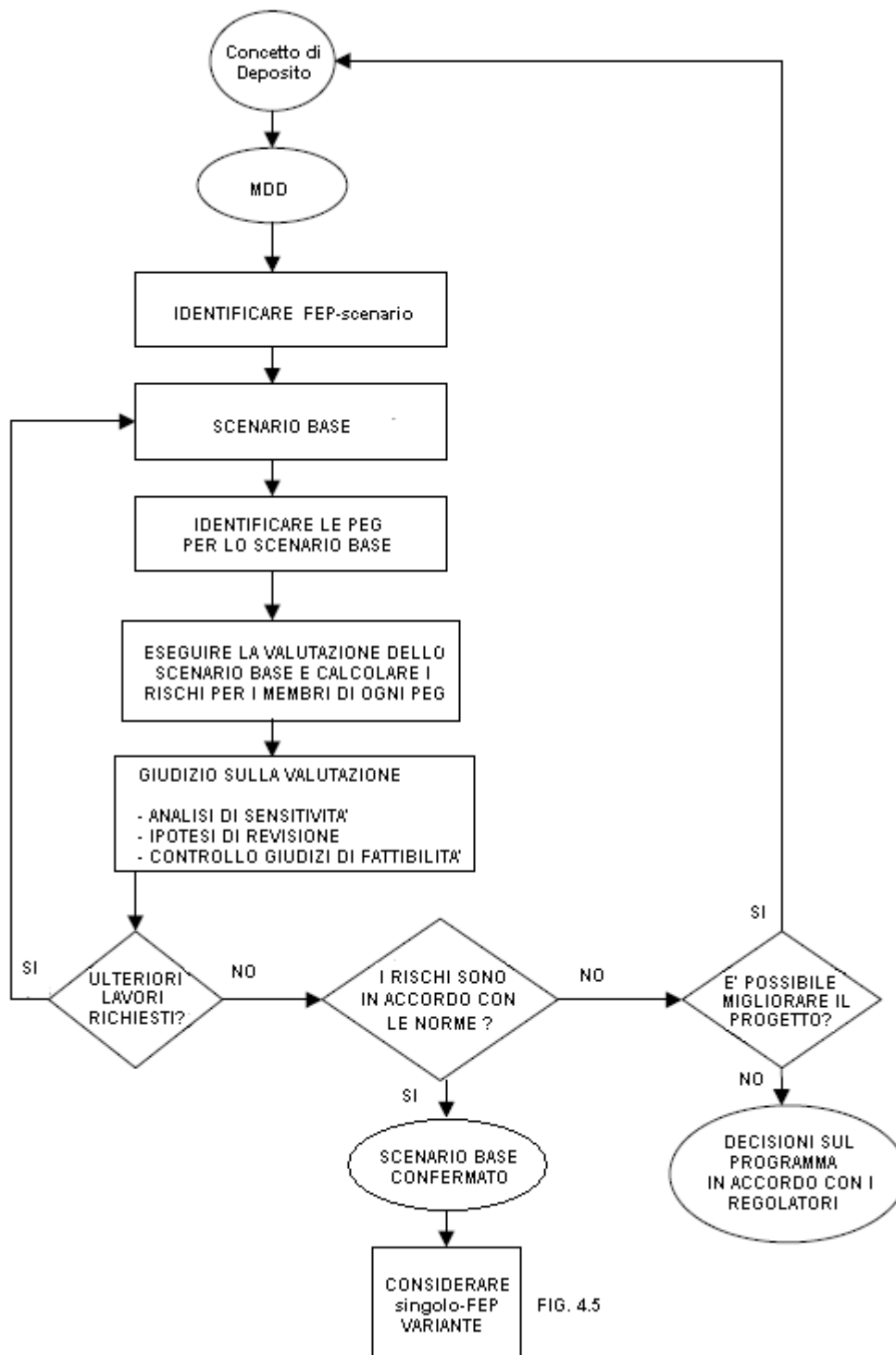


FIG. 4.5

**Figura 5.9 - Valutazione dello Scenario Base**

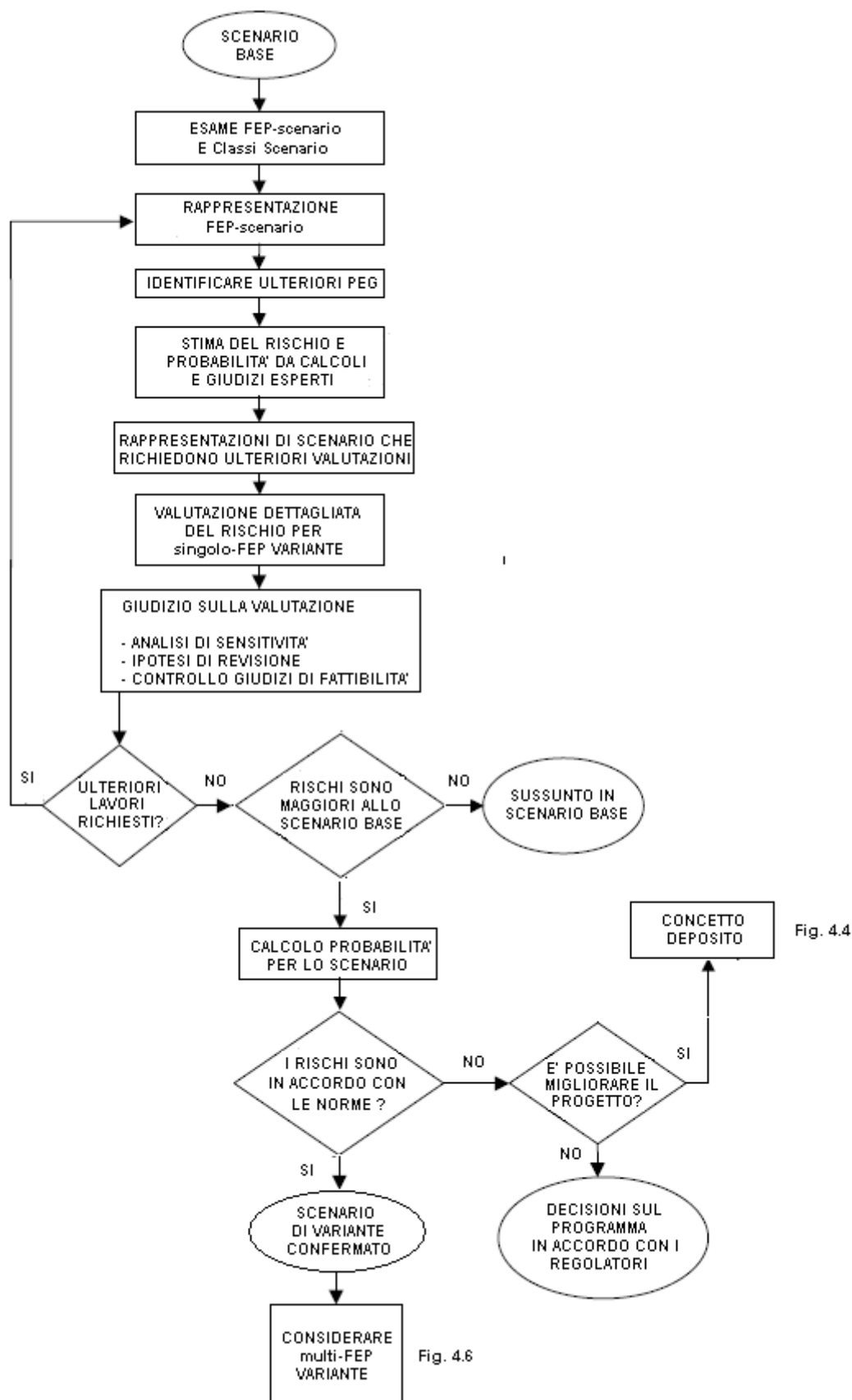


Figura 5.10 - Valutazione dei single-FEP variante

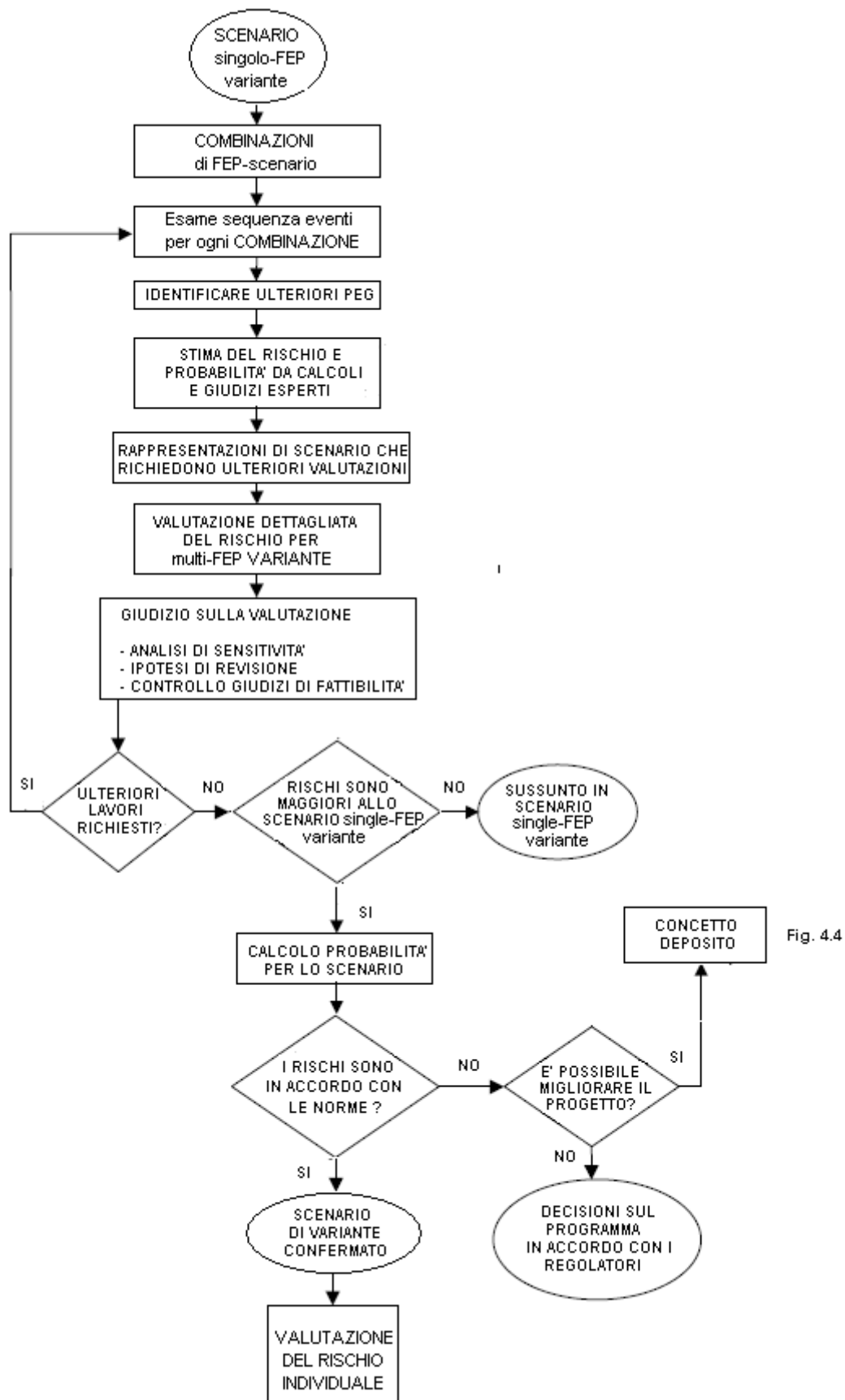
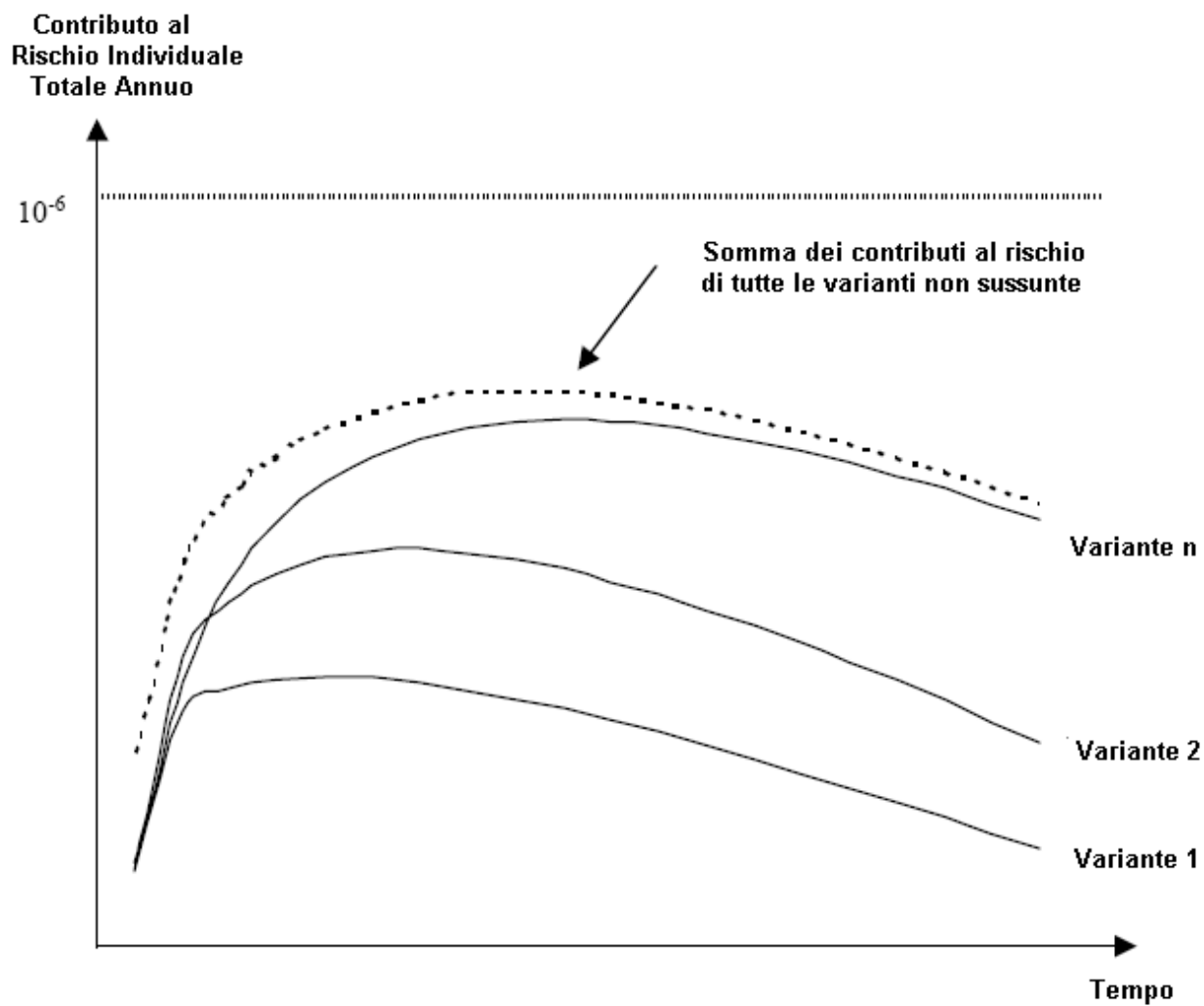


Figura 5.11 - Valutazione dei multi-FEP variante



**Figura 5.12 - Contributi al rischio delle rappresentazioni di scenari varianti per un membro di una specifica PEG**

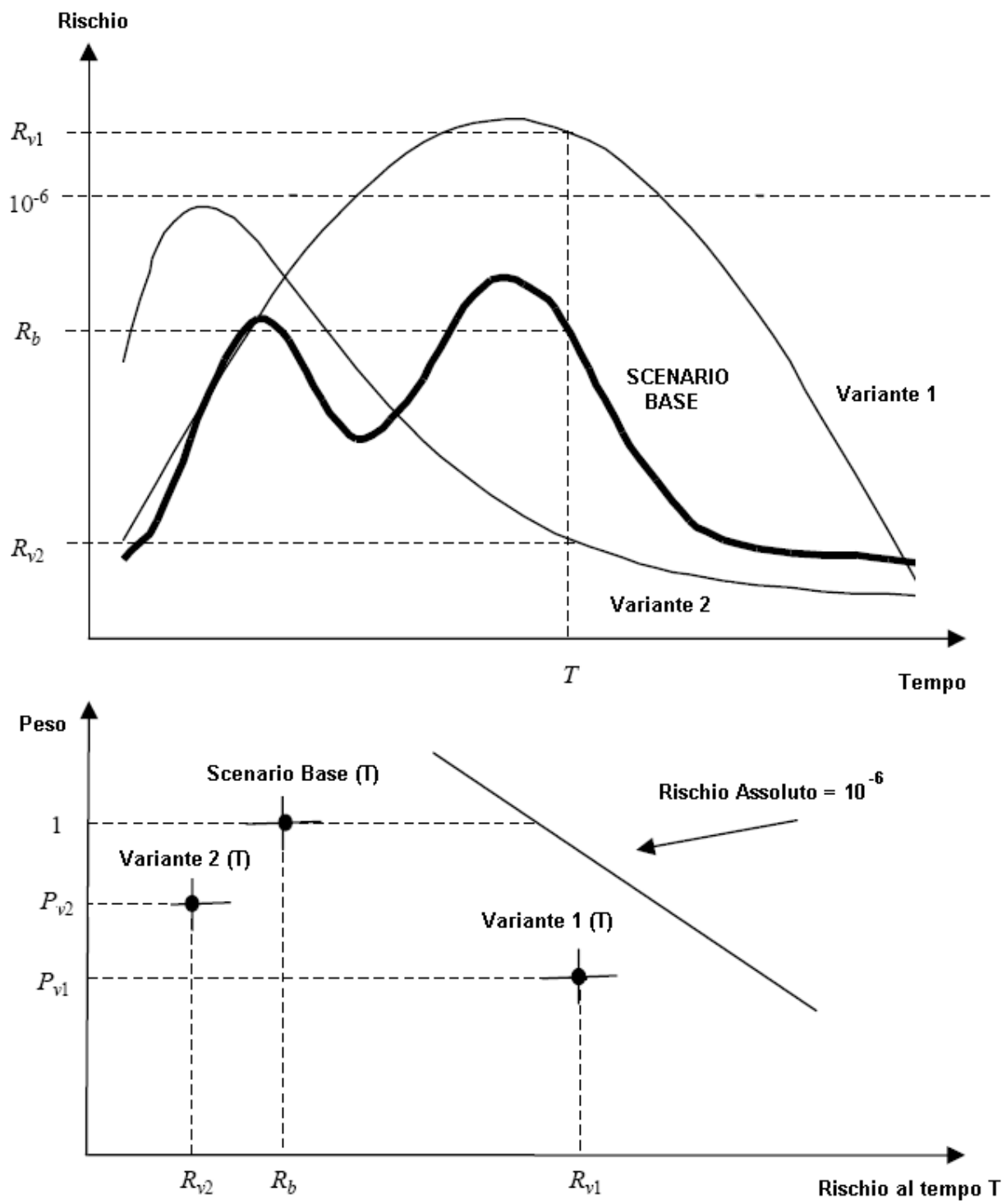


Figura 5.13 - Combinazioni del rischio di scenario



## 5.5. LO SVILUPPO DEL MODELLO CONCETTUALE

L'obiettivo dello sviluppo del modello concettuale è quello di ottenere una serie di modelli concettuali che descrivono particolari comportamenti del sistema di smaltimento, sotto le ipotesi e le condizioni definite nelle rappresentazioni di ogni scenario. I modelli concettuali forniscono informazioni sugli obiettivi del modello e delle sue interazioni con altre parti del sistema in modo sufficientemente dettagliato da costituire la base per lo sviluppo del modello matematico e del software.

E' molto probabile che, per valutare le conseguenze per ogni scenario, sarà necessario prendere in considerazione un numero considerevole di modelli concettuali. Ad esempio, il modello concettuale per il sistema di scorrimento delle acque sotterranee è fondamentale per i calcoli di valutazione di sicurezza. Il contenimento dei radionuclidi all'interno del sistema ingegneristico è un altro importante modello concettuale, che comporta la conoscenza di tutta una serie di processi e caratteristiche del progetto del deposito (ad es., contenitori dei rifiuti, incapsulamento, riempimento, isolamento, etc..). Inoltre questi modelli avranno ciascuno diversi livelli di complessità per la loro simulazione. Ad esempio, i modelli dettagliati del flusso delle acque sotterranee possono essere trattati in 2D o 3D ed i risultati di questi modelli sono incorporati in un modello di rete più semplice nel modello di valutazione globale del sistema.

L'obiettivo di sviluppo del modello concettuale è quello di utilizzare la completezza raggiunta nella fase di analisi FEP come base per individuare le principali FEPs e le interazioni tra FEP che richiedono una specifica rappresentazione nei calcoli di valutazione. Ove possibile, l'approccio modellistico è trattabile mediante il risultato ottenuto dal quadro di analisi dei FEP per giustificare dove possono essere adottate semplificazioni di modello o approssimazioni conservative.

I modelli di FEPs sono trattati in uno dei tre modi, di seguito riportati:

1. trattamento esplicito all'interno di un modello concettuale (come il flusso di acque sotterranee);
2. trattamento implicito attraverso un elemento della rappresentazione di modello (come ad esempio il trattamento dell'effetto combinato dei processi che danno luogo ad assorbimento di radionuclidi con un coefficiente di assorbimento);
3. trattamento sottoposto a giudizio di screening (come ad esempio il processo di diffusione termica in una miscela binaria che è ritenuto essere insignificante rispetto ai processi di trasporto).

Questa sezione descrive l'approccio sistematico da seguire per lo sviluppo del modello concettuale e fornisce una panoramica della sua applicazione pratica nello sviluppo di modelli concettuali per lo scenario di base. Ulteriori dettagli l'individuazione delle esigenze di modellazione per lo scenario di base si possono trovare nel riferimento [9].

### **5.5.1. Definizione del modello concettuale**

Prima di descrivere l'approccio allo sviluppo di modelli concettuali dal MDD, è opportuno ricordare la definizione adottata dalla IAEA (1993) per descrivere un modello concettuale [10]:

*“Un modello concettuale è un insieme di ipotesi qualitative usate per descrivere un sistema o un sottosistema per un determinato scopo. Come minimo, queste ipotesi riguardano la geometria e la dimensionalità del sistema, le condizioni iniziali e al contorno, la dipendenza temporale e la natura dei più rilevanti processi fisici e chimici. Le ipotesi devono essere coerenti tra loro e le informazioni disponibili nel contesto relativo allo scopo dato”*

I modelli concettuali sviluppati dall'analisi FEP sono formulate specificamente in termini di gruppi di FEP e delle loro interazioni nel MDD. Inoltre, i modelli concettuali sono sviluppati per identificare una specifica dei requisiti per la modellazione matematica. Così la definizione di un modello concettuale in questo approccio ha un accento leggermente diverso:

*“Un modello concettuale è una descrizione strutturata di elementi rilevanti per la prestazioni di un sistema o sottosistema, e le loro interazioni, utilizzata per definire i requisiti per la modellazione matematica. Come minimo, questi fattori riguardano la geometria e la dimensionalità del sistema, le condizioni iniziali e al contorno, la dipendenza temporale e la natura dei più rilevanti processi fisici, chimici e biologici. Le ipotesi devono essere coerenti tra loro e le informazioni disponibili nel contesto relativo alla valutazione di sicurezza”*

I modelli concettuali descritti in questo ambito forniscono un elenco di FEP e delle loro interazioni che devono essere inclusi nei modelli matematici. Questi modelli concettuali saranno utilizzati per sviluppare sia i modelli generali del sistema che modelli di ricerca più specifica e dettagliata delle componenti del sistema di smaltimento. Tuttavia, la distinzione tra i due tipi di modello non si evidenzia in questa fase del processo di sviluppo del modello, ma solo durante la fase di interpretazione e trattazione matematica dei FEP e delle loro interazioni (cfr. § 5.6). I modelli di ricerca sono utilizzati in programmi informatici dettagliati che in genere trattano una specifica componente del sistema di smaltimento.

### **5.5.2. Obiettivi dello sviluppo del modello concettuale**

Il MDD si basa sulla considerazione che il livello di dettaglio delle FEP sia sufficiente a costituire il punto di partenza per lo sviluppo del modello concettuale. Tuttavia, lo sviluppo completo del modello richiede che debbano essere prese in considerazione anche tutte le interazioni rilevanti tra diverse FEP. Un interazione tra due FEP indica che le proprietà di un FEP sono determinate (almeno in parte) da proprietà o da variazioni delle proprietà di un altro FEP.

Il processo può essere unidirezionale, nel senso che *FEP 'A' influenza FEP 'B'*, o bidirezionale in modo che le modifiche delle proprietà di un FEP, influenza l'altro FEP e viceversa. Un metodo conveniente per la rappresentazione di influenze tra FEP è quello di un diagramma a matrice, che consente un approccio più sistematico per considerare le interazioni rispetto ad un diagramma di influenza. Poiché l'elenco delle FEP è numericamente molto vasto, la possibilità di aggregare FEP che possono essere trattate insieme nella struttura del MDD evita il compito impossibile di esaminare separatamente ciascuna delle coppie di potenziali interazioni tra FEP.

Occorre quindi formulare una metodologia che fornisca uno strumento per tener conto delle possibili interazioni FEP ad un livello adeguato di dettaglio, ma senza perdere di vista il contesto completo del sistema.

Primo passo è lo sviluppo di una famiglia di diagrammi a matrice, dove ogni diagramma rappresenta le interazioni tra FEP all'interno di uno specifico componente del sistema di smaltimento e successivamente considerare le interazioni tra diversi componenti del sistema a livello di aggregazione tra componenti. Di contro, anche se questo approccio può essere utile per definire le interazioni all'interno di un componente specifico, non facilita l'identificazione delle interazioni tra FEP nei diversi modelli concettuali.

Spesso, all'interno di un diagramma a matrice viene adottato un approccio a metà strada tra quello di considerare o tutti i FEP o solo FEP al più alto livello di aggregazione. Il problema di considerare solo il livello più alto di aggregazione di FEP è che si rischia di trascurare importanti interazioni fra FEP costitutivi e altri componenti del sistema di smaltimento. Per esempio, il FEP *corrosione* contribuisce sia al livello più alto del FEP *contenimento fisico* sia al possibile fenomeno di generazione di gas all'interno del deposito.

Il MDD può essere utilizzato per definire modelli concettuali. Questi modelli concettuali possono poi essere esaminati in termini di impatto su altre componenti del sistema di smaltimento. I modelli concettuali possono essere combinati o inglobati in un altro, ma quando un modello concettuale è caratterizzato dall'esprimere un'influenza specifica sulle prestazioni del deposito, il suo diretto inserimento nello schema della matrice è da ritenersi giustificato.

Utilizzando l'esempio precedente del *contenimento fisico*, l'esempio può essere rappresentato da *perforazione contenitore* (definito come qualsiasi procedimento meccanico che violi l'integrità dei contenitori dei rifiuti, tra cui: i difetti di fabbricazione, i potenziali effetti negativi dello stress interno, corrosione,...).

L'obiettivo della fase di sviluppo del modello concettuale è quindi quello di identificare un insieme sufficiente di modelli concettuali dal MDD, che assieme con le loro interazioni, fornisce una

descrizione completa del sistema di smaltimento e della sua evoluzione futura. Questo insieme di modelli concettuali è quindi passato in rassegna per individuare quelli che presentano un'influenza significativa su altri elementi del sistema di smaltimento. Questo set ridotto di modelli concettuali costituisce infine la base di una *matrice di influenza*, che viene utilizzata per esaminare tutte le potenziali interazioni tra i modelli concettuali.

La *matrice di influenza* per i modelli concettuali fornisce un'indicazione delle interazioni che devono essere considerate nella valutazione dei modelli, anche se ad un livello superiore rispetto a quello del singolo FEP. Per raggiungere piena sistematicità, nella definizione dei requisiti di modellazione, quando si valutano le potenziali interazioni tra coppie di modelli concettuali è necessario essere consapevoli di tutti i FEPs considerati nell'ambito di ciascun modello concettuale.

### 5.5.3. Il concetto di diagramma a matrice

Nell'applicazione del diagramma a matrice (DM), i modelli concettuali selezionati sono posti sulla diagonale principale della matrice, e le interazioni sono considerati negli elementi fuori dalla diagonale.

L'influenza del modello nell'elemento di matrice  $(i, i)$  sul modello in  $(j, j)$  rappresenta un flusso di informazioni da  $(i, i)$  a  $(j, j)$ , ed è rappresentata dall'elemento fuori dalla diagonale  $(i, j)$ . Allo stesso modo, l'elemento  $(j, i)$  rappresenta l'influenza del modello in  $(j, j)$  sul modello in  $(i, i)$ , come mostrato nella figura 5.14.

L'interazione tra elementi di matrice può essere interpretata come un modello concettuale che fornisce informazioni in input ad un altro modello concettuale. Ad esempio, il modello concettuale del trasporto di radionuclidi nella biosfera avrà bisogno di ricevere informazioni sul flusso di radionuclidi che migrano dalla geosfera alla biosfera e questo sarà ottenuto da un modello concettuale di trasporto di radionuclidi nella geosfera, e quindi il modello concettuale di geosfera interagisce con il modello concettuale di biosfera.

Se si hanno  $(n)$  modelli concettuali da considerare, le possibili interazioni tra coppie di modelli concettuali saranno in numero di  $n \cdot (n-1)$ . Così, al crescere di  $n$ , il numero di interazioni che devono essere considerati diventa molto grande. Tuttavia, alcune interazioni saranno più importanti di altre. Per esempio, il flusso di radionuclidi dalla geosfera alla biosfera rappresenta chiaramente una interazione importante, che deve essere necessariamente inclusa nell'analisi del sistema di smaltimento. Tuttavia, molte coppie di modelli concettuali non avranno tra loro alcuna interazione, per esempio modelli dettagliati di *near field* non influenzano i modelli della biosfera. Nel DM sono registrate solo le influenze dirette. Tuttavia, le influenze indirette sono facilmente identificabili, per esempio, in figura 5.14 è mostrato come le informazioni dal CM1 al CM4 e dal CM4 al CM5, definiscano una interazione indiretta dal CM1 al CM5.

La complessità di alcune delle interazioni tra diversi CM presuppone una salda consapevolezza qualitativa nel contesto di tutto il sistema, prima della formulazione delle equazioni matematiche e della loro impostazione risolutiva. Per questo motivo, è preferibile sviluppare i modelli concettuali prima dei modelli matematici, per evitare di dover fare semplificazioni quantitative a uno stadio troppo precoce del processo di sviluppo del modello globale.

Quando si considerano le interazioni tra i modelli concettuali utilizzando il DM, si riconosce che alcune influenze sono molto più forti di altre. Nel rispetto dell'obiettivo di mantenere la completezza della rappresentazione, tutte le interazioni debbono essere considerate, sebbene sia riconosciuto che alcune non richiedano un trattamento dettagliato in una valutazione di sicurezza del deposito.

L'importanza o *forza* relativa di ogni interazione si indica inserendo un punteggio negli elementi fuori dalla diagonale della matrice. I punteggi, assegnati in base a *giudizi di esperti*, vanno da un valore 10 (l'interazione deve assolutamente essere inclusa in una valutazione di sicurezza del sistema di smaltimento) ad un valore pari a 0 (l'interazione può essere trascurata in una valutazione di sicurezza del deposito).

#### **5.5.4. Definizione dei CMs dal MDD**

Come per la costruzione del MDD e la deduzione di scenari, i modelli concettuali sono elicitati nel corso di riunioni di gruppi di esperti. La struttura gerarchica del MDD facilita l'elicitazione e lo sviluppo di modelli concettuali in modo sistematico.

Come accennato in precedenza, ogni modello concettuale è definito in termini di un certo numero di FEPs. Il processo di definizione di modelli concettuali significa lavorare sistematicamente dall'alto verso il basso attraverso il MDD, individuando ed etichettando (usando parole chiave) FEP che possono definire il campo di applicazione o lo scopo di un modello concettuale e che prendono il nome di FEP che definiscono un modello concettuale (CM-d FEP).

Per facilitare la visualizzazione di questo processo, si costruisce un diagramma di specificazione del modello concettuale (CMSD) che consiste in un insieme di piccoli schemi diretti, uno per ogni modello concettuale. Ciascuno di questi schemi ha solo due livelli. Il livello superiore è una rappresentazione del modello concettuale di per sé, con un numero diverso e il titolo, ad esempio 'CM 003: Clima'. Le CM-d FEPs sono disposte al di sotto e collegate al livello superiore (come illustrato in figura 5.15 per il modello concettuale del clima).

Il modello concettuale del clima è costituito da due CM-d FEP (*Clima: Globale* e *Clima: Locale*). Ciascuno dei due CM-d FEP è costituito da 4 FEP sottostanti, così l'ambito del CM clima nel MDD

(riportato in grigio in figura 5.15) prevede 10 FEP in totale. Questo insieme di FEP definisce il contenuto dettagliato del modello climatico.

Va notato che la struttura di rete del MDD comporta che alcuni FEP possano trovarsi all'interno del campo di applicazione di più di un modello concettuale NIREX ha messo a punto un software specifico (FANFARE) che consente di navigare nel MDD tenendo conto delle sottostrutture del CMSD e la posizione del CM-d FEP nel MDD. Così il CMSD fornisce un 'gateway' elettronico dal modello concettuale ai FEPs che si trovano nel suo ambito nel MDD e questo è il principale uso del CMSD. Come ulteriore esempio, la figura 5.16 mostra una parte dell'ambito del CMSD *near field*, individuandone i collegamenti nel MDD.

I legami tra i tre diagrammi utilizzati per lo sviluppo del modello concettuale, il MDD, il CMSD e il DM sono illustrati, per un sistema semplificato, in figura 5.17 Il CMSD per questo semplice sistema contiene solo tre modelli concettuali, ciascuno con un CM-d FEP. Questi CM-d FEP sono indicati anche nella sezione del MDD di figura 5.17, etichettati *in alto a destra* del box relativo all'appropriato FEP, dove, in basso a sinistra è riportato il campo di applicazione di ogni modello concettuale.

Dalla figura 5.17 si può vedere che il modello concettuale CM2 interagisce con il modello CM1, ed il modello concettuale CM3 interagisce con il modello CM2. Se entrambe le interazioni sono considerati importanti, a ciascuna di esse sarà dato un punteggio di 10. Il diagramma a matrice rivela anche che CM3 influenza indirettamente CM1, attraverso CM2.

L'approccio globale allo sviluppo del modello concettuale viene illustrato come un diagramma di flusso in figura 5.5. Ad oggi, il processo è stato applicato allo scenario di base, in futuro un processo simile sarebbe necessario utilizzarlo al fine di definire eventuali ulteriori modelli concettuali necessari per la rappresentazione degli scenari variante.

Seguendo la procedura sopra descritta, per il solo scenario di base, sono stati individuati un totale di 155 CM-d FEP. Con l'utilizzo di FANFARE, è possibile etichettare i CM-d FEP con parole chiave indicate e i FEP che giacciono sotto essi sulla MDD vengono poi assegnati all'appropriato modello concettuale propagando la parola chiave elettronica. Questi 155 CM-d FEP definiscono un totale di 106 modelli concettuali.

È conveniente, in questa fase di classificare questi 106 modelli concettuali in uno dei due gruppi:

- Livello 1 o *livello di valutazione*: modelli concettuali che riguardano specificamente la distribuzione e il trasporto di radionuclidi nel contesto del rischio radiologico (per esempio, il CM del flusso di radionuclidi nella geosfera).

- Livello 2 o *livello di processo*: modelli concettuali che si occupano di caratteristiche più dettagliate o processi che devono poter essere affrontati in vari calcoli (ad esempio, mutazioni di clima, l'assorbimento, gli effetti di radiolisi)

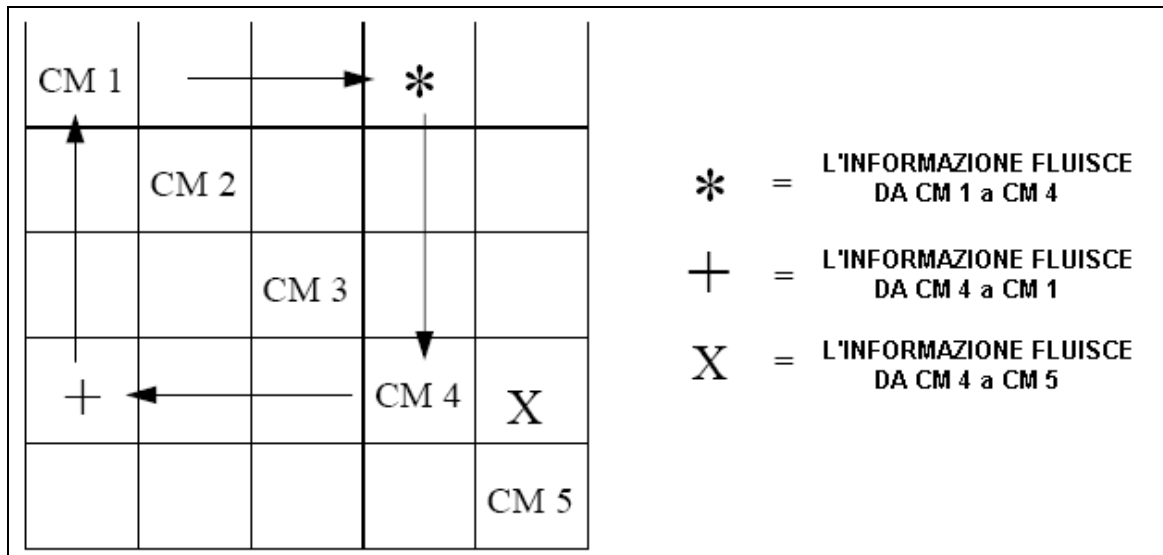
Un elenco dei modelli concettuali definiti dalla MDD di FANFARE, comprensivo della classificazione in 'livello 1' e 'livello 2', è riportato nelle tabelle 5.1 a-d.

### 5.5.5. Sviluppo del diagramma della matrice d'influenza

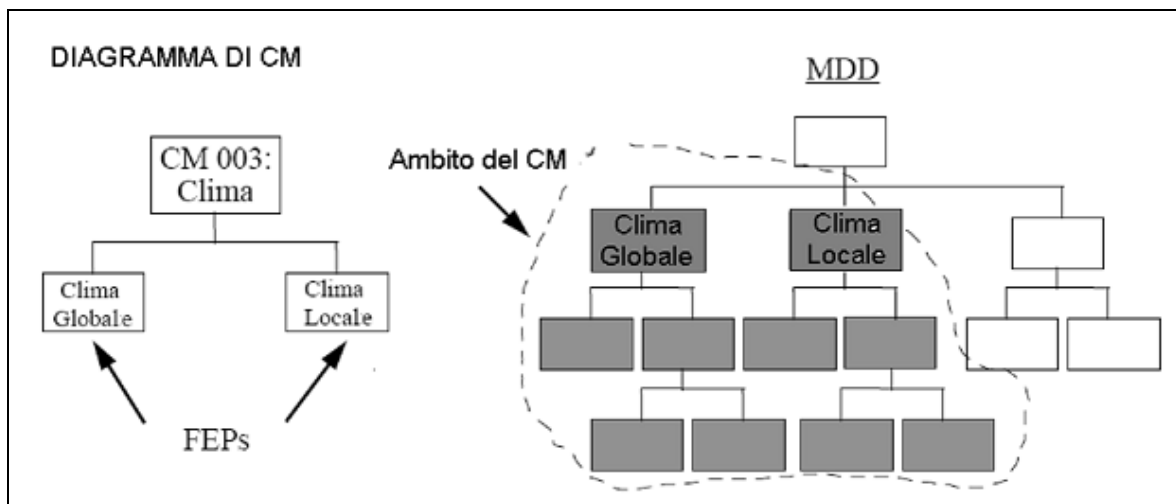
Non tutti i 106 modelli concettuali originariamente definiti nel MDD sono riportati nello schema di matrice. Il numero di modelli concettuali riportati, è stato ridotto raggruppando i modelli concettuali più strettamente correlati ed un totale di 57 dei 106 originali modelli concettuali sono stati riportati allo schema di matrice.. Una lista completa dei modelli concettuali derivanti dal MDD è indicato nelle tabelle 5.1. Le tabelle indicano anche come i modelli concettuali siano stati combinati ai fini dell'analisi del diagramma a matrice.

Una prima indicazione delle interazioni tra i modelli concettuali possono essere generati direttamente dal MDD attraverso funzioni specifiche di FANFARE, che può esportare tali interazioni in un foglio di calcolo per definire un diagramma a matrice. La matrice delle interazioni tra modelli concettuali, elettronicamente generati dal MDD, è stato poi esaminato da una serie di riunioni del gruppo di esperti. La matrice, composta di 57 elementi diagonali, rappresenta l'intero sistema *deposito*. Sulla matrice sono stati posizionati, in alto a sinistra, i modelli concettuali di 'livello 1' e, sotto di loro lungo la diagonale della matrice, i modelli concettuali di 'livello 2'. I modelli concettuali di 'livello 2' sono stati ampiamente raggruppate nel *near field* e *geosfera*, in modo che i gruppi di esperti del caso possano analizzare e sviluppare solo particolari regioni del diagramma matrice. Il gruppo di esperti, dopo aver esaminato le interazioni generate dal MDD a proceduto ad assegnare loro il punteggio (0-10) che riflettesse l'importanza di tale influenza come descritto nella sezione 5.16.

La figura 5.19 mostra un estratto della matrice (57x57) e una versione completa è fornita in riferimento [9]. Nel suo stato attuale di sviluppo, la matrice rappresenta un primo importante riferimento per la comprensione delle interazioni tra CM. In questo ambito, si segnala l'importanza di prevedere dei continui aggiornamenti della matrice, ad ogni ciclo di valutazione od ad ogni nuova valutazione di sicurezza.

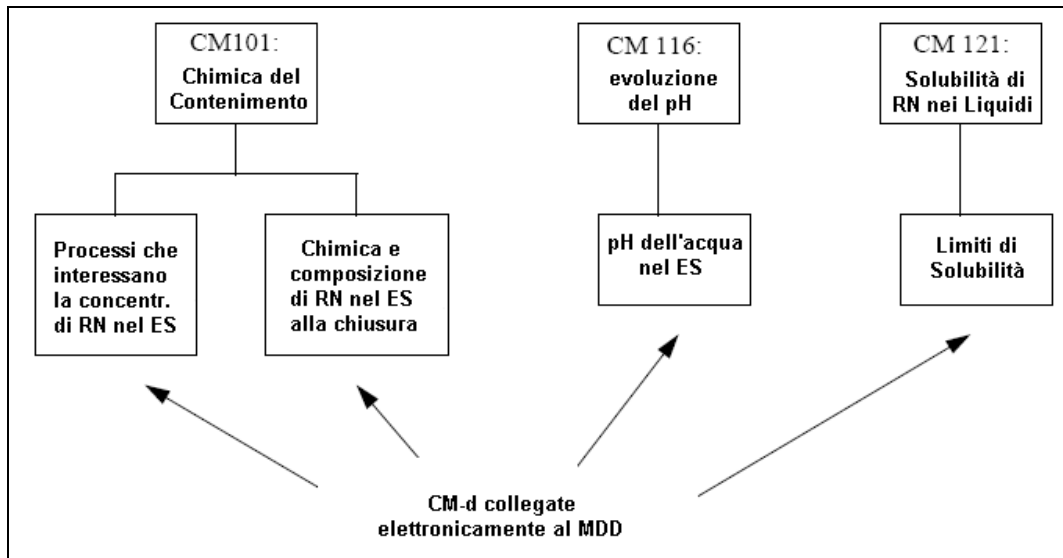


**Figura 5.14**

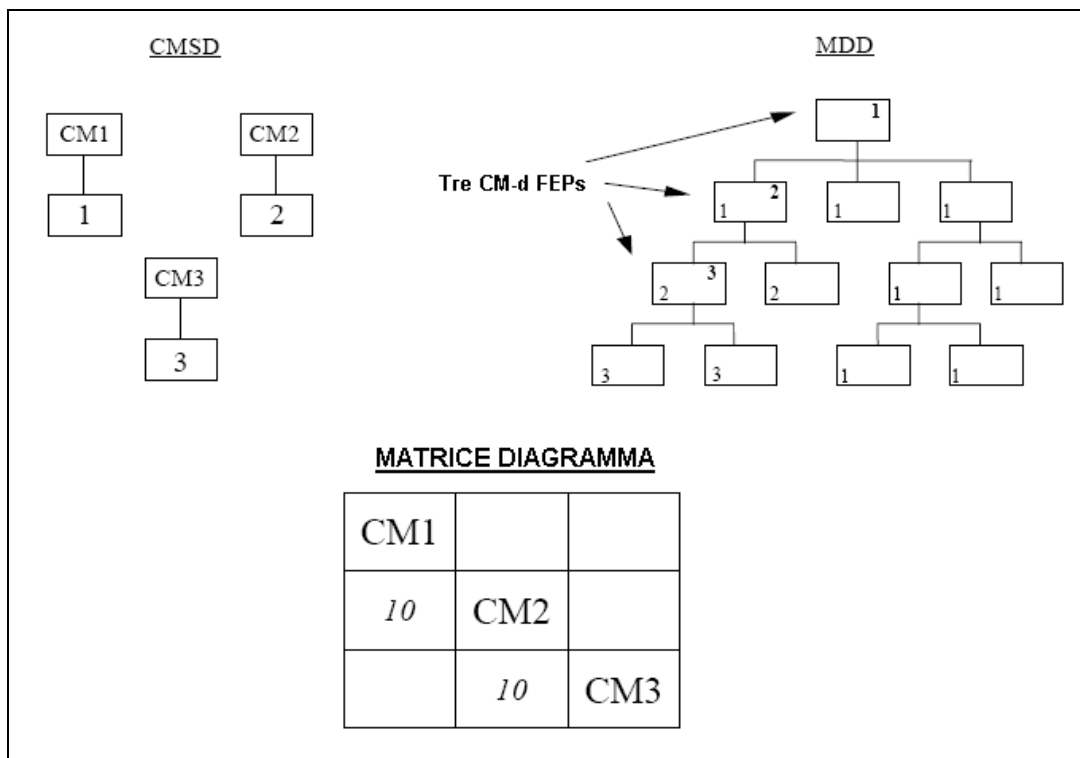


**Figura 5.15**





**Fig. 5.16**



**Fig. 5.17**

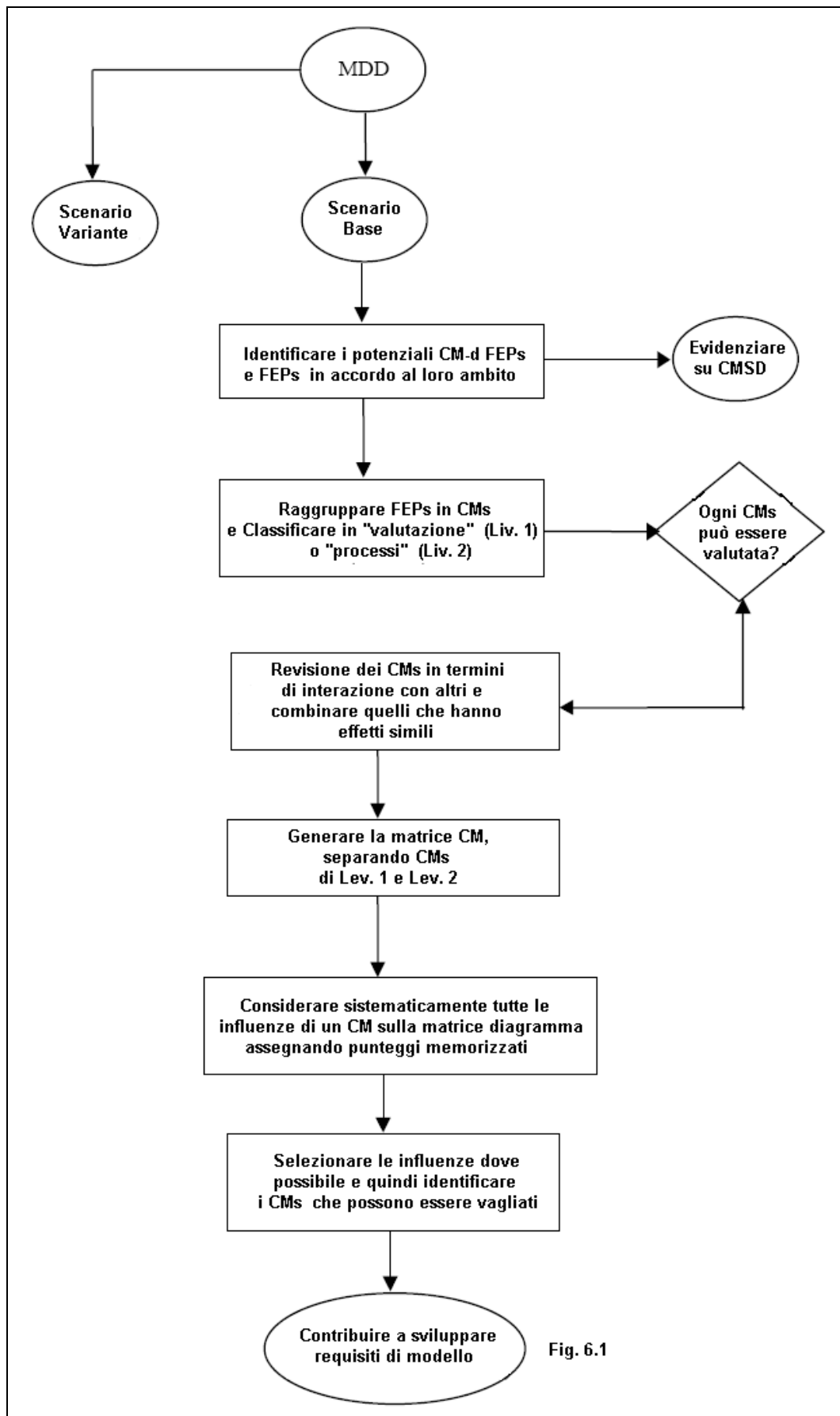
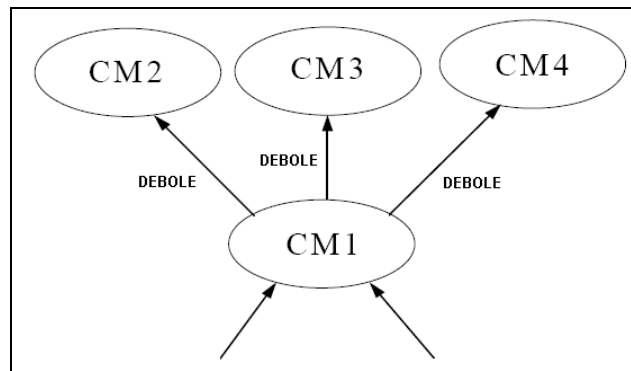


Fig. 6.1

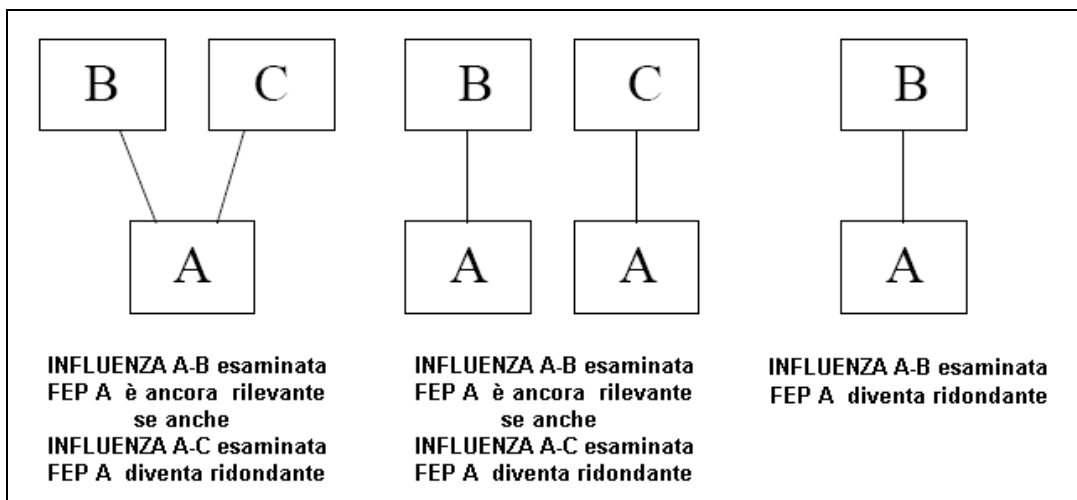
Figura 5.18

CM 207: Advection of Dissolved Species	10	0	0	0	0	0
0	CM 208: Dispersion of Dissolved Species	10	0	0	0	10
0	10	CM 209: Diffusion of Dissolved Species	10	0	0	10
0	0	0	CM 210: Rock Matrix Diffusion of Dissolved Species	0	0	10
10	10	0	10	CM 211: Groundwater Flow	2	0
0	10	0	10	10	CM 212: Hydrogeologica l Properties of Rock	0
10	10	10	10	10	0	CM 215: Properties of APL

**Figura 5.19**



**Figura 5.20**



**Figura 5.21**

Conceptual Model Number and Title	Comment	Component *			Level +		
		B	ES	G	L1	L2	Exc
CM 224: Freezing and Melting: Effects in Bulk	-			G		2	
CM 225: Effects of Chemically Disturbed Zone	Includes 226 & 227			G		2	
CM 226: Bulk Mineralogical Changes in CDZ	Included in 225						Exc
CM 227: APL Chemistry in CDZ	Included in 225						Exc
CM 228: Thermal Evolution of the Geosphere	-			G		2	
CM 229: Effects of Biologically Disturbed Zone	-			G		2	
CM 230: Transport of RN: Colloids and Suspended Particles	Included in 242						Exc
CM 231: Geochemical Properties of Rock	-			G		2	
CM 232: Spatial Variability of Geosphere Properties	Included in 211						Exc
CM 233: Transport Pathways in Geosphere	-			G		2	
CM 240: Transfer of RN between Liquid and Solid: Isotopic Dilution	Included in other models						Exc
CM 241: Mineralization: Recrystallization	Includes 221 & 902		ES	G		2	
CM 242: Advection of Suspended Particles	Includes 220 & 230		ES	G		2	
CM 251: Fluid Flow Induced by Bubbles	Included in 140						Exc
CM 252: Gas Pressure-driven Fluid Flow	Included in 140						Exc
CM 253: Geosphere Gas Balance	-			G		2	
CM 254: Gas Migration Pathways	-		ES	G		2	
CM 255: Transport of Gas through Bulk Solids	Includes 256 to 262		ES	G		2	
CM 256: Continuous Gas-phase Transport	Included in 255						Exc
CM 257: Gas Bubble Flow	Included in 255						Exc
CM 258: Trapping and Release of Bubbles	Included in 255						Exc
CM 259: Advection of Gas	Included in 255						Exc
CM 260: Dispersion of Gas	Included in 255						Exc
CM 261: Diffusion of Gas	Included in 255						Exc
CM 262: Effects of Aerosol on Gas Flow	Included in 255						Exc
CM 263: Effects of Chemical Reactions in the Geosphere	Included in other models						Exc
CM 264: Quantity of RN in Gas Phase	-			G	1		
CM 901: Microbial Behaviour	Included in 111						Exc
CM 902: Mineralization	Included in 241						Exc

Tabella 5.1 a

Conceptual Model Number and Title	Comment	Component *			Level +		
		B	ES	G	L1	L2	Exc
CM 111: Microbial Processes	Extended to include 222 & 901		ES	G		2	
CM 112: Redox Evolution	-		ES			2	
CM 113: Speciation of RN	Included in 117						Exc
CM 114: Degradation of Organic Materials	-		ES			2	
CM 115: Chemical and Physical Conditions in ES	Aggregation of 109, 110, 112 etc						Exc
CM 116: pH Evolution	-		ES			2	
CM 117: Chemical Speciation	Includes 113	B	ES	G		2	
CM 118: Characteristics of RN Solid Phase	-		ES			2	
CM 119: Sorption	-	B	ES	G		2	
CM 120: Formation and Presence of Colloids	-		ES	G		2	
CM 121: Solubility of RN in Liquids	-		ES			2	
CM 122: Pathways through ES as Engineered at Closure	Included in 135						Exc
CM 123: Container Failure	Includes 124 & 125		ES			2	
CM 124: Container Failure: Corrosion	Included in 123						Exc
CM 125: Container Failure: Internal Stress	Included in 123						Exc
CM 126: Corrosion	-		ES			2	
CM 127: Resaturation	-		ES			2	
CM 128: Transport of RN in ES: APL	-		ES		1		
CM 129: Transport Pathways within ES	-		ES			2	
CM 130: Flux of RN from ES: NAPL	Screened						Exc
CM 131: Decay and Ingrowth: RN	-	B	ES	G		2	
CM 132: Effects of Radiolysis	-		ES			2	
CM 133: Concentration of RN in Bulk Gas in ES	-		ES		1		
CM 134: Quantity of Bulk Gas in ES	Includes 136, 138 & 139		ES			2	
CM 135: Physical Conditions in ES at Closure	Extended to include 122		ES			2	
CM 136: Composition and Distribution of Gas Trapped in ES at Closure	Included in 134						Exc
CM 137: Flux of Bulk Gas from ES (Net)	Aggregation of 134 & 255						Exc
CM 138: Gas Generation and Consumption by Chemical Reactions in ES	Included in 134						Exc
CM 139: Gas Consumption by Chemical Reactions	Included in 134						Exc

**Tabella 5.1 b**

Conceptual Model Number and Title	Comment	Component +			Level +		
		B	ES	G	L1	L2	Exc
CM 140: Gas-driven Water Flow	Includes 251 & 252		ES	G		2	
CM 141: Partitioning between Phases in Bulk Solids	Aggregation of many other models						Exc
CM 199: Initial Conditions in ES at Repository	Aggregation of 107, 108, 135						Exc
CM 202: Transport of RN to Boundary in Geosphere: Liquid Phase	Aggregation of 205 & 206						Exc
CM 203: Transport of RN to Boundary in Geosphere: Solid Phase	Screened						Exc
CM 204: Transport of RN to Boundary in Geosphere: Gas Phase	-			G	1		
CM 205: Transport of RN to Boundary in Geosphere: NAPL	Screened						Exc
CM 206: Transport of RN to Boundary in Geosphere: APL	-			G	1		
CM 207: Advection of Dissolved Species	-		ES	G		2	
CM 208: Dispersion of Dissolved Species	-		ES	G		2	
CM 209: Diffusion of Dissolved Species	-		ES	G		2	
CM 210: Rock-Matrix Diffusion of Dissolved	-			G		2	
CM 211: Groundwater Flow	Includes 214, 216 & 232		ES	G		2	
CM 212: Hydrogeological Properties of Rock	-			G		2	
CM 214: Model for Density Variations	Included in 211						Exc
CM 215: Properties of APL	-		ES	G		2	
CM 216: Driving Forces Produced by Change to Pore and Fracture Volume	Included in 211						Exc
CM 217: Mechanical Behaviour of the Geosphere	-			G		2	
CM 218: Osmosis	-			G		2	
CM 219: Dissolution / Precipitation	-		ES	G		2	
CM 220: Transfer of RN between Liquid and Solid by Filtration	Included in 230						Exc
CM 221: Mineralization: Incorporation of RN	Included in 241						Exc
CM 222: Microbes in Geosphere	Included in 111						Exc
CM 223: Transfer of RN between Liquid and Solid by Nuclear Reactions	Screen						Exc

Tabella 5.1 c

Conceptual Model Number and Title	Comment	Component *			Level +		
		B	ES	G	L1	L2	Exc
CM 224: Freezing and Melting: Effects in Bulk	-			G		2	
CM 225: Effects of Chemically Disturbed Zone	Included 226 & 227			G		2	
CM 226: Bulk Mineralogical Changes in CDZ	Included in 225						Exc
CM 227: APL Chemistry in CDZ	Included in 225						Exc
CM 228: Thermal Evolution of the Geosphere	-			G		2	
CM 229: Effects of Biologically Disturbed Zone	-			G		2	
CM 230: Transport of RN: Colloids and Suspended Particles	Included in 242						Exc
CM 231: Geochemical Properties of Rock	-			G		2	
CM 232: Spatial Variability of Geosphere Properties	Included in 211						Exc
CM 233: Transport Pathways in Geosphere	-			G		2	
CM 240: Transfer of RN between Liquid and Solid: Isotopic Dilution	Included in other models						Exc
CM 241: Mineralization: Recrystallization	Includes 221 & 902		ES	G		2	
CM 242: Advection of Suspended Particles	Includes 220 & 230		ES	G		2	
CM 251: Fluid Flow Induced by Bubbles	Included in 140						Exc
CM 252: Gas Pressure-driven Fluid Flow	Included in 140						Exc
CM 253: Geosphere Gas Balance	-			G		2	
CM 254: Gas Migration Pathways	-		ES	G		2	
CM 255: Transport of Gas through Bulk Solids	Includes 256 to 262		ES	G		2	
CM 256: Continuous Gas-phase Transport	Included in 255						Exc
CM 257: Gas Bubble Flow	Included in 255						Exc
CM 258: Trapping and Release of Bubbles	Included in 255						Exc
CM 259: Advection of Gas	Included in 255						Exc
CM 260: Dispersion of Gas	Included in 255						Exc
CM 261: Diffusion of Gas	Included in 255						Exc
CM 262: Effects of Aerosol on Gas Flow	Included in 255						Exc
CM 263: Effects of Chemical Reactions in the Geosphere	Included in other models						Exc
CM 264: Quantity of RN in Gas Phase	-			G	1		
CM 901: Microbial Behaviour	Included in 111						Exc
CM 902: Mineralization	Included in 241						Exc

Tabella 5.1 d

## 5.6. BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 5

- [1] M. Kelly and D. E. Billington, *Conceptual Basis of the Master Directed Diagram*, Nirex Science Report S/98/010, 1998.
- [2] J. Locke and L. E. F. Bailey, *Modelling Requirements for Future Assessments Based on FEP Analysis*, Nirex Science Report S/98/012, 1998.
- [3] N. A. Chapman *et al*, *Systems Analysis, Scenario Construction and Consequence Analysis Definition for SITE-94*, SKI Report 95:26, June 1995.
- [4] T. J. Sumerling, *The NEA International FEP Database: Outcome of the Working Group*, In High Level Radioactive Waste Management, Proc. of 7<sup>th</sup> Ann. Int. Conf., Las Vegas, pp 317-319, 1996.
- [5] Environment Agency, Scottish Environmental Protection Agency and Department of the Environment for Northern Ireland, *Disposal Facilities on Land for Low and Intermediate Level Radioactive Wastes: Guidance on Requirements for Authorisation (Radioactive Substances Act 1993)*, HMSO, London, 1997.
- [6] D.E. Billington and L. E. F. Bailey, *Development and Application of a Methodology for Identifying and Characterising Scenarios*, Nirex Science Report S/98/013, 1998.
- [7] Environment Agency, Scottish Environmental Protection Agency and Department of the Environment for Northern Ireland, *Disposal Facilities on Land for Low and Intermediate Level Radioactive Wastes: Guidance on Requirements for Authorisation (Radioactive Substances Act 1993)*, HMSO, London, 1997.
- [8] J. Locke and L. E. F. Bailey, *Overview Description of the Base Scenario derived from FEP Analysis*, Nirex Science Report S/98/011, 1998.
- [9] J. Locke and L. E. F. Bailey, *Modelling Requirements for Future Assessments Based on FEP Analysis*, Nirex Science Report S/98/012, 1998.
- [10] IAEA, '*Radioactive Waste Management Glossary*', Vienna, 1993.



## 6. L'APPROCCIO BAYESIANO NELLE VALUTAZIONI DI SICUREZZA DI DEPOSITI SUPERFICIALI

### 6.1 INTRODUZIONE

Abbiamo visto nei capitoli precedenti che l'analisi del rischio di depositi di rifiuti radioattivi, come strumento sistematico delle valutazioni qualitative e quantitative di sicurezza, preveda la necessità di stimare la probabilità di occorrenza di un particolare scenario. Le informazioni riguardanti la probabilità del verificarsi di eventi rari, purtroppo, non sono numerose come si desidererebbe; di contro, le conseguenze di questi eventi rari possono essere stimate usando l'analisi ingegneristica basandosi sullo studio delle evoluzioni fisico-chimiche del sistema riguardo al fenomeno del trasporto dei radionuclidi dal deposito alla biosfera e con riferimento ai vari scenari possibili. Per attribuire una probabilità ad uno scenario si ricorre quasi esclusivamente al giudizio esperto, che diventa un'importante fonte di informazioni particolarmente utile per l'analisi di rischio.

### 6.2 METODOLOGIA PER L'ELICITAZIONE

Con lo scopo di rendere utilizzabile il giudizio esperto elicitato da diversi studiosi è necessario un modello matematico inferenziale per l'aggregazione e la combinazione degli eventi. Obiettivo della metodologia è l'integrazione della conoscenza a priori del decisore con il giudizio degli esperti relativo al confronto tra scenari diversi.

La stima delle probabilità per l'analisi di rischio è riconducibile alla probabilità incidentale associata al particolare fattore causale considerato. Questi modelli, spesso, sono chiamati *modelli causali* o modelli di probabilità incidentali.

Un modello causale permette la stima della probabilità incidentale annua in presenza di una determinata situazione o scenario. La conoscenza della probabilità incidentale annua (relativa a un caso specifico) associata al verificarsi del suddetto scenario aiuta ad identificare quali misure precauzionali debbano essere considerate per la prevenzione dell'incidente stesso.

Il modello probabilistico incidentale può essere formulato come:

$$\Pr(\text{Incidente} \mid \underline{X}) = \mathbf{P}_0 \exp(\underline{\beta}^T \underline{X}) \quad (1)$$

Dove  $\underline{X}^T = (X_1, \dots, X_\nu)$  è il vettore delle  $\nu$  variabili situazionali (causali) che descrivono lo scenario;  $\underline{\beta}^T = (\beta_1, \dots, \beta_\nu)$  è un vettore parametrico e  $\mathbf{P}_0$  è la probabilità di base.

Ogni variabile situazionale  $X_i$  è considerata una variabile vincolata che può essere sia di natura discreta che continua.

Si assume che ogni variabile  $X_i$  sia normalizzata in  $[0,1]$ . Questa normalizzazione permette una comparazione degli effetti tra variabili situazionali differenti con la variabile incidentale attraverso una comparazione tra gli elementi  $\underline{\beta}^T$ .

Valori positivi di  $\beta_i$  indicano che la probabilità incidentale aumenta esponenzialmente con  $X_i$  e viceversa.  $P_0$  può considerarsi la probabilità incidentale intrinseca con ciascuna variabile situazionale  $X_i$  settata a zero.

Le variabili continue, per l'elicitazione dei giudizi esperti, saranno discretizzate in un numero finito di step. Con  $s_i$  viene indicata la profondità di discretizzazione della variabile situazionale  $X_i$ . Il numero degli scenari differenti, che può essere descritto per mezzo di  $\underline{X}^T$ , è dato dal prodotto delle profondità di discretizzazione.

Chiaramente, il numero degli scenari differenti diverge quando il numero delle variabili situazionali  $\nu$  aumenta così come con la profondità di discretizzazione di ciascuna variabile situazionale, cioè  $s_i$ .

Dato che il giudizio esperto sarà principalmente usato per stimare la distribuzione di  $\underline{\beta}^T$ , nell'applicazione dell'equazione (1) si dovrebbero contenere sia il numero delle variabili situazionali  $\nu$  che per la profondità di discretizzazione per la variabile situazionale  $s_i$ .

### 6.2.1 La funzione di probabilità

Supponiamo che ad un esperto si chieda di comparare la probabilità incidentale nello scenario  $\underline{X}^T$  ( $X_1, \dots, X_\nu$ ) con lo scenario  $\underline{Y}^T$  ( $Y_1, \dots, Y_\nu$ ) indicando quanto sia preferibile trovarsi di fronte a uno scenario incidentale  $\underline{X}^T$  rispetto a quello  $\underline{Y}^T$  e che l'esperto risponda con il numero  $\tilde{y}$ .

Dall'equazione (1) si ottiene che:

$$\Pr(\text{Incidente} | \underline{X}) / \Pr(\text{Incidente} | \underline{Y}) = P_0 \exp(\underline{\beta}^T \underline{X}) / P_0 \exp(\underline{\beta}^T \underline{Y}) = \exp(\underline{\beta}^T (\underline{X} - \underline{Y})) = \tilde{y} \quad (2)$$

Passano al logaritmo naturale per entrambe i membri dell'equazione (2), si ottiene:

$$\text{Ln}(\Pr(\text{Incidente} | \underline{X}) / \Pr(\text{Incidente} | \underline{Y})) = \text{Ln}(\tilde{y}) \quad (3)$$

Inoltre, poiché l'uomo non è un valutatore perfetto, si può introdurre nel modello una particolare distribuzione. Per convenienza si assume che:

$$\text{Ln}(\Pr(\text{Incidente} | \underline{X}) / \Pr(\text{Incidente} | \underline{Y})) \sim \text{NORMAL}(\mu(\underline{\beta}), \sigma | \underline{X}, \underline{Y}) \quad (4)$$

$$\mu(\underline{\beta}) = \underline{\beta}^T \underline{Z}, \quad \underline{Z} = (\underline{X} - \underline{Y}), \quad \text{e } \sigma = C^E.$$

Il parametro  $C^E$  è chiamato coefficiente di calibrazione (vd. § 6.4) e rappresenta una misura della calibrazione dell'esperto; per esempio  $C^E$  è piccolo quando un esperto è ben calibrato e grande quando l'esperto non lo è. Il vettore  $\underline{Z}$  riassume la comparazione dello scenario  $\underline{X}^T$  e lo scenario  $\underline{Y}^T$ .

Una serie  $n$  di vettori differenza comprende una comparazione di  $n$  coppie che può essere riassunta in una matrice  $\underline{Z} = (\underline{Z}_1, \dots, \underline{Z}_n)$ . La risposta esperta  $\underline{Ln}(\underline{y})$  può essere riassunta in un vettore del giudizio,  $\underline{D} = (y_1, \dots, y_n)$  dove  $y_j = Ln(\underline{y}_j)$ .

La probabilità che un esperto risponda  $\underline{D}$  potrebbe derivare dall'equazione (4), come segue:

$$L\{\underline{D} | \underline{\beta}, C^E, \underline{Z}\} = \prod_{j=1}^n \frac{1}{C^E \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_j^2 - 2y_j \underline{\beta}^T \underline{Z}^j + \underline{\beta}^T \underline{Z}^j (\underline{Z}^j)^T \underline{\beta}}{2(C^E)^2}\right) \quad (5)$$

Inoltre,

$$L\{\underline{D} | \underline{\beta}, C^E, \underline{Z}\} \propto \exp\left(-\frac{\sum_{j=1}^n y_j^2 - 2\underline{\beta}^T \left(\sum_{j=1}^n y_j \underline{Z}^j\right) + \underline{\beta}^T \left(\sum_{j=1}^n \underline{Z}^j (\underline{Z}^j)^T\right) \underline{\beta}}{2(C^E)^2}\right) \quad (6)$$

da cui:

$$L\{\underline{D} | \underline{\beta}, C^E, \underline{Z}\} \propto e^{-\left(\frac{1}{2} \underline{\beta}^T A \underline{\beta} - \underline{b}^T \underline{\beta} + c\right)} \quad (7)$$

dove:

$$A = \frac{1}{(C^E)^2} \sum_{j=1}^n \underline{Z}^j (\underline{Z}^j)^T \quad (8)$$

$$\underline{b} = \frac{1}{(C^E)^2} \left(\sum_{j=1}^n y_j \underline{Z}^j\right)^T \quad (9)$$

$$c = \frac{1}{2(C^E)^2} \sum_{j=1}^n y_j^2 \quad (10)$$

Da notare che nella equazione (8)  $A^T=A$  da cui si evince che la matrice  $A$  è simmetrica. Inoltre, per  $\underline{x} \neq \underline{0}$  si ha :

$$\underline{x}^T A \underline{x} = \underline{x}^T \left( \frac{1}{(C^E)^2} \sum_{j=1}^n \underline{Z}^j (\underline{Z}^j)^T \right) \underline{x} = \frac{1}{(C^E)^2} \sum_{j=1}^n (\underline{x}^T \underline{Z}^j)^2 > 0$$

## 6.2.2 La metodologia di elicitazione

Il giudizio esperto è un'importante risorsa da utilizzare nell'analisi di rischio a supporto delle valutazioni di sicurezza e, al tempo stesso, una fonte di dati sulle prestazioni dell'impianto soggetta a continuo aggiornamento. Abbiamo visto come la fase decisionale (tipo di deposito, sito di localizzazione) è fortemente supportata dal giudizio esperto. Normalmente sono sette i passi fondamentali da considerare quando il *decision maker* è chiamato ad elicitare il giudizio esperto rispetto al livello di conoscenza precedente:

- P1 - Preparazione della procedura di elicitazione.
- P2 - Elicitazione del giudizio esperto (Comprendente la calibrazione).
- P3 - Estrazione della distribuzione a priori del decisore.
- P4 - Calcolo della distribuzione esperta a posteriori.
- P5 - Diagnosi del giudizio esperto.
- P6 - Selezione degli esperti.
- P7 - Combinazione dei giudizi esperti.

suddivisi in due fasi che attuano il modello matematico proposto:

- F1 - La fase di elicitazione (comprende P1 e P2)
- F2 - La fase combinatoria (comprende i restanti 5 passi)

La procedura di elicitazione implica l'identificazione dell'appropriata variabile situazionale per la modellazione del sistema e la scelta dello strumento di valutazione. Si determinano quanti  $v$  e quali variabili situazionali bisogna considerare per studiare il sistema. Dopo aver identificato le variabili situazionali il gestore e l'analista lavorano insieme per cercare di determinare come definire ciascuna delle variabili. Le variabili situazionali, generalmente, sono definite dal loro stato e il numero degli stati indica il grado di discretizzazione. Il desiderio di aumentare la discretizzazione si riflette nell'aumento della complessità del modello e questo aspetto deve essere attentamente valutato.

Ogni quesito consisterà in una coppia di scenari che differiranno soltanto in una dimensione (per esempio solo una variabile situazionale cambierà stato). Gli esperti, usando la scala Likert<sup>13</sup> a 9 punti, possono giudicare quale scenario avrà l'effetto migliore/peggiore sulla performance del sistema. Queste coppie di scenari sono compresse in un singolo vettore differenza  $\underline{Z}$  sottraendo il primo vettore scenario dal secondo. ( $\underline{Z}$  conterrà zeri in tutte le variabili situazionali eccetto per la differente dimensione tra i due scenari). Tutti i vettori differenza saranno inseriti nella matrice  $Z$ , che rappresenta la base di un questionario da sottoporre alla valutazione esperta.

Gli esperti comparano coppie di scenari (definiti dalla loro differenza vettoriale  $\underline{Z}$ ) e giudicano la probabilità relativa per un specifico in una particolare modalità di guasto; per esempio, un esperto potrebbe valutare che il primo scenario sia due volte preferibile al secondo. Questa risposta sarà registrata come **-2**. Questo segno rappresenta quale scenario è preferibile. Una risposta **1** indicherà indifferenza tra i due scenari.

Per valutare la modalità con cui gli esperti giudicano i vari scenari, Cooke (1991) ha introdotto il criterio di *calibrazione*, dove viene usato un coefficiente di calibrazione per indicare in che “senso” la risposta dell'esperto è corretta. Questo procedimento si applica per ogni esperto e per ogni quesito; il segno degli elementi diversi da 0 del vettore differenza  $\underline{Z}$  e il segno della corrispondente matrice (trasformata) del giudizio dell'esperto di  $D$  sarà comparato e un indicatore sarà assegnato nel modo seguente:

$$I = \frac{|D * Z|}{(D * Z)}$$

La somma di tutti gli indicatori ottenuti da tutte le domande (questions) fornisce il coefficiente di calibrazione degli esperti:

$$C^E = \frac{\left| n - \sum_{i=1}^n I_i \right|}{n} \quad (11)$$

Il coefficiente di calibrazione  $C^E$  ha un range che varia da [0,2]; un esperto con un alto grado di calibrazione avrà un basso valore di  $C^E$ ; un esperto mal calibrato avrà un valore maggiore di 1.

---

<sup>13</sup> La **scala Likert** è una tecnica psicometrica per la misura dell'[atteggiamento](#). Tale tecnica si distingue principalmente per la possibilità di applicazione di metodi di analisi degli item basati sulle proprietà statistiche delle scale di misura a intervalli o rapporti. Tale tecnica consiste principalmente nel mettere a punto un certo numero di affermazioni (tecnicamente definite item) che esprimono un atteggiamento positivo e negativo rispetto ad uno specifico oggetto. La somma di tali giudizi tenderà a delineare in modo ragionevolmente preciso l'atteggiamento del soggetto nei confronti dell'oggetto. Per ogni item si presenta una scala di accordo/disaccordo, generalmente a 5 o 7 modalità. Ai rispondenti si chiede di indicare su di esse il loro grado di accordo o disaccordo con quanto espresso dall'affermazione. Questo metodo è applicabile sia per atteggiamenti di tipo unidimensionale che multidimensionale (per cui sono necessarie tecniche statistiche come l'[analisi fattoriale](#) o l'[analisi delle componenti principali](#)).

Prima che possa iniziare qualsiasi combinazione, il gestore, o il decisore, deve fornire delle indicazioni sia sulla variabile situazionale che sulla non certezza dei giudizi. Nei casi in cui, comunque, c'è la conoscenza a priori, questa informazione dovrebbe essere usata nel modello, così che tutte le sorgenti dell'informazione siano valutate. La distribuzione a priori del decisore avrà la dimensione del vettore valore principale  $m$ .

La conoscenza del decisore può essere estratta in vari modi:

- attraverso studi precedenti del sistema in esame;
- attraverso statistiche generali adattate all'applicazione in esame;
- attraverso l'elicitazione del giudizio esperto del decisore.

Come già detto precedentemente, non tutti gli esperti riescono a fornire informazioni che sono ugualmente utili, dato che alcuni potrebbero aver mal interpretato le istruzioni del processo di elicitazione e ci potrebbe essere sempre la possibilità che gli esperti possano non esserlo per determinati casi. Il coefficiente di calibrazione dell'equazione (11) può usarsi per diagnosticare la calibrazione dell'esperto.

### **6.3 L'AGGIORNAMENTO BAYESIANO DEI PARAMETRI ELICITATI**

Nel caso specifico dell'applicazione all'analisi di sicurezza di depositi superficiali per rifiuti radioattivi, l'approccio bayesiano al processo di elicitazione deve prendere in considerazione i parametri caratteristici del sistema in esame, rappresentati dalle FEPs.

Il punto finale d'interesse può essere semplicemente definito come la dose picco che una persona potrebbe assumere dalla biosfera. E' stato fatto notare che la probabilità della dose picco può anche essere rappresentata come la misura del punto finale risultante dalla valutazione dello scenario in esame.

#### **6.3.1. Classificazione dello scenario**

Il percorso di rilascio dipende fortemente sia dalla localizzazione che dal progetto del deposito. Una volta che si è scelto e ubicato il deposito, i modelli del percorso di rilascio devono essere assemblati in modo tale che essi possano rappresentare il trasporto del radionuclide dal deposito all'ambiente e all'essere umano attraverso il sistema di difesa in profondità (barriere ingegneristiche, geosfera, biosfera). D'altra parte l'esposizione deve essere valutata, per ogni percorso, sia in termini di rilevanza che di probabilità associata allo scenario di riferimento.

Lo scenario selezionato, cioè una combinazione di eventi, funzioni e processi (FEPs) che condizionano le modalità e le tempistiche di trasporto dei radionuclidi, consente l'aggregazione degli eventi e delle corrispondenti situazioni particolari finalizzata ad impostare l'opportuno modello concettuale di trasporto e di esposizione dei gruppi critici che viene tradotto in adeguati schemi di calcolo per la valutazione della dose. Accanto a scenari di riferimento o scenari di

normale evoluzione del sistema, si introduce il concetto di *scenari di evoluzione alterati* (AESs), considerati come una tipologia di scenari estremi e particolari. Gli AESs sono definiti, per comodità, come eventi inusuali che possono causare alterazioni significative o modifiche momentanee della geochimica del sottosuolo, idrologiche e/o meccaniche che sono direttamente connesse con le prestazioni del sistema.

Pertanto, gli eventi iniziali significativi e i loro effetti, che risultano nei disturbi del sistema, vanno considerate come *major AESs*. Tutti gli scenari con conseguenze simili possono essere raggruppati nella stessa categoria di AES.

Con riferimento alla lista dei FEP's presentata nel Capitolo 4, possiamo riassumerli in quattro grandi categorie di AES, come evidenziato dalla tabella 6.1.

**Tabella 6.1: Categorie di AESs**

AES Geologici (AES-1)	AES Climatologici (AES-2)	AES Idrologici superficiali (AES-3)	AES Ecologici (AES-4)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sismicità</li> <li>• Attivazione di faglie</li> <li>• Frattura geosferiche</li> <li>• Tettonica regionale</li> <li>• (Intrusione umana)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precipitazioni</li> <li>• Glaciazioni</li> <li>• Importanti mutazioni climatiche</li> <li>• Transitori causati dall'effetto serra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flusso dei fiumi e cambiamento di livello dei laghi</li> <li>• Inondazioni del sito</li> <li>• Ricarica per le acque sotterranee</li> <li>• Erosione, trasporto e sedimentazione delle acque e dei corsi d'acqua</li> <li>• Effetti termici naturali</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Assorbimento delle piante</li> <li>▪ Assorbimento animale</li> <li>▪ Interazioni microbiche</li> <li>▪ Effetti dovuti allo sviluppo dell'ecologia terrestre per l'idrologia</li> </ul>

In generale, gli AESs hanno un comportamento stocastico e possono presentare un andamento temporale caratteristico [6.1].

### 1) AES Geologici

L'analisi geologica stocastica considera sia i terremoti che gli spostamenti tettonici (per esempio le faglie) dei fenomeni critici. Va osservato, però, che il fenomeno legato a faglie di grandi dimensioni che causano una emissione diretta di radionuclidi, dovrebbe essere considerato molto improbabile a causa del comportamento plastico e la capacità di auto-contenimento degli strati di argilla. Invece, le faglie di piccolo o intermedio livello possono essere responsabili di disturbi locali nelle proprietà della barriera geologica, in modo da comportare la modifica di una normale evoluzione del sistema. Il pericolo principale considerato è dovuto alla rottura dei contenitori dei rifiuti indotto dall'attivazione di faglia. Per i sismi, è stato osservato che le variazioni del terreno a seguito di un terremoto possono indurre cambiamenti della pressione interstiziale e del flusso delle acque sotterranee [6.2]. Si presume, quindi, che l'AES geologico possa influenzare, fortemente, due variabili del sistema: tempo di ritardo per il rilascio e il volume di diluizione.

### 2) AES climatologici

L'AES rappresentato da una variazione climatica può causare perturbazioni di livello medio nella geosfera. Le conseguenze maggiori, in questo caso, saranno, probabilmente, una riduzione del tasso

di infiltrazione o del flusso acquifero. Il tasso di infiltrazione, ovviamente, dipende in larga misura dal tempo; variazioni spaziali e temporali (erosione del suolo) e delle precipitazioni hanno un grande effetto sul tasso di infiltrazione. Un'altra conseguenza possibile sarà la variazione del flusso della falda acquifera, che si manifesterà in un considerevole aumento o diminuzione del caratteristico livello della falda stessa; in ultima analisi, si potrebbe modificare il rilascio quantitativo di radionuclidi nella falda. Pertanto, abbiamo bisogno di determinare quanto possano variare il tasso di infiltrazione o il flusso di falda dal valore nominale a causa dell'AES considerato.

### *3) AES idrologici superficiali*

Le proprietà idrologiche regionali possono essere cambiate da diversi tipi di fenomeni; si annoverano tra questi fenomeni: trasporto di sedimenti e di acqua dolce di deposizione, effetti termici naturali e le inondazioni del sito sono potenzialmente in grado di modificare le proprietà idrologiche su scale temporali di centinaia di anni. Questa tipologia di AES può influenzare fortemente il ricambio delle acque sotterranee e di scarico. In questo AES ricadono anche i cambiamenti quantitativi di una falda freatica e/o di una falda acquifera possono verificarsi anche per la variazione del comportamento idrologico superficiale locale. Gli effetti nocivi di questo caso possono dar luogo ad una diminuzione considerevole del volume di diluizione, causando un aumento del rilascio quantità di radionuclidi.

### *4) AES ecologici*

A seguito della perdita del controllo istituzionale del sito del deposito si ha un corrispondente aumento della probabilità di contatto tra animali, e flora (radici) con i rifiuti (intrusione biotica) che può comportare anche modifiche sul bilancio idrico.

## **6.3.2. Considerazioni sulle variabili di dominio del modello**

I parametri nominali delle variabili del dominio del modello, come precedentemente definito in modo qualitativo, sono illustrati nelle seguente tabella 6.2.

I valori adottati per i parametri dipendono dalle distribuzioni soggettive assegnate. Distribuzioni “fissate ma sconosciute” rappresentano l'incertezza epistemica delle caratteristiche di ciascun sito fino a quando non siano disponibili i parametri sperimentali corrispondenti. Per sviluppare una distribuzione soggettiva dei parametri del modello, i dati disponibili debbono essere interpretati quali dati di partenza. L'incertezza in una variabile viene trattata come 'aleatoria' quando la distribuzione è determinata da un processo casuale.

Inoltre, gli effetti stocastici e l'incertezza dei dati possono essere considerate in un insieme di distribuzioni. Alla luce di questa considerazione insieme con l'incertezza epistemica dei parametri, si può delineare una variabile dominio con distribuzioni “vere ma sconosciute”. I valori minimi e



massimi per i parametri delle variabili di dominio sono indicati nella tabella 6.2. In particolare, nel caso in cui si trattino le variabili del dominio con ambedue le incertezze, cioè sia quella epistemica che quella aleatoria, si assume che la varianza della distribuzione epistemica si riferisca al problema sull'attendibilità dei parametri delle variabili di dominio causata da una carenza di dati significativi.

Quantità fissata	T <sub>delay</sub> (yr)	IR (mean)(m/yr)	IR (s.d.) (m/yr)	DV (mean) (m <sup>3</sup> )	DV (s.d.) (m <sup>3</sup> )
<i>Distribuzione epistemica</i>	<i>LU</i>	<i>U</i>	<i>LU</i>	<i>T</i>	<i>U</i>
Min.	10	0.1	1x10 <sup>-3</sup>	6.0x10 <sup>4</sup>	1.5x10 <sup>4</sup>
Mode	-	-	-	9.1x10 <sup>4</sup>	-
Max.	1000	0.3	2.4x10 <sup>-2</sup>	1.22x10 <sup>5</sup>	2.5x10 <sup>4</sup>

**Tabella 6.2: distribuzioni di probabilità soggettiva che rappresentano lo stato delle conoscenze sui parametri fissi ma incerti utilizzando i valori di default per il Th-230.** (T<sub>delay</sub>: tempo di ritardo IR: tasso di infiltrazione; DV: volume di diluizione; s.d.: deviazione standard; LU: Distribuzione LogUniforme; U: Distribuzione Uniforme; T: Distribuzione Triangolare)

Le intrusioni umane, attraverso le quali vi potrebbe essere trasporto di radionuclidi verso la biosfera, possono essere modellate usando opportuni parametri per le variabili di dominio, che mettono in relazione la concentrazione risultante al suolo (Bq/m<sup>2</sup>) alla concentrazione presente nella struttura (Bq/m<sup>2</sup>); ovviamente i FEPs relativi agli scenari associati all'intrusione umana sono sempre alterati e la loro trattazione non può prescindere da un approccio di tipo stocastico.

Per quanto concerne i modelli matematici e le distribuzioni dei corrispondenti parametri, si può fare riferimento alla tabella 6.3 nella quale le cosiddette “redistribuzioni manuali” indicano le distribuzioni rappresentative della relazione tra la concentrazione presente inizialmente nella struttura sub-superficiale e la concentrazione attesa al suolo [6.6].

#### 6.4 STIMA DEI PARAMETRI ATTRAVERSO L'INFERENZA PROBABILISTICA BAYESIANA

La stima dei parametri associata all'inferenza bayesiana impiegata nel processo elicitorio parte dalla stima della probabilità delle AESs. Possiamo dire, come presupposto pratico, che un AES si verifica statisticamente nello spazio e nel tempo in modo che la misura di base di interesse (ad esempio gli accadimenti di un'AES in un intervallo di tempo specificato) sia affrontata mediante un processo stocastico. Pertanto, una stima della frequenza del verificarsi degli AES è legata alle caratteristiche aleatorie dei parametri.

Gli accadimenti degli AESs, per intervalli non sovrapponibili, sono fra loro statisticamente indipendenti. La distribuzione di Poisson è comunemente utilizzata [6.3] nei problemi in cui si richieda la stima dei parametri, necessaria a modellare tutti i processi in cui gli eventi vengono generati nel tempo.

Scenario	Description of Random Variables	Type of Distribution	Mean	Standard Deviation	Min.	Max.
Drilling Scenario	Manual Redistribution	Log N	0.0057	0.002	-	-
	Depth of soil overburden, m	Uniform	4.5	-	4.0	5.0
	Exposure time: Plume (hr)	Normal	1.0	0.3	-	-
	Exposure time:	Normal	40.0	12.0	-	-
	Soil Contamination (hr)					
Road Construction Scenario	Mass loading factor (g/m <sup>3</sup> )	Log N	0.0004	0.0002	-	-
	Manual Redistribution	Log N	0.09	0.045	-	-
		Const. *	~ 0.0 *	-	-	-
	Depth of soil overburden, m	Uniform	4.5	-	4.0	5.0
	Exposure time: Plume (hr)	Normal	90.0	30.0	-	-
Post-Drilling Scenario	Exposure time:	Normal	90.0	30.0	-	-
	Soil Contamination (hr)					
	Mass loading factor (g/m <sup>3</sup> )	Log N	0.001	0.0005	-	-
	Manual Redistribution	Log N	0.00023	0.00012	-	-
	Depth of soil overburden, m	Uniform	4.5	-	4.0	5.0
Post-Construction Scenario	Exposure time: Plume (hr)	Normal	3200.0	1000.0	-	-
	Exposure time:	Normal	3200.0	1000.0	-	-
	Soil Contamination (hr)					
	Mass loading factor (g/m <sup>3</sup> )	Log N	0.0001	0.00005	-	-
	Consumption rate:	Normal	32.0	16.0	-	-
	Leaf Vegetable (kg/yr)					
	Consumption rate:	Normal	24.5	12.5	-	-
	Root Vegetable (kg/yr)					
	Consumption rate: Fruit (kg/yr)	Normal	16.6	8.5	-	-
	Consumption rate: Grain (kg/yr)	Normal	0.0	0.0	-	-
Post-Construction Scenario	Manual Redistribution	Log N	0.03	0.015	-	-
		Const. *	~ 0.0 *	-	-	-
	Depth of soil overburden, m	Uniform	4.5	-	4.0	5.0
	Exposure time: Plume (hr)	Normal	3200.0	1000.0	-	-
	Exposure time:	Normal	3200.0	1000.0	-	-
	Soil Contamination (hr)					
	Mass loading factor (g/m <sup>3</sup> )	Log N	0.0001	0.00005	-	-
	Consumption rate:	Normal	31.7	16.0	-	-
	Leaf Vegetable (kg/yr)					
	Consumption rate:	Normal	24.5	12.5	-	-
Root Vegetable (kg/yr)						
Consumption rate: Fruit (kg/yr)	Normal	16.6	8.5	-	-	
Consumption rate: Grain (kg/yr)	Normal	0.0	0.0	-	-	

**Tabella 6.3 - Variabili aleatorie di input e distribuzioni per gli scenari di intrusione umana**

La probabilità di osservare  $N$  eventi nel tempo, caratterizzato dal periodo  $T$  è data da:

$$P\{N \text{ eventi nel tempo } T | \lambda(t)\} = \frac{\{\lambda(t) \cdot T\}^N}{N!} e^{-\lambda(t) \cdot T} \quad (12)$$

dove  $\lambda(t)$  è il rateo di accadimento di un AES atteso.

La probabilità che si verifichi il caso  $j$ -esimo nell'intervallo di tempo  $t$  è data da:

$$p(n \geq 1) = 1 - \exp(-\lambda_j(t)t) \quad (13)$$

Così, se si ha il rateo dell'evento atteso, l'equazione (13) calcola facilmente la probabilità che si verifichi lo scenario corrispondente.

Stante la scarsità di dati empirici, la rarità degli eventi attesi e il valore molto piccolo del rateo corrispondente, è inevitabile il ricorso a un approccio elicitorio bayesiano basato sull'acquisizione del giudizio esperto e il successivo aggiornamento.

Un tipico criterio semplificato per la selezione dei parametri caratteristici della distribuzione di Poisson precedentemente introdotta è mostrato nella tabella 6.4.

<b>Grado di probabilità</b>	<b>Stima intervallo evento</b>	<b>Frequenza dell'evento (mediana)</b>
(1) Molto probabile	0-10 <sup>2</sup> y post-closure	2.0x10 <sup>-2</sup> /yr
(2) Probabile	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup> y post-closure	2.0x10 <sup>-3</sup> /yr
(3) Intermedio	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> y post-closure	2.0x10 <sup>-4</sup> /yr
(4) Improbabile	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> y post-closure	2.0x10 <sup>-5</sup> /yr
(5) Molto poco probabile	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup> y post-closure	2.0x10 <sup>-6</sup> /yr

**Tabella 6.3 - Categorizzazione delle probabilità delle AES nella stima di frequenza**

Il rilascio di materiali radioattivi nelle acque sotterranee e le conseguenze all'esposizione di questo tipo di dose presentano incertezze sia epistemiche che aleatorie [6.4]. Inoltre, le distribuzioni di probabilità soggettiva, che rappresentano le incertezze dei parametri, possono subire variazioni nel tempo a causa delle perturbazioni causate dal mutamento degli scenari [6.5]. E' consolidato che nei modelli ambientali di trasferimento ci sono forti dipendenze tra gli scenari ambientali e le caratteristiche delle variabili di dominio della geosfera e della biosfera. Pertanto, si assume che i parametri soggettivi delle variabili di dominio, precedentemente definite, che sono critici per la stima del punto finale della misura del rilascio nel terreno dei radionuclidi, possano variare in base al verificarsi dei vari AESs.

Come spiegato in precedenza, è ragionevole presumere che la presenza di AESs influenzi, direttamente, la stima dei parametri incerti delle variabili di dominio. Se questo è il caso, la dipendenza tra gli scenari e le variabili può, ovviamente, incidere su tutti i tipi di input del modello matematico.

E' in questo contesto che assume tutta la sua importanza il processo di aggiornamento bayesiano dei parametri elicitati e la metodologia di calibrazione e valutazione precedentemente esposta.

Per concludere, possiamo mettere in evidenza come sia gli scenari normali (di base), considerati con probabilità unitaria ma caratterizzati da incertezze aleatorie relative ai parametri di modello, sia gli scenari alterati, che presuppongono l'assegnazione di coefficienti probabilistici associati alla scelta della particolare distribuzione rappresentativa della stima della probabilità di accadimento e della relazione tra l'inventario sub superficiale e la dose superficiale, richiedano l'aggiornamento bayesiano delle informazioni derivanti dal processo elicitorio.

## 6.5 I METODI BAYESIANI NEL PROCESSO DECISIONALE PER LA LOCALIZZAZIONE E LA GESTIONE DEI DEPOSITI

Se assumiamo che la probabilità di un evento è soggettiva essa è il nostro grado di confidenza nel realizzarsi di un evento e cambia con l'informazione.

Il teorema di Bayes può essere formulato nella seguente maniera:

$$P(B|A) = \frac{P(B) \cdot P(A|B)}{P(A)}$$

$P(B)$  = probabilità di B prima che avvenga A

$P(A)$  = probabilità che A avvenga

$P(A|B)$  = probabilità di A dato B

$P(B|A)$  = probabilità di B dato A avvenuto

A avvenuto rappresenta l'evidenza.

Incertezza epistemica e teorema di Bayes sono collegati in quanto sappiamo che possiamo usare l'evidenza per aggiornare le probabilità.

La densità di probabilità di un parametro  $\lambda$ , dopo aver raccolto l'evidenza (E) cambia come segue:

$$\pi(\lambda) = \frac{L(E|\lambda) \cdot \pi_0(\lambda)}{\int_{-\infty}^{+\infty} L(E|\lambda) \cdot \pi_0(\lambda) d\lambda}$$

dove:

$L(E|\lambda)$  = funzione likelihood o verosimiglianza

$\pi_0(\lambda)$  è la densità di probabilità di  $\lambda$  prima dell'evidenza (distribuzione a priori)

$\pi(\lambda)$  è la densità di probabilità di  $\lambda$  dopo l'evidenza (distribuzione a posteriori)

L'impiego del teorema di Bayes per aggiornare la conoscenza relativa ai parametri di modello delle distribuzioni che rappresentano l'andamento di fenomeni di trasporto come visto per gli AESs geologici, superficiali etc. e i relativi parametri (IR, DV etc.) è particolarmente importante qualora si preveda di utilizzare la dose stimata come indicatore di sicurezza del deposito.

Come si è visto, il valore stimato di tale indicatore risulta affetto da una serie di incertezze legate ai modelli rappresentativi del trasporto dei radionuclidi e ai relativi parametri (epistemiche ed aleatorie), agli scenari ipotizzati (normali o alterati), alle previsioni dei comportamenti futuri dei gruppi critici ed, in ultima analisi, alla prevista durata temporale del controllo istituzionale sul deposito stesso.

Per quanto riguarda lo scenario normale, alla luce delle conoscenze acquisite nel corso delle analisi preliminari sulle caratteristiche del contesto e sulle dinamiche antropiche e naturali ad esso associate, il sito di localizzazione del deposito è la variabile multiparametrica che assicura il mantenimento del valore stimato della dose (funzione obiettivo) al di sotto dei valori limite per tutto il periodo previsto di controllo istituzionale.

A partire dalla chiusura del deposito si pone il problema di mantenere aggiornato il livello di conoscenza sui modelli e i parametri adottati nel corso dell'analisi preliminare al fine di garantire il rispetto dei limiti di dose in relazione all'evoluzione prevista nello scenario alterato. Appare evidente che l'unica variabile a disposizione delle autorità di controllo è rappresentata dalla durata dell'effettivo controllo istituzionale.

In questa fase, è indispensabile il ricorso a strumenti per l'aggiornamento Bayesiano dei parametri relativi ai modelli di evoluzione degli scenari di contaminazione attraverso l'acquisizione di evidenze sperimentali o l'individuazione di dinamiche emergenti relative sia al contesto locale che globale (manufatti e tecnologie analoghi) su scala temporale.

## 6.6 BIBLIOGRAFIA DEL CAPITOLO 6

- [6.1] Thompson BGJ, Sagar B. The development and application of integrated procedures for post-closure assessment, based upon Monte Carlo simulation: the probabilistic systems assessment (PSA) approach. *Reliab Eng Syst Saf* 1993;42:125–60
- [6.2] McGuire RK, Bullen DB, Cook N, Coppersmith KJ, Kemeny J, Long A, Pearson FJ, et al. Demonstration of risk-based approach to highlevel waste repository evaluation. EPRI NP-7057, Risk Engineering, Inc.; October 1990.
- [6.3] Siu NO, Kelly DL. Bayesian parameter estimation in probabilistic risk assessment. *Reliab Eng Syst Saf* 1998;62:89–116.
- [6.4] Frank M.V. Treatment of uncertainty in space nuclear risk assessment with examples from Cassini mission applications. *Reliab Eng Syst Saf* 2000;66:203–21.
- [6.5] Evaluating the reliability of predictions made using environmental transfer models, Safety Series No. 100, IAEA; 1989.
- [6.6] Jin Beak Park, Joo Wan Park et al., “Statistical approach for derivation of quantitative acceptance criteria for radioactive wastes to near surface disposal facility”, *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol 35, Number 5 – October 2003

## **APPENDICE 1**

### **APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA FMEA ALL'ANALISI DI SICUREZZA DI UN DEPOSITO TEMPORANEO DI RIFIUTI RADIOATTIVI**

#### **A1-1. INTRODUZIONE**

Oggetto dell'attività è la presentazione dell'applicazione della metodologia FMEA come supporto per le valutazioni di sicurezza di un deposito temporaneo di rifiuti radioattivi. Sulla base di tale analisi viene poi definita la classificazione ai fini della sicurezza dei sistemi e componenti del deposito e sono quindi individuati i criteri ed i requisiti di progetto e la normativa di riferimento da utilizzare per il dimensionamento delle attrezzature, dei sistemi e delle strutture civili. Il progetto concettuale sviluppato, fa riferimento ad un inventario fisico e radiologico dei rifiuti definito in modo da involuppare le possibili tipologie di rifiuti stoccabili in questo tipo di installazioni. La soluzione proposta è del tipo "site independent", non risultando il progetto in questa fase di sviluppo dipendente da particolari caratteristiche sitologiche. L'attività è tesa a dimostrare la validità e l'efficacia della metodologia FMEA per questa tipologia di deposito. Nella valutazione di sicurezza post-closure di depositi superficiali, dove risulta più efficace sviluppare una metodologia incentrata sul metodo degli scenari, potrebbe essere utilizzata solo in parte. In particolare, la rigida struttura di un'analisi FMEA può rappresentare un possibile approccio iniziale al processo di identificazione degli scenari, garantendone un rigoroso percorso di analisi.

#### **A1-2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

Per il progetto concettuale del deposito, nonché per la definizione dei relativi criteri, sono state applicate le leggi, le norme e le guide tecniche di seguito riportate.

##### **Legislazione applicabile**

- /1/. D.L. 17 marzo 1995, n° 230 - "Attuazione delle direttive Euratom 80/836, 84/467, 84/466, 89/618, 90/641 e 92/3 in materia di radiazioni ionizzanti" e successive modifiche ed integrazioni.
- /2/. D.M. 4 settembre 1996 e successive integrazioni – "Attuazione della direttiva 94/55/CE del consiglio concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli stati membri relative al trasporto di merci pericolose su strada"

##### **Normativa e guide tecniche applicabili**

- /3/. Guida Tecnica N°26 ENEA-DISP – "Gestione dei rifiuti radioattivi", 1985
- /4/. Guida Tecnica N°4 ENEA-DISP
- /5/. IAEA Technical Reports Series No. 390 – "Interim storage of radioactive waste package", 1998

- /6/. IAEA Safety Series No. 116 – “Design of spent fuel storage facility” , 1994
- /7/. IAEA Safety Series No. 117 – “Operation of spent fuel storage facility” , 1994
- /8/. IAEA Safety Series No. 118 – “Safety assesment for spent fuel storage facility” , 1994
- /9/. IAEA - “Regulations for the safe transport of radioactive material” – 1996 Edition
- /10/. IAEA Safety Series No. 7 – “Explanatory Material for IAEA regulations for the safe transport of radioactive material” – Second edition 1990
- /11/. IAEA Safety Series No. 37 – “Advisory Material for IAEA regulations for the safe transport of radioactive material” – Third edition 1990
- /12/. Regulatory Guide (RG) 1.70 - " Standard Format and Content of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants, LWR Edition." - Revision 3, Novembre 1978

### **Altri documenti di riferimento**

- /13/. Ministero dell’Industria, del Commercio e dell’Artigianato – “Indirizzi strategici per la gestione degli esiti del nucleare” – 14 Dicembre 1999
- /14/. ENEA Task Force per il sito nazionale di deposito dei materiali radioattivi – “Deposito nazionale per i rifiuti radioattivi- Situazione e stato delle azioni a settembre 1999”
- /15/. Gesellschaft für Reaktorsicherheit mbH – “Konrad Transport Study: Safety analysis of the transportation of radioactive waste to the Konrad waste disposal site”, 1992
- /16/. H. Lutz - “Zwilag – The swiss complex for central interim storage of all categories of radiactive waste and for LLW-treatment” – Radioactive waste management and enviromental remediation – ASME 1999
- /17/. BLG – “A visit to BLG in Goerleben – Safe waste management for protection of the environment”.

## **A1-3. I RIFIUTI RADIOATTIVI**

### **A1-3.1 Caratteristiche fisiche e radiologiche dei rifiuti**

Nel presente capitolo sono sinteticamente riportate le caratteristiche fisiche e radiologiche dei rifiuti e dei relativi contenitori da stoccare all’interno del deposito temporaneo oggetto di questa attività.

In generale, nei depositi temporanei potranno essere stoccati, in attesa del loro trasferimento al deposito nazionale, rifiuti confezionati in accordo con quanto prescritto dalla G.T. N°26 ( vedi Rif. /3/).

In relazione al loro contenuto radiologico, per lo smaltimento finale, i rifiuti possono essere:

- condizionati (in matrice cementizia, vetrosa, ecc.);
- non condizionati.

A loro volta i rifiuti non condizionati possono essere classificati ulteriormente in:

- rifiuti combustibili;
- rifiuti non combustibili.



Con riferimento alla provenienza del rifiuto, ambo le tipologie di rifiuto, condizionati e non, possono contenere:

- pezzi contaminati derivanti da smantellamento di impianti;
- rifiuti secondari derivanti da attività di smantellamento;
- rifiuti tecnologici derivanti dalla gestione pregressa di impianti;
- rifiuti derivanti dal trattamento di liquidi radioattivi.

Dal punto di vista radioprotezionistico, i rifiuti stoccabili nel deposito temporaneo possono presentare:

- solo rischio di irraggiamento esterno (generalmente caratterizzati da contaminazione beta e gamma);
- solo rischio di contaminazione interna (generalmente caratterizzati da contaminazione alfa);
- rischio di contaminazione interna ed esterna.

### **A1-3.2 Inventario considerato per lo sviluppo del progetto**

Per il presente progetto, è stato definito un inventario radiologico che costituisca l'involuppo di tutte le criticità legate alla gestione temporanea delle tipologie di rifiuti descritte nel paragrafo precedente.

L'inventario di progetto è costituito da:

- rifiuti non condizionati combustibili, essenzialmente contaminati alfa;
- rifiuti condizionati cementati, con contaminazione essenzialmente beta e gamma (Co60 e Cs 137).

### **A1-3.3 Modalità di confezionamento**

I rifiuti non condizionati combustibili si considerano confezionati all'interno di fusti metallici da 220 litri, con coperchio e fascetta di serraggio su quest'ultimo. I fusti contenenti i rifiuti non condizionati combustibili saranno stoccati all'interno di gabbie realizzate in carpenteria metallica. Ogni gabbia conterrà 4 fusti della stessa tipologia e potrà essere impilata.

Dal punto di vista strutturale, la gabbia presenterà una base d'appoggio rigida ed una serie di montanti, la cui funzione sarà quella di scaricare il peso della gabbia stessa durante la fase di stoccaggio. La gabbia è dotata di appositi dispositivi per il centraggio e l'impilaggio e di tasche per la movimentazione mediante carrello elevatore a forche.

La gabbia è caratterizzata dalle seguenti dimensioni:

- Altezza 1070 mm;
- Area di base 1.44 m<sup>2</sup>;
- Lunghezza 1230 mm;

- Larghezza 1230 mm;
- Peso 100 kg ca.

Rispetto a configurazioni di stoccaggio che prevedono l'impilaggio diretto dei fusti, tale soluzione consente di risolvere i seguenti problemi:

- ribaltamento dei fusti, in caso di sisma;
- perdita di tenuta della fascetta di chiusura del coperchio, causata dall'allentamento della coppia di serraggio, a sua volta prodotto dal peso dei colli impilati;
- elevato numero di movimentazioni richieste per posizionare i fusti nel deposito.

I rifiuti condizionati cementati si considerano confezionati all'interno di cassoni prismatici di volume pari a 2.6 m<sup>3</sup> e all'interno di fusti cilindrici di volume pari a 440 l ognuno.

I cassoni prismatici, posizionati nel locale CM1, sono caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

- Altezza 1260 mm;
- Lunghezza 1650 mm;
- Larghezza 1250 mm;
- Area di base 2.06 m<sup>2</sup>.

I fusti cilindrici, stoccati nel locale CM2 e disposti all'interno di gabbie metalliche, sono caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

- Raggio 350 mm;
- Area di base 0.38 m<sup>2</sup>;
- Altezza 1140 mm.

Ogni gabbia metallica conterrà 6 fusti di questo tipo.

#### **A1-3.4 Quantità**

Le quantità previste per i rifiuti non condizionati combustibili e per i rifiuti condizionati cementati sono, rispettivamente pari a:

- 1820 unità per i rifiuti non condizionati combustibili (corrispondenti a n. 455 gabbie);
- 96 unità per i rifiuti condizionati cementati, disposti in contenitori prismatici;
- 270 unità per i fusti cilindrici contenenti rifiuti condizionati cementati, (corrispondenti a n. 45 gabbie).

## A1-4. CRITERI GENERALI DI PROGETTO

### A1-4.1 Generalità

La sicurezza del Deposito è basata sull'applicazione del principio della difesa in profondità (defense-in-depth principle). Questo principio prevede quattro successive linee di difesa:

- Prevenzione di potenziali guasti attraverso l'adozione di elevati standard di qualità per il progetto, la costruzione e l'esercizio dei sistemi, le strutture ed i componenti (SSC) dell'installazione.
- Sorveglianza e Controllo dei fattori che assicurano la prevenzione.
- Conservazione delle funzioni di sicurezza per tutte le situazioni incidentali credibili implementando, laddove necessario, eventuali sistemi supplementari.
- Mitigazione delle conseguenze degli incidenti al fine di assicurare il rispetto degli obiettivi radioprotezionistici.

Si riportano di seguito gli obiettivi, criteri e requisiti di progetto ai quali è ispirata la progettazione, la realizzazione e la gestione del Deposito, al fine di eliminare i potenziali rischi per gli operatori, la popolazione e l'ambiente. Tali linee guida sono state definite in relazione:

- alla Normativa Vigente;
- ai rischi connessi alla movimentazione ed allo stoccaggio dei colli contenenti materiali radioattivi;
- alla massima vita operativa del deposito, stabilita in almeno 20 anni.

### A1-4.2 Classificazione degli eventi

Per il progetto del Deposito, in accordo ad una prassi ormai consolidata, le condizioni di impianto sono classificate in tre diverse categorie:

- **Categoria I:** che comprende eventi quali il normale funzionamento dell'installazione e tutte le operazioni per essa programmate, ivi incluse le fermate per interventi di ispezione e di manutenzione.
- **Categoria II:** che comprende gli eventi anormali, ritenuti statisticamente possibili durante il periodo della vita operativa dell'installazione, quali: anomalie strutturali (per. es. piccole perdite di liquidi o aeriformi) e/o funzionali (per es. guasti meccanici e/o elettrici, spuri) di singoli componenti; singoli errori umani; perdite dell'energia elettrica esterna; eventi esterni quali temporali, fulmini, ecc.
- **Categoria III:** che comprende gli eventi incidentali. Tali eventi pur non essendo attesi durante la vita dell'installazione, sono comunque considerati ai fini dell'analisi incidentale. Eventi tipici appartenenti a tale categoria sono: perdita totale di sistemi, grosse perdite o

rotture catastrofiche di componenti, eventi d'area (quali incendio, esplosione, allagamento, ecc.), eventi esterni naturali (quali sisma, tornado, inondazione, ecc.).

### **A1-4.3 Obiettivi di sicurezza**

Tutti gli interventi che riguardano le installazioni nucleari sono pianificati con l'obiettivo fondamentale di proteggere l'individuo, la collettività e l'ambiente dal rischio di natura radiologica. Questo principio di natura generale si traduce in obiettivi specifici, e modalità operative che possono essere così sintetizzati:

- limitare le esposizioni del personale operativo e della popolazione durante il normale esercizio in base al principio di ottimizzazione, secondo il quale le esposizioni alle radiazioni devono essere ridotte al livello più basso ragionevolmente ottenibile (ALARA);
- porre in essere tutte quelle precauzioni atte ad evitare l'insorgenza di incidenti con potenziale rilascio di radioattività;
- assicurare la protezione della popolazione e dell'ambiente a fronte dei rischi associati a situazioni incidentali attraverso la riduzione al livello più basso ragionevolmente ottenibile delle dosi, garantendo in ogni caso il rispetto dei limiti fissati dalla legge italiana in materia sia in termini di esposizione alle radiazioni della popolazione che di rilasci di radioattività all'ambiente.

Nel seguito sono riportati gli obiettivi di radioprotezione stabiliti per gli operatori e per gli individui del gruppo di riferimento della popolazione, che saranno presi come riferimento per lo sviluppo del progetto del nuovo Deposito. Tali obiettivi sono stati definiti in funzione delle diverse condizioni di impianto, nelle quali può trovarsi l'installazione nel corso della vita di progetto.

### **A1-4.4 Obiettivi di radioprotezione**

Gli obiettivi di radioprotezione stabiliti per la realizzazione e la gestione del nuovo parco serbatoi sono stati definiti prendendo a riferimento:

- Decreto Legislativo 17 marzo 1995 n. 230 e del DL 241/2000 in materia di radiazioni ionizzanti (/1/);
- Raccomandazioni dell' ICPR n.46: "Radiation Protection Principles for the Disposal of solid Radioactive Wastes";
- Standard internazionali.

L'installazione è progettata con lo scopo di rispettare gli obiettivi di sicurezza di cui al paragrafo precedente ed in particolare di minimizzare l'impegno di dose al personale operativo ed alla popolazione durante la costruzione, il collaudo, il normale esercizio e le situazioni anomale o incidentali.

Il Deposito è progettato per soddisfare i più stringenti obiettivi di radioprotezione adottati per gli interventi di decommissioning, riportati in dettaglio nel prospetto che segue, per quanto riguarda il gruppo di riferimento della popolazione.

	CATEGORIA I	CATEGORIA II	CATEGORIA III
<b>Gruppo di riferimento della popolazione</b>	<b>10 <math>\mu\text{Sv}/\text{y}</math><sup>14</sup></b>	<b>1 ÷ 100 <math>\mu\text{Sv}/\text{ev}</math> (Limite cumulativo 10 <math>\mu\text{Sv}/\text{y}</math><sup>15</sup>)</b>	<b>1 mSv/ev<sup>16</sup></b>

L'obiettivo per gli eventi di Categoria II è quello di mantenere la dose al gruppo di riferimento della popolazione all'interno del seguente intervallo di valori (1÷100  $\mu\text{Sv}/\text{evento}$ ), in considerazione del fatto che tale categoria, per come è definita, include anche eventi la cui frequenza di accadimento può essere relativamente alta ma con conseguenze radiologiche praticamente nulle o comunque assolutamente trascurabili. Accanto a questi eventi possono comunque presentarsi eventi a frequenza decisamente inferiore (ad esempio <1 volta nel corso dell'esecuzione delle operazioni di disattivazione nel loro complesso) ma con conseguenze di maggiore entità.

Il criterio generale, mutuato dai criteri adottati per gli interventi di decommissioning, è quello di ipotizzare, per la Categoria II un obiettivo di dose in funzione della frequenza di accadimento dell'evento stesso. A questo si è arrivati stabilendo un obiettivo di dose per evento e un obiettivo di dose per gli individui del gruppo critico della popolazione cumulativo per anno di attività (fissato pari a 10  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$ ), che potrà essere determinato dalla somma di più eventi di bassissimo impatto o, all'estremo opposto, da un evento con frequenza di accadimento di 1 volta ogni 10 anni, con impatto dosimetrico stimabile in 100  $\mu\text{Sv}$ .

La somma delle dosi ricevute nell'arco di un anno sia per gli eventi di categoria I che per quelli di categoria II (tenendo conto della loro frequenza di accadimento) dovrà essere inferiore ai limiti dettati per gli eventi di categoria I.

Gli eventi incidentali appartenenti alla Categoria III sono da ritenersi estremamente improbabili, pur non potendo del tutto escludere il loro verificarsi nel corso della gestione dell'impianto. Tali eventi sono comunque tenuti in conto nella progettazione dal momento che ad essi potrebbe essere associato un alto impatto dosimetrico. Per i lavoratori non esposti il limite di radioprotezione è fissato per legge in 1 mSv/anno. Per i lavoratori esposti, in conformità ai principi generali del D.Lgs. 230/95 e successive modifiche, devono essere attuate, sull'impianto, prescrizioni e procedure di radioprotezione idonee a ridurre le esposizioni al livello più basso ragionevolmente ottenibile.

<sup>14</sup> Il limite è naturalmente riferito al complesso delle attività eseguite sull'impianto nel corso del medesimo periodo di riferimento e non alla singola attività.

<sup>15</sup> Per gli eventi di Categoria II il limite cumulato dovrà comunque risultare inferiore a 10  $\mu\text{Sv}/\text{anno}$  per l'insieme delle attività programmate per ciascun anno.

<sup>16</sup> Valore al di sopra del quale, ai sensi del D. Lgs. N° 241, si applicano le disposizioni per gli "interventi" in caso di emergenze radiologiche e nucleari.

## **A1-4.5 Criteri di sicurezza**

### **A1-4.5.1 Identificazione delle funzioni di sicurezza**

Il rispetto degli obiettivi di radioprotezione riportati nel par. 0 viene garantito assicurando il mantenimento delle seguenti funzioni di sicurezza:

- confinamento del materiale radioattivo, sia in termini di contenimento delle sostanze radioattive, sia di mantenimento dell'integrità dei locali in cui saranno ubicati i rifiuti radioattivi;
- protezione radiologica, basata sullo schermaggio delle sorgenti radioattive.
- Le caratteristiche dei rifiuti radioattivi (Cap. /17/) che devono essere immagazzinati sono tali da non richiedere di considerare, dal punto di vista della sicurezza, le problematiche connesse con:
  - criticità nucleare, in quanto le operazioni di trasferimento e stoccaggio dei rifiuti non alterano i livelli di concentrazione del materiale fissile, pertanto è da escludere la possibilità di incidenti di criticità;
  - smaltimento del calore residuo, in quanto i valori di potenza termica in gioco sono tali da non compromettere le funzioni di sicurezza dell'impianto sia durante il normale funzionamento che in condizioni incidentali (ad esempio in caso di perdita del sistema di ventilazione).

### **A1-4.5.2 Criteri di confinamento del materiale radioattivo**

Il confinamento del materiale radioattivo è assicurato da barriere ingegneristiche (statiche e dinamiche), in numero commisurato al potenziale rischio radiologico del materiale confinato.

Il confinamento statico è assicurato da due barriere (primaria e secondaria) in serie:

- barriera statica primaria, costituita dai contenitori nei quali è confezionato il materiale radioattivo;
- barriera statica secondaria, costituita dalla struttura civile del deposito.

Queste due barriere statiche sono assistite, durante l'esecuzione delle operazioni di caricamento/svuotamento del deposito, di ispezione dei colli e di manutenzione degli impianti e sistemi, da una barriera dinamica realizzata mediante il sistema di ventilazione che pone i locali di stoccaggio e l'area operativa in depressione rispetto all'ambiente esterno.

La disponibilità di tali barriere in relazione agli eventi di progetto considerati è stabilita in relazione ai risultati prodotti dall'analisi di sicurezza.

### **A1-4.5.3 Criteri di protezione radiologica**

La protezione radiologica, durante la costruzione, la realizzazione e l'esercizio dell'installazione, sarà garantita attraverso l'applicazione dei seguenti criteri:

- minimizzazione dell'impegno collettivo di dose per gli operatori addetti allo svolgimento delle operazioni;
- circoscrizione della contaminazione nei punti di produzione;
- minimizzazione dei rilasci (liquidi e/o aeriformi) verso l'esterno, per rendere trascurabile, dal punto di vista radiologico, l'impatto verso l'ambiente e la popolazione;
- minimizzazione del rischio radiologico per gli operatori e per l'ambiente a seguito di eventi incidentali che potrebbero verificarsi durante lo svolgimento delle operazioni;
- minimizzazione dei rifiuti radioattivi secondari prodotti durante lo svolgimento delle attività.
- I suddetti criteri saranno soddisfatti attraverso:
  - lo schermaggio delle radiazioni;
  - la classificazione delle aree;
  - l'impiego di personale classificato;
  - la procedurizzazione delle attività;
  - l'impiego di sistemi di monitoraggio.

Lo spessore delle pareti e della copertura del deposito sarà tale da garantire il rispetto degli obiettivi di radioprotezione all'esterno degli stessi per quanto riguarda l'irraggiamento diretto ed indiretto. La dose è stata valutata tenendo conto dei fenomeni di streaming attraverso eventuali discontinuità della struttura e valutando separatamente il contributo di sky shine. All'esterno del deposito, a contatto delle pareti, i valori del rateo di dose saranno compatibili con la classificazione della zona. Per distanze superiori è fissato l'obiettivo di minimizzare l'ampiezza della zona classificata nei dintorni dell'edificio. Tutte le aree all'interno dei depositi saranno opportunamente classificate in accordo a quanto previsto dal D. Lgs. 230/95 e s.m.i.. Nelle aree del deposito dove, a causa della presenza di materiale radioattivo esistono rischi da radiazioni o di contaminazione, l'accesso del personale sarà ridotto alle operazioni strettamente necessarie ed avverrà sotto il controllo della fisica sanitaria.

Le aree del deposito saranno suddivise in tre zone a differente rischio di contaminazione:

- Zona A: comprende tutti i locali/aree dell'edificio esenti da contaminazione; esse coincidono con le aree classificate come zona sorvegliata;
- Zona B: zone normalmente pulite in cui la contaminazione può essere trasportata dal personale o dal materiale in transito da zone potenzialmente più contaminate (Zona C);

- Zona C: zone contenenti sistemi radioattivi soggetti a rilascio di contaminazione solo in caso di danneggiamenti e/o rimozione della prima barriera di contenimento della radioattività.

L'accesso/uscita del personale alle/dalle zone classificate controllate del deposito (Zona B e C) sarà possibile solo attraverso il presidio di fisica sanitaria. L'accesso/uscita dei materiali dal deposito, durante le diverse fasi di gestione dello stesso, sarà regolato per mezzo di apposite procedure.

Il presidio di fisica sanitaria sarà dotato di adeguata strumentazione per la misura della contaminazione del personale (compreso un monitore mani-piedi) e di una zona adibita all'intervento per la prima decontaminazione del personale eventualmente contaminato.

Nel punto di accesso gli addetti di fisica sanitaria provvederanno a fornire i dispositivi di protezione individuale e la relativa strumentazione per il monitoraggio personale in relazione alle attività da condurre e secondo quanto sarà stabilito dall'EQ.

Saranno previsti sistemi ambientali di monitoraggio ed allarme per radiazioni gamma in grado di coprire tutte le aree del deposito.

Saranno previsti sistemi di monitoraggio per la rivelazione di contaminazione.

Sarà garantita la diagnostica dei sistemi di monitoraggio e la testabilità durante l'esercizio.

Le caratteristiche del deposito e dei sistemi in esso contenuti, unitamente a quelle proprie dei manufatti, saranno tali da assicurare il confinamento dei radionuclidi contenuti nei rifiuti nelle condizioni di impianto I e di minimizzare i rilasci nelle condizioni di impianto II e III.

## **A1-4.6 Sistemi di sicurezza**

### **A1-4.6.1 Definizione di sistemi di sicurezza**

Le funzioni di sicurezza indicate nel par. 0 sono garantite dal funzionamento dei "sistemi di sicurezza". I sistemi di sicurezza sono ulteriormente suddivisi in:

- sistemi essenziali per la sicurezza;
- sistemi importanti per la sicurezza.

Si definiscono "sistemi essenziali per la sicurezza" quei sistemi il cui funzionamento è necessario per garantire l'espletamento delle funzioni primarie di sicurezza il cui svolgimento è indispensabile per il soddisfacimento degli obiettivi di radioprotezione per i gruppi critici della popolazione in condizioni incidentali, indicati al par. 0 per le diverse condizioni di impianto.

Si definiscono "sistemi importanti per la sicurezza" quei sistemi il cui funzionamento è necessario per garantire l'espletamento delle funzioni secondarie di sicurezza il cui svolgimento, in un'ottica di difesa in profondità, è mirato alla limitazione delle dosi ai lavoratori e alla popolazione sia in condizioni normali sia incidentali.



Tutti gli altri sistemi dell'installazione, che non contribuiscono in alcun modo alla limitazione delle dosi e/o alla recuperabilità dell'installazione dopo eventi incidentali, sono definiti "sistemi non di sicurezza".

#### **A1-4.6.2. Requisiti per i sistemi di sicurezza**

I sistemi essenziali per la sicurezza sono progettati nel rispetto dei seguenti requisiti tecnici specifici:

- progettazione, fabbricazione, messa in opera e prova, secondo standard di qualità commisurati alla loro funzione;
- sicurezza strutturale;
- rispondenza ai requisiti di ridondanza, separazione e indipendenza;
- operatività del sistema anche a fronte del peggiore guasto singolo di un componente attivo;
- protezione contro gli eventi interni d'area, come incendio, allagamenti, effetti dinamici dovuti a rottura di tubazioni o di parti rotanti;
- protezione contro i modi di guasto comune dei componenti ridondanti (ed in particolare delle parti elettrostrumentali) causati da condivisioni di tipo funzionale e/o ambientale;
- protezione contro gli eventi esterni naturali, quali terremoti, trombe d'aria, inondazioni, disturbi indotti da fulmini;
- protezione, se richiesta, contro eventi speciali esterni.

Inoltre, i "sistemi essenziali" per la sicurezza saranno progettati in modo che, per ogni evento di categoria III, sia disponibile una loro configurazione minima ancora in grado di garantire il rispetto degli limiti di dose indicati nel § 4.4.

I sistemi importanti per la sicurezza che svolgono, comunque, funzioni che hanno validità dal punto di vista della difesa in profondità e della recuperabilità dell'impianto dopo eventi incidentali, sono progettati in accordo a norme di buona progettazione industriale. In aggiunta, si applicherà il requisito della ridondanza dei componenti attivi anche a quei sistemi ed apparecchiature che risultano particolarmente critici per la continuità e la sicurezza delle normali operazioni o per la mitigazione delle conseguenze sui gruppi critici della popolazione in caso di malfunzionamenti e/o eventi incidentali.

Anche in questo caso, l'attribuzione dei requisiti generali suddetti alle strutture, sistemi e componenti dell'installazione è effettuata in relazione ai risultati prodotti dall'analisi di sicurezza.

#### **A1-4.7. Classificazione dei sistemi, strutture e componenti (SCC)**

Le strutture, i sistemi ed i componenti (SSC) dell'installazione in esame sono classificati in accordo in accordo ai criteri di seguito riportati.

- Classificazione per la sicurezza.

- Classificazione sismica, allo scopo di identificare i sistemi, i componenti e le strutture che devono essere progettati o qualificati a fronte del sisma di progetto.

La classificazione per la sicurezza suddivide i sistemi dell'installazione in "gruppi di qualità" definendo, per ogni gruppo, i riferimenti normativi e gli standard di qualità che devono essere utilizzati per la progettazione, la fabbricazione, la messa in opera, i collaudi e l'esercizio dei singoli sistemi, in relazione alla funzione di sicurezza che gli stessi sistemi sono chiamati a svolgere.

La classificazione sismica suddivide le SSC dell'installazione in "categorie" in relazione al comportamento ad esse richiesto durante e nelle fasi immediatamente successive il sisma di progetto; alle SSC può essere richiesto:

- il mantenimento della funzionalità originaria (strutturale e/o prestazionale);
- la perdita della funzionalità ma il mantenimento dell'integrità strutturale;
- nessun requisito.

L'attribuzione del gruppo di qualità e della categoria sismica è effettuata, per ogni sistema, in relazione ai risultati dell'analisi di sicurezza.

#### **A1-4.7.1. Classificazione per la sicurezza**

La classificazione di sicurezza prevede la suddivisione dei sistemi dell'installazione in tre diversi gruppi di qualità:

- Gruppo di Qualità C
- Gruppo di Qualità D
- Gruppo di Qualità N

La classificazione si basa su quanto contenuto nella US NRC Regulatory Guide 1.268, Rev. 3. In tal senso, si precisa che Regulatory Guide 1.26 prevede la classificazione in "Quality Groups" solo per i componenti meccanici di un impianto nucleare contenenti acqua, vapore o rifiuti liquidi radioattivi. Nel presente documento tale classificazione in gruppi di qualità (solamente C, D e N) è stata estesa anche a componenti non previsti nel campo di applicabilità della succitata norma, come ad esempio i sistemi elettrici.

La classificazione in gruppi di qualità non è applicata alle strutture civili.

Appartengono al **gruppo di qualità C** i sistemi essenziali per la sicurezza. Il progetto, la costruzione, le prove e l'esercizio dei sistemi in classe C saranno condotti facendo riferimento a:

- norme specifiche, cioè utilizzate per lo stesso tipo di componenti in impianti analoghi;
- norme di riferimento, generiche, adottate per componenti di classe analoga in impianti elettronucleari, o norme equivalenti a queste.

Appartengono al **gruppo di qualità D** i sistemi importanti per la sicurezza. Il Gruppo di Qualità D è attribuito anche ai sistemi che, in caso di guasto, possono degradare le funzioni di un componente di classe C.

I riferimenti normativi dei sistemi in classe D sono fondamentalmente quelli relativi a sistemi di tipo convenzionale e commerciale. Svolgendo, comunque, funzioni di sicurezza che hanno una validità dal punto di vista della difesa in profondità e della recuperabilità dell'installazione dopo eventi incidentali, tali sistemi saranno anch'essi sottoposti a piani di fabbricazione e controllo della qualità ed a programmi di sorveglianza ed ispezione periodica in modo da assicurare e mantenere il loro corretto funzionamento durante la vita operativa dell'impianto.

Sono classificati in **gruppo di qualità N** i sistemi che non appartengono ai gruppi di qualità precedentemente definiti. I riferimenti normativi per tali componenti sono di tipo convenzionale commerciale, progettati secondo gli standard del fabbricante.

#### **A1-4.7.2. Classificazione sismica dei SSC**

In relazione alla classificazione sismica, le SSC dell'installazione sono suddivise in due categorie distinte:

- Categoria sismica (C-I);
- Categoria non sismica (NS).

Le SSC classificate in categoria sismica sono progettate per resistere al sisma di progetto, tenendo conto delle eventuali amplificazioni prodotte dalla risposta dinamica delle strutture dell'edificio. In tali condizioni, le SSC devono fronteggiare il sisma di progetto, combinato con altri carichi, mantenendo "non alterate" le proprietà necessarie per l'espletamento delle funzioni primarie di sicurezza ad esse richieste.

Sono classificati in categoria C-I, tra gli altri:

- i sistemi classificati in Classe di Qualità C ;
- i sistemi classificati in Classe di Qualità D che assicurano l'accessibilità dopo sisma ed il ripristino di condizioni di abitabilità per condurre gli interventi di recupero dell'impianto;
- i sistemi classificati in Classe di Qualità D o N il cui potenziale danneggiamento dopo sisma può causare un danno ai componenti classificati in categoria sismica C-I.

Saranno classificati in Categoria Non Sismica (NS) i SSC che non appartengono alle classi precedentemente definite.

### **A1-5. DESCRIZIONE GENERALE DEL DEPOSITO**

#### **A1-5.1. Generalità**

Nel presente capitolo si descrivono le scelte di base per lo sviluppo dell'analisi di sicurezza, attraverso si definiscono le caratteristiche delle strutture civili ed i requisiti funzionali e prestazionali degli impianti e sistemi.

## **A1-5.2. Scelte di riferimento per le strutture**

Il progetto strutturale del nuovo deposito sarà sviluppato in accordo alla normativa italiana attualmente in vigore e secondo metodologie e normative proprie dell'ingegneria nucleare.

Il valore degli spessori delle pareti e della copertura saranno scelti al fine di garantire la resistenza strutturale nei riguardi degli eventi naturali di Categoria III e per massimizzare lo schermaggio delle radiazioni derivanti dai colli stoccati.

## **A1-5.3. Scelte di riferimento per i sistemi principali del deposito**

### **A1-5.3.1. Confinamento delle aree**

Il contenimento del materiale radioattivo, che è la principale misura di protezione nei confronti degli operatori e della popolazione, sarà garantito mediante il confinamento delle aree del deposito.

Il confinamento sarà tale da garantire:

- il rilascio controllato dei radionuclidi nella biosfera, al di sotto di quantità e concentrazioni ritenuti accettabili e comunque tali che le conseguenze sugli operatori e la popolazioni siano inferiori agli obiettivi di progetto;
- la circoscrizione della eventuale contaminazione nei punti di produzione.

Il confinamento delle aree sarà del tipo statico e dinamico.

Il confinamento statico sarà garantito dalla struttura civile del deposito e, più in generale, dalla barriere fisiche interposte tra il rifiuto e l'ambiente esterno.

Il confinamento dinamico delle aree del deposito sarà garantito mediante il sistema di ventilazione. Tale sistema imporrà nel deposito un profilo di pressioni decrescenti verso i punti a maggiore rischio potenziale di contaminazione. L'aria estratta dai locali sarà espulsa nell'ambiente attraverso un opportuno sistema di filtrazione assoluta.

### **A1-5.3.2. Modalità di stoccaggio**

I colli saranno stoccati secondo modalità per le quali è verificata la stabilità allo scorrimento ed al ribaltamento in qualunque condizione di impianto.

Lo stoccaggio sarà effettuato, per quanto possibile, per gruppi omogenei, rispetto alla tipologia del contenitore ed alla provenienza dei rifiuti in esso contenuto.

La configurazione di stoccaggio sarà tale da:

- ridurre le dosi al personale addetto alle attività movimentazione ed ispezione dei colli schermando i colli con l'intensità di esposizione a contatto più elevata per mezzo di quelli "più freddi";
- facilitare le operazioni di movimentazione dei colli durante le fasi di caricamento, svuotamento, e di intervento straordinario sugli stessi;
- consentire l'ispezionabilità (diretta e remotizzata) dei colli massimizzando la superficie visibile per i rifiuti non condizionati;
- garantire gli spazi necessari agli operatori addetti alle operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria sui sistemi presenti all'interno dell'area di stoccaggio.

I colli potranno essere impilati ed il livello massimo di impilaggio sarà definito specificatamente per ogni tipologia di colli in relazione al peso e le dimensioni degli stessi.

Sarà garantita la verticalità dei colli impilati.

Saranno utilizzate per lo stoccaggio, ove necessario, delle strutture in carpenteria metallica all'interno delle quali verranno posizionati i singoli colli. L'impiego di tali gabbie modulari consentirà di:

- aumentare la stabilità dei colli in caso di sisma;
- facilitare e ridurre le operazioni di movimentazione;
- consentire l'impilaggio di colli non idonei per tali configurazioni di stoccaggio.

#### **A1-5.3.3. Sistema di movimentazione**

La movimentazione dei colli all'interno del deposito sarà effettuata con appositi sistemi adeguati alla massa dei colli stessi.

Saranno adottati tutti gli accorgimenti progettuali e procedurali al fine di ridurre, per quanto possibile, l'esposizione degli operatori alle radiazioni ionizzanti ed i rischi legati alle operazioni di movimentazione dei colli, in tutte le condizioni di impianto.

A tal fine, il caricamento del deposito sarà effettuato attraverso un sistema di movimentazione semiautomatico (carroponte).

Ove necessario, saranno impiegati sistemi di movimentazione del tipo Forklit.

#### **A1-5.3.4. Sistema di raccolta drenaggi**

La pavimentazione degli ambienti sarà realizzata in modo da convogliare gli eventuali liquidi dispersi ad una rete di drenaggio.

La superficie sarà trattata con verniciatura epossidica decontaminabile (tipo carrabile).

Tutte le superfici verticali fino al soffitto saranno trattate con verniciatura epossidica.

Sarà inoltre adottata una gestione integrale degli effluenti liquidi, in modo da assicurare che nessun rilascio di liquidi potenzialmente radioattivi possa avvenire accidentalmente nell'ambiente, in qualunque condizione d'impianto.

Eventuali serbatoi/vasche di raccolta saranno realizzati in acciaio inox per eliminare il rischio di corrosione e facilitarne la decontaminazione al termine della vita utile.

#### **A1-5.3.5. Prevenzione e protezione incendi**

Nella progettazione antincendio sarà applicata la normativa italiana e le norme UNI; sarà inoltre verificata la congruenza con i criteri contenuti nel documento NFPA 801 "*Standard fire protection for facilities handling radioactive materials*" e nelle "*Regulatory Guide 1.191 – Fire Protection Program For Nuclear Power Plants During Decommissioning and Permanent Shutdown*".

Il progetto esecutivo del sistema antincendio verrà sottoposto all'approvazione del Comando Provinciale dei VV.FF. Verrà richiesto successivamente il relativo certificato di prevenzione incendi secondo quanto previsto dal D.P.R. 37/98; essendo l'attività ricompresa negli elenchi del D.M. 16/02/1982.

Il sistema antincendio sarà definito in funzione del carico di fuoco e del rischio di incendio tipico di ogni area. Le strutture portanti saranno tali da possedere adeguate caratteristiche di resistenza al fuoco. Le misure antincendio dovranno essere compatibili con le necessità di radioprotezione.

Lo scopo del deposito oggetto del presente studio è l'immagazzinamento temporaneo di rifiuti radioattivi classificati di seconda categoria, in attesa del loro trasferimento al deposito nazionale.

L'edificio è costituito da due aree distinte:

- Area destinata allo stoccaggio
- Area destinata ad accogliere il personale autorizzato (edificio sociale).

L'area di stoccaggio è ricavata esclusivamente al piano terra dell'edificio, dove si possono ipotizzare 7 locali per lo stoccaggio dei fusti e 2 locali per lo stoccaggio dei rifiuti cementati oltre ai locali di manutenzione. Ai locali viene assegnata, convenzionalmente le sigle:

- da Pu1 a Pu7; per lo stoccaggio dei fusti, in particolare il Pu7 dovrà avere la funzione di stoccaggio degli overpacks, contenitori di dimensioni maggiori dei fusti da 220 litri, in cui sarà possibile stoccare i fusti eventualmente danneggiati;
- CM1 e CM2 per lo stoccaggio dei rifiuti cementati;
- Locali di Manutenzione "calda" (M1) e "fredda" (M2), quest'ultimo con porta comunicante con l'esterno.

Normalmente sono presenti due vie di entrata nella facciata dell'edificio: una preposta esclusivamente al transito dei materiali da posizionare nei vari locali, l'altra invece con funzione di accesso del personale autorizzato all'edificio sociale. Sono presenti, inoltre, due vie di comunicazione con l'esterno in un'altra facciata, una che riguarda il solo locale di Manutenzione "fredda"(M2), l'altra con la funzione esclusiva di uscita di sicurezza.

Dall'ingresso del deposito, attraverso un corridoio, si attraversa la zona uffici e si accede ad un'area di distribuzione dei locali di servizio al deposito:

- sala quadri;
- sala controllo;
- sala riunioni;
- WC;
- spogliatoi freddi.

<b>Locale</b>	<b>Tipologia di collo</b>	<b>Unità</b>	<b>Livelli di impilaggio</b>
Pu1	Fusto da 220 litri	576	3
Pu2	Fusto da 220 litri	168	2-3
Pu3	Fusto da 220 litri	168	2-3
Pu4	Fusto da 220 litri	264	2-3
Pu5	Fusto da 220 litri	280	2-3
Pu6	Fusto da 220 litri	336	2-3
Pu7	Overpacks	30	2

**Tabella A1: Capacità ipotetica dei locali del deposito.**

## **A1-6. DESCRIZIONE DEI SISTEMI AUSILIARI**

### **A1-6.1 Sistema antincendio**

#### **A1-6.1.1. Requisiti funzionali e criteri del sistema**

Le funzioni del sistema antincendio saranno quelle di:

- rilevare rapidamente, controllare ed estinguere un eventuale incendio che possa coinvolgere materiali potenzialmente contaminati;
- contribuire a minimizzare il rischio ai lavoratori e all'ambiente esterno, dovuto a rilasci di radioattività a seguito di incendio.
- Il sistema antincendio comprenderà:
- il sistema di rivelazione incendi;
- il sistema di estinzione incendi automatico;
- sistemi di estinzione incendi manuali.

#### **A1-6.1.2 Descrizione generale**

##### **A1-6.1.2.1 Sistema di rilevazione incendi**

Tale sistema sarà costituito da:

- rivelatori automatici di incendio;
- punti di segnalazione manuale d'incendio;
- dispositivi di allarme.

I rivelatori automatici di incendio saranno installati in tutte le aree del deposito. Essi saranno del tipo multicriterio (rivelazione fumo/rivelazione temperatura) e puntiformi a soffitto. Il numero di rivelatori in ciascuna area sarà valutato in maniera tale da assicurare la completa copertura delle aree protette, come previsto dalla normativa vigente, garantendo comunque un minimo di due rivelatori per ogni area (ridondanza). Oltre ai rivelatori, in ciascun locale di deposito dovranno installarsi dei pulsanti di segnalazione incendio manuali collegati anch'essi alla centrale di controllo. Tali pulsanti saranno installati in posizione chiaramente accessibile, lungo i percorsi di esodo. All'interno delle singole aree del deposito, dovranno essere installati segnalatori di allarme acustici e luminosi. Dovrà essere prevista una centrale di controllo per il sistema antincendio, alla quale saranno inviati i segnali dei sensori in caso di incendio. Essa svolgerà le funzioni di alimentazione, autotest e sorveglianza dei rivelatori, elaborerà i segnali provenienti dal campo e, in relazione alla natura dei segnali ricevuti, fornirà le seguenti segnalazioni:

- preallarme incendio, conseguente all'attivazione di un unico rivelatore;



- allarme incendio, conseguente all'attivazione di due o più rivelatori o alla attivazione di un pulsante di segnalazione incendio manuale;
- anomalie, in caso di guasti sulla linea di rivelazione, dovuti a:
  - interruzioni o corto circuito sulla linea;
  - guasti o mancanza di alimentazione elettrica ai circuiti di elaborazione e segnalazione allarme.

In seguito alla segnalazione di incendio in un locale, la centrale di controllo provvederà ad attivare:

- l'emissione di un allarme ottico-acustico nel locale interessato dall'incendio;
- l'emissione di un allarme ottico-acustico in tutte le altre aree dell'edificio;
- l'emissione di un allarme ottico-acustico sul pannello di controllo principale del deposito;
- l'intervento del sistema di estinzione automatico, qualora questo sia previsto a protezione del locale in cui è scoppiato l'incendio.

In caso di mancato intervento automatico del sistema di estinzione su segnalazione di incendio, l'immissione dell'estinguente in ciascun locale protetto potrà comunque essere forzata con comando manuale, proveniente da pannello di controllo o da un pulsante locale, come previsto dalla normativa vigente.

Analogamente, saranno previsti dei pulsanti manuali di arresto estinzione, sia su pannello di controllo che locali, come previsto dalla normativa vigente.

Qualora il locale interessato da incendio sia un locale protetto dal sistema di estinzione automatico, l'allarme ottico-acustico attivato nel locale fungerà anche da allarme di preavviso della scarica di estinguente, per consentire, con un adeguato tempo di ritardo, l'evacuazione del locale da parte di personale eventualmente presente, prima che la scarica di estinguente abbia inizio.

#### **A1-6.1.2.2. Sistema di estinzione incendi automatico**

Il sistema di estinzione incendi automatico proteggerà tutti i locali del deposito contenenti rifiuti combustibili non condizionati, ossia:

- ◆ locale Pu (da 1- a 7) ;

Il sistema di estinzione incendi sarà del tipo a soppressione gassosa, per evitare la produzione di rifiuti liquidi contaminati. I locali protetti saranno serviti da due gruppi di bombole: il primo assicurerà una scarica rapida di estinguente; il secondo assicurerà una scarica di mantenimento. Ciascun gruppo di bombole sarà ridonato. Dovranno essere previsti uno o più locali per

l'alloggiamento dei pacchi bombole. Tali locali potranno essere localizzati al primo piano dell'edificio. La scarica rapida di estinguente garantirà lo spegnimento dell'incendio nel locale sinistrato nel tempo richiesto dalla normativa vigente, che è dell'ordine della decina di secondi per numerosi estinguenti. La scarica di mantenimento, di più bassa portata, eviterà diluizioni, successivamente alla scarica rapida, della concentrazione di estinguente nel locale protetto e dunque possibili reinnesci dell'incendio. La scarica di mantenimento potrà avere una durata di circa 10 minuti. L'impianto dovrà essere dimensionato per determinare una concentrazione di estinguente nel locale non inferiore a quella di progetto. Durante la scarica di mantenimento la concentrazione di progetto dovrà essere almeno pari alla concentrazione di spegnimento dell'estinguente per incendi di classe A più un fattore di sicurezza del 20% come richiesto dalla normativa vigente. Contemporaneamente la concentrazione dovrà essere minore del livello di LOAEL, ossia della concentrazione in volume minima dell'estinguente in aria alla quale sono stati osservati effetti avversi sull'uomo, tossicologici o fisiologici<sup>17</sup>. Durante la scarica di estinguente il locale sinistrato dovrà essere mantenuto in depressione dal sistema di estrazione fumi, per evitare fuoriuscite di estinguente e fumi contaminati verso altri locali. Dovranno essere previsti, inoltre, dei pulsanti manuali per forzare l'intervento del sistema di estinzione automatico in caso di mancato intervento dello stesso su segnalazione di incendio. Allo stesso modo, dovranno essere previsti dei pulsanti manuali per arrestare l'intervento del sistema di estinzione, in caso si renda necessaria tale operazione (ad esempio in seguito ad un intervento spurio del sistema o, in generale, in caso di rischio per il personale eventualmente presente nel locale). In presenza di incendio, l'erogazione di estinguente avrà luogo nel solo locale interessato.

### **A1-6.1.2.3. Sistemi estinzione incendi manuali**

Nel deposito saranno presenti anche sistemi di estinzione manuali, costituiti da:

- idranti a muro;
- estintori portatili.

Dovranno essere presenti idranti a muro in corrispondenza dell'ingresso dell'edificio e lungo il perimetro di questo, per fronteggiare incendi di origine esterna al deposito.

In alcuni locali dell'edificio, (sala quadri, sala controllo, locale manutenzione calda e manutenzione fredda e locali di stoccaggio rifiuti cementati) per far fronte ad eventuali focolai di incendio di ridotte dimensioni, essendo il carico di incendio in tali locali pressoché nullo, saranno invece presenti estintori portatili idonei anche allo spegnimento di incendi su quadri elettrici.

---

<sup>17</sup> A tal proposito si definisce anche il livello di NOAEL: esso è la concentrazione in volume massima dell'estinguente in aria alla quale non sono stati osservati effetti avversi sull'uomo, tossicologici o fisiologici.

## **A1-6.2. Sistema di controllo**

### **A1-6.2.1. Requisiti funzionali e criteri del sistema**

Il sistema di controllo dovrà essere realizzato in modo conforme alle direttive CEI sulla compatibilità elettromagnetica in modo tale che:

- i disturbi elettromagnetici da esso generati siano limitati ad un livello che permetta agli apparecchi radio e di telecomunicazione di funzionare in modo conforme alle loro destinazioni;
- il sistema stesso abbia un adeguato livello di immunità contro i disturbi elettromagnetici, in modo tale che possa funzionare in modo conforme al proprio scopo.

### **A1-6.2.2. Descrizione generale del sistema**

Il sistema di controllo del deposito dovrà svolgere le seguenti funzioni:

- supervisione dei sistemi, apparecchiature e componenti di impianto;
- visualizzazione dello stato dei sistemi, apparecchiature e componenti di impianto;
- acquisizione/trattamento di dati e parametri di processo;
- acquisizione, elaborazione e visualizzazione di immagini video;
- gestione degli allarmi;
- comando delle apparecchiature;
- automazione di alcuni processi.

In particolare, il sistema di controllo dovrà occuparsi della gestione dei seguenti sistemi:

- sistema di ventilazione;
- sistema estrazione fumi;
- sistema trasferimento liquidi contaminati;
- sistema antincendio;
- sistema di monitoraggio radiologico;
- sistema di sorveglianza e comunicazione;
- sistema di rintracciabilità e recuperabilità colli;
- sistemi elettrico e di illuminazione.

Il sistema di controllo dovrà consentire lo svolgimento delle operazioni di supervisione del deposito dalla sala controllo dello stesso. In particolare, sarà anche possibile, per l'operatore in sala controllo, impartire comandi sugli elementi attivi in campo (valvole, motori, etc.) dei sistemi gestiti dal sistema di controllo.

Il sistema di controllo dovrà analizzare e verificare le condizioni logiche per:

- effettuare comandi automatici e di emergenza su sistemi, apparecchiature ed elementi in campo;
- generare segnalazioni ed allarmi;
- fornire consensi ai comandi manuali.

### **A1-6.2.3. Architettura del sistema**

Il sistema di controllo dovrà essere costituito dai seguenti componenti:

- Stazioni di Supervisione e comando informatizzate (SS), installate nel locale sala controllo;
- dispositivi per la realizzazione di una rete locale tra le SS in sala controllo;
- Stazioni periferiche di Automazione (SA), dislocate all'interno dell'edificio;
- dispositivi per la realizzazione di una rete locale tra le SA e per la comunicazione tra le SA e le SS;
- elementi in campo quali sonde, trasmettitori, telecamere, fincorsa e servomotori di valvole e serrande, unità di controllo in campo, altri tipi di attuatori in generale, etc.

Le stazioni di supervisione saranno costituite da personal computer e saranno collegate tra loro mediante un sistema di trasmissione dati digitale costituito da una rete locale. Una delle SS, denominata Stazione di Supervisione Principale (SSP), avrà la funzione di server. Dovrà essere prevista anche una Stazione di Supervisione dedicata al Backup della SSP che sarà denominata SSB ed avrà anche essa la funzione di server per la rete locale della sala controllo. Le postazioni di lavoro da prevedere all'interno della sala controllo saranno costituite da ulteriori stazioni di supervisione. Le Stazioni di Automazione dovranno essere collegate fra loro per mezzo di un sistema di trasmissione dati digitali costituito da una rete locale, a costituire un sistema di controllo distribuito che si interfacerà con la rete delle SS.

I vantaggi principali di tale approccio sono la facilità di gestione, sia delle informazioni acquisite dagli elementi in campo, sia dell'automazione e del controllo dei vari processi. I segnali generati dalla strumentazione e dagli elementi in campo potranno essere trasportati ad una delle SA o direttamente alla rete delle SS. In alcuni casi le funzioni di elaborazione dei segnali saranno eseguite da sistemi dedicati, integrati negli elementi in campo (ad esempio per i rivelatori di radiazioni). Il funzionamento dei vari sistemi potrà essere gestito sia in modalità automatica (mediante cicli operativi programmabili impostati dagli operatori) che manuale. In ciascuno dei due casi, i sistemi potranno essere gestiti sia in modalità remota, dalle SS della sala controllo, sia in modalità locale, dal pannello grafico di interfaccia (schermo touchscreen) delle SA o mediante un terminale operatore portatile da collegare ad una qualunque delle SA. Le modalità di funzionamento (manuale/automatico, remoto/locale) saranno stabilite dall'operatore mediante dei

comandi impartiti dalle SS in sala controllo. Le SS dovranno consentire la gestione e la supervisione da sala controllo degli elementi in campo e, in generale, di tutti i sistemi, componenti ed attrezzature collegati al sistema di controllo.

Mediante la tastiera operativa delle SS è possibile per l'operatore in sala controllo eseguire i seguenti comandi:

- selezione dei punti di misura;
- variazione dei valori di set point;
- variazione di grandezze di comando e parametri;
- selezione delle modalità operative "manuale/automatico" per i singoli sistemi;
- selezione delle modalità di controllo "remoto (da sala controllo)/locale (da pannello di controllo locale)" per i singoli sistemi;
- preselezione sequenze operative;
- comando delle singole utenze;
- presentazione e selezione delle immagini trasmesse dalle telecamere;
- ricerca dati e informazioni colli.

Le SA dovranno provvedere al comando, al controllo e alla regolazione degli elementi in campo tramite le seguenti funzioni:

- raccolta ed elaborazione dei dati;
- regolazione ed eventuale esecuzione di programmi predefiniti;
- verifica di condizioni logiche per effettuare comandi automatici e di emergenza e produrre le relative segnalazioni ed allarmi;
- verifica di condizioni logiche per effettuare i consensi ai comandi manuali impartiti dagli operatori e produrre le relative segnalazioni ed allarmi;
- comunicazione tra le diverse unità ed eventuale esecuzione di programmi senza il coinvolgimento della unità centrale.

L'architettura del sistema di controllo permette di identificare i seguenti livelli:

- Livello 1: Livello di gestione, costituito dalle apparecchiature di supervisione, comando, elaborazione e presentazione delle informazioni (Stazioni di Supervisione SS e componenti per la realizzazione della rete). Lo scopo del livello 1 dovrà essere quello di elaborare e presentare in modo efficace agli operatori le informazioni ricevute dalle Stazioni di Automazione (SA) o direttamente dagli elementi in campo, nonché di consentire la supervisione e la gestione degli impianti da parte degli operatori presenti nella sala controllo. L'interfaccia con l'operatore dovrà essere realizzata in lingua italiana.
- Livello 2: Livello di automazione, costituito dalle Stazioni di Automazione (SA), dai dispositivi necessari per realizzare il collegamento tra le SA e tra le SA e le SS e dalle interfacce grafiche per la gestione da locale degli elementi in campo e degli impianti ad essi

collegati. Lo scopo del livello di automazione dovrà essere quello di elaborare i segnali provenienti dagli elementi in campo, (laddove necessario) consentire l'automazione di alcuni processi, consentire il comando degli elementi in campo mediante i pannelli grafici di interfaccia locali delle SA o terminali operatori portatili da collegare alle SA e rendere disponibili dei contatti liberi per la remotizzazione degli allarmi ad una postazione permanentemente presidiata. L'interfaccia con l'operatore dovrà essere realizzata in lingua italiana.

- Livello 3: costituito dagli elementi in campo quali sonde, trasmettitori, telecamere, finecorsa e servomotori di valvole e serrande, unità di controllo in campo, altri tipi di attuatori in generale, etc.
- Il sistema di controllo si dovrà interfacciare quindi con l'operatore sia attraverso le SS collocate in sala controllo, sia attraverso le SA (con i pannelli grafici di interfaccia o con i terminali operatori portatili).

### **A1-6.3. Sistema elettrico**

#### **A1-6.3.1. Requisiti funzionali e criteri del sistema**

Le funzioni del sistema elettrico saranno quelle di:

- fornire energia elettrica a equipaggiamenti ed apparecchi utilizzatori, necessari al funzionamento del deposito;
- fornire energia al sistema di illuminazione interna ed esterna all'edificio, tale da garantire i livelli di luminosità richiesti per ogni locale o zona operativa del deposito;
- proteggere il personale e le apparecchiature da sovratensioni dovute a guasti o malfunzionamenti di apparecchiature elettriche mediante la realizzazione di un sistema di protezione dai contatti indiretti collegato all'impianto di terra.

La progettazione sarà effettuata in accordo alla Normativa Italiana vigente in materia e, ove applicabile, a quella Internazionale, con particolare riferimento alle norme di unificazione UNI-CEI ed alle regole di buona ingegneria.

#### **A1-6.3.2. Descrizione generale del sistema**

Per l'alimentazione degli utilizzatori elettrici all'interno del deposito dovrà essere prevista una distribuzione comprendente:

- una rete di forza motrice trifase 380 V - 50 Hz destinata ad utenze trifase di grossa potenza;

- una rete di forza motrice trifase 380/220 V - 50 Hz destinata a circuiti di illuminazione e forza motrice di piccola potenza (monofase o trifase);
- una rete di distribuzione circuiti ausiliari in corrente continua con tensione da definire in sede progettuale;
- una sezione di continuità assoluta 380/220 V c.a. 50 Hz trifase, costituita da due gruppi di continuità statici di uguale potenza.

### **A1-6.3.3. Sorgenti di alimentazione**

Dovranno essere disponibili le seguenti sorgenti di alimentazione elettriche:

- sorgente di alimentazione elettrica primaria;
- sorgenti di alimentazione di emergenza;
- sorgente di continuità assoluta.

La sorgente primaria di energia elettrica potrà essere costituita da una cabina di trasformazione equipaggiata con due unità di uguale potenza, delle quali una in servizio di riserva. La cabina sarà alimentata dalla rete elettrica nazionale. Per quel che attiene alle esigenze di continuità di servizio in caso di mancanza di tensione da rete nazionale, dovranno essere presenti due stazioni di generazione diesel di emergenza (1+1 di riserva). La sorgente di continuità assoluta dovrà essere costituita da due unità UPS identiche, una di riserva all'altra.

### **A1-6.3.4. Quadro generale e distribuzione primaria**

Tutti i carichi dell'utenza elettrica costituita dal deposito dovranno far capo ad un quadro generale di bassa tensione, che sottenderà i quadri secondari. Il quadro sarà ubicato nel locale A-1.

L'apparecchiatura di protezione dei circuiti sotesi, siano essi di illuminazione che di forza motrice, sarà in linea generale costituita da interruttori magnetotermici corredati, dove necessario, di elemento differenziale per la protezione contro i guasti a terra. Le due sezioni del quadro generale alimenteranno i carichi dell'utenza deposito come di seguito descritto:

- la sezione "normale", alimentata dalla cabina di trasformazione, è destinata a sottendere i carichi per i quali è accettata una temporanea interruzione dell'alimentazione,
- la sezione di "emergenza", alimentata in caso di emergenza dal gruppo diesel, è destinata ad alimentare i carichi per i quali è necessario garantire la continuità di alimentazione.
- la sezione di "ininterrompibilità", alimentata dagli UPS, è destinata a sottendere le utenze per le quali dovrà essere garantita la continuità assoluta di servizio, non interrompibile neanche per brevi transitori.

### **A1-6.3.5. Interconnessioni e vie cavo**

Gli attraversamenti di condutture elettriche fra zone a diverso rischio radiologico e di contaminazione dovranno essere realizzati in modo da impedire la diffusione di aria fra le zone attraversate. Allo stesso modo, gli attraversamenti di condutture elettriche fra diversi compartimenti antincendio si prevede siano realizzati in modo da ripristinare la classe di resistenza al fuoco dei compartimenti interessati. La posa delle suddette condutture in aree a rischio di contaminazione ambientale dovrà tener conto inoltre dei seguenti criteri costruttivi:

- le condutture dovrebbero essere installate preferibilmente in alto con discesa sulle apparecchiature elettriche collegate;
- tutte le superfici esterne compresi i sostegni metallici dovranno essere facilmente decontaminabili;
- per quanto possibile è necessario che sia evitato o ridotto al minimo l'utilizzo di sostanze combustibili e infiammabili.

La rete di distribuzione utenze, compresi gli equipaggiamenti elettrici delle attrezzature saranno equipaggiati di apparecchiature di protezione contro corto circuiti, sovraccarichi e correnti di guasto a terra al fine di:

- assicurare un sufficiente livello di protezione contro danni agli equipaggiamenti elettrici, cavi, ecc. derivanti da sovraccarichi e guasti di corto circuito;
- assicurare, entro le normali possibilità, la continuità di esercizio delle parti di impianto non interessate al guasto;
- garantire la sicurezza delle persone contro contatti indiretti.

### **A1-6.4. Sistema di monitoraggio**

#### **A1-6.4.1. Requisiti funzionali e criteri del sistema**

Il sistema di monitoraggio radiologico avrà le seguenti funzioni:

- protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione;
- segnalazione dell'insorgere di anomalie o del verificarsi di incidenti;
- controllo dell'eventuale contaminazione degli ambienti del deposito e dell'aria rilasciata al camino;
- controllo dei livelli di irraggiamento nei locali di deposito;
- trasmissione dei dati di monitoraggio e delle eventuali segnalazioni di allarme in sala controllo.

Il sistema di monitoraggio radiologico comprenderà i seguenti sottosistemi:

- sistema di monitoraggio alfa dell'aria;



- sistema di monitoraggio ambientale;
- sistema di monitoraggio del personale.

#### **A1-6.4.2. Descrizione generale**

##### **A1-6.4.2.1. Sistema di monitoraggio alfa dell'aria**

Tale sistema provvederà al monitoraggio alfa:

- dell'aria nei locali del deposito contenenti rifiuti alfa contaminati;
- dell'aria nei locali non contenenti rifiuti alfa, ma comunque soggetti a potenziale contaminazione alfa;
- dell'aria espulsa al camino.

Nei locali contenenti rifiuti contaminati  $\alpha$  (Pu1/Pu7), saranno predisposti misuratori continui dell'aria estratta dal sistema di ventilazione. I misuratori continui potranno essere installati in corrispondenza dei punti di prelievo dell'aria dai singoli locali, prima dell'eventuale congiungimento della linea di estrazione aria del locale in esame con altre linee, per evitare miscelamenti dell'aria estratta da altri locali. Per il monitoraggio dell'aria espulsa al camino, dovranno essere predisposti dei misuratori continui a valle dei filtri assoluti del sistema di ventilazione e a valle dei filtri assoluti del sistema di evacuazione fumi. Nei locali contenenti rifiuti contaminati  $\alpha$  (Pu1/Pu7) e in tutti i locali soggetti anche solo a potenziale contaminazione alfa (ad es. corridoi, spogliatoi caldi, etc.) saranno inoltre disposti dei campionatori continui di aria.

I misuratori continui dovranno essere del tipo a filtro fisso, con presa campione e analisi in tempo reale. Essi dovranno essere dotati di:

- rivelatore del tipo a contatore proporzionale, allo stato solido;
- display locale con indicazione del valore d'intensità di dose;
- led luminosi e cicalini per segnalazione locale, ottica e acustica, di malfunzionamento, preallarme e allarme, con soglie regolabili su tutto il campo;
- uscite ripetitive, per il trasferimento di informazioni e allarmi al sistema di controllo;
- sistema di autodiagnosi;
- sistema di calibrazione del rivelatore.

Le informazioni e gli allarmi provenienti dai misuratori continui dovranno essere inviati al sistema di controllo.

Per quanto riguarda i campionatori di aria, l'aspirazione dell'aria sarà in continuo mentre la misurazione dovrà essere del tipo periodica indiretta.

Il numero, la posizione e il range di energia dei dispositivi di monitoraggio alfa saranno stabiliti in funzione della volumetria del locale da monitorare e del livello di contaminazione previsto.

### **A1-6.4.2.2. Sistema di monitoraggio ambientale**

Tale sistema provvederà a monitorare il livello di intensità di irraggiamento gamma nei vari locali del deposito in esame.

La rete di misuratori gamma sarà costituita da stazioni di misura, munite di sonde di rivelazione. Le stazioni di misura dell'irraggiamento gamma saranno posizionate in tutti i locali del deposito. Per il monitoraggio dell'aria espulsa al camino, saranno predisposte delle stazioni di misura gamma a valle dei filtri assoluti del sistema di ventilazione e a valle dei filtri assoluti del sistema di evacuazione fumi.

Ogni unità di misura sarà costituita da:

- rivelatore di radiazioni;
- monitor locale di area.

Il segnale generato dai rivelatori in campo dovrà essere inviato al relativo monitor di area, collegato al sistema di controllo.

I monitor di area dovranno essere dotati di:

- display locale con indicazione del valore d'intensità di dose;
- led luminosi e cicalini per segnalazione locale, ottica e acustica, di malfunzionamento, preallarme e allarme, con soglie regolabili su tutto il campo;
- uscite per il trasferimento di informazioni e allarmi al sistema di controllo;
- sistema di autodiagnosi;
- sistema di calibrazione del rivelatore.

Il numero, la posizione e il range di energia dei dispositivi di monitoraggio ambientale saranno stabiliti in funzione della volumetria del locale da monitorare e del livello di contaminazione previsto.

### **A1-6.4.2.3. Sistema di monitoraggio del personale**

Sarà previsto un monitore mani e piedi in uscita dalle aree di stoccaggio del deposito.

Il portale mani e piedi avrà le seguenti caratteristiche:

- strumentazione predisposta per rilevare la contaminazione superficiale alfa/beta/gamma sulle mani e sotto i piedi;
- rivelatori protetti con griglia;
- superfici delle parti sensibili aventi adeguata resistenza agli urti e facilmente decontaminabili;
- possibilità di collegamento e trasferimento dati al sistema di controllo;
- possibilità di conservare i dati impostati su apposita memoria, in caso di mancanza di alimentazione di rete;

- campo di misura esteso su almeno 4 decadi.

Il monitor si prevede che sia dotato di display locale per la visualizzazione delle seguenti indicazioni:

- strumento operativo;
- misura in corso;
- misura interrotta;
- allarme di superamento limite impostato;
- assenza di radioattività e autorizzazione al transito;
- fondo di radiazioni alto.

In caso di superamento del limite impostato, l'allarme ottico sarà accompagnato anche da un allarme acustico.

## **A1-6.5. Sistema di ventilazione e condizionamento**

### **A1-6.5.1. Requisiti funzionali e criteri del sistema**

I principali requisiti funzionali del sistema di ventilazione e di condizionamento:

- Limitare l'esposizione del personale nei confronti di eventuali aerosol di materiali radioattivi sviluppati, realizzando flussi di aria dalle zone a minor rischio verso quelle a maggior rischio di contaminazione.
- Garantire il contenimento dinamico della atmosfera delle aree potenzialmente contaminate, mantenendole in depressione rispetto all'esterno, in modo da impedire fuoriuscite incontrollate di contaminazione nell'ambiente.
- Limitare eventuali rilasci ambientali di materiale radioattivo a mezzo di un opportuno trattamento di filtrazione dell'aria in uscita dall'edificio.
- Disperdere nell'ambiente esterno in condizioni controllate l'aria effluente dall'edificio.
- Mantenimento delle condizioni termoigrometriche di confort per il personale;
- Mantenere all'interno delle aree di lavoro condizioni di sicurezza e di adeguata aerazione per il personale, a mezzo di un conveniente numero di ricambi di aria.
- Mantenere la temperatura entro i parametri indicati per il buon funzionamento della strumentazione di controllo e per evitare sia fenomeni di corrosione dei colli stoccati, che formazione di condensa.
- Garantire un funzionamento continuo ed automatico, provvedendo alla segnalazione di eventuali anomalie.

La ventilazione della sala controllo, del locale RPO e degli spogliatoi sarà realizzata totalmente con aria esterna, evitando ricircoli che, in caso di malfunzionamenti, possono provocare il rischio di immissioni di aerosol o polveri radioattive nelle aree suddette.

Saranno previsti livelli di depressione differenziati a seconda della tipologia di collo stoccato e, in generale, a depressione crescente dalle aree a minore contaminazione potenziale alle aree a maggiore contaminazione potenziale.

I livelli minimi di depressione previsti sono:

- 20 Pa, per la sala controllo e il magazzino;
- 40 Pa, per i corridoi;
- 60 Pa per i locali contenenti i fusti con i rifiuti contaminati alfa, per i locali contenenti i rifiuti cementati e per il locale Manutenzione “calda”.

I dispositivi di fissaggio dei componenti del Sistema nei locali destinati a deposito, verranno dimensionati e verificati a fronte del sisma di progetto, come previsto dalla normativa sismica applicabile. Questo al fine di evitare il danneggiamento dei colli in deposito a seguito di eventuali rotture per sisma dei componenti dell'impianto.

#### **A1-6.5.2. Descrizione del sistema**

Il sistema di ventilazione e di condizionamento sarà costituito dai seguenti componenti:

- Canalizzazioni di estrazione aria dai singoli locali di deposito;
- Canalizzazioni di raccordo dell'aria estratta dai singoli locali del deposito alla sezione di filtrazione assoluta, che si prevede sia costituita da un doppio banco di filtrazione, uno di riserva all'altro.
- Ventilatori di estrazione, uno di riserva all'altro, muniti di inverter per variare la prevalenza elaborata a fronte del progressivo intasamento dei filtri assoluti e di canalizzazione di raccordo delle rispettive mandate al camino;
- Canalizzazioni di immissione dell'aria nei vari locali;
- Unità di trattamento aria immessa;
- Serrande tagliafuoco in corrispondenza di ciascun attraversamento tra compartimenti adiacenti e in corrispondenza di ogni immissione ed estrazione dell'aria ai/dai locali di deposito.
- In particolare, l'unità di trattamento aria esterna sarà così composta:
  - serranda di presa aria esterna motorizzata,
  - sezione di prefiltrazione,
  - sezione di filtrazione,

- batteria di preriscaldamento,
- batteria di raffreddamento/deumidificazione,
- sezione di umidificazione adiabatica a lavatore,
- separatore di gocce,
- n° 2 ventilatori di mandata, uno di riserva all'altro, completi di serrande di esclusione e regolazione della portata tramite inverter

### **A1-6.5.3 Logica di funzionamento del sistema**

Sarà mantenuto in funzionamento continuo uno dei due ventilatori di estrazione per garantire i richiesti valori di depressione e di portata di estrazione dell'aria nei locali di deposito del piano terra, nel corridoio, nel magazzino e nel locale RPO.

In caso di malfunzionamento del ventilatore di estrazione, è previsto un ventilatore di riserva.

I livelli di depressione e di portata estratta sono garantiti anche a fronte del progressivo intasamento dei filtri assoluti grazie alla presenza di inverter sui ventilatori di estrazione.

La misura delle portate di estrazione, ai fini del controllo delle medesime, sarà affidata a cassette di controllo a regolazione digitale.

Il controllo delle depressioni da mantenere nei locali di deposito sarà effettuato anche mediante l'impiego di serrande motorizzate, pilotate in funzione della misura fornita da sonde di pressione. Sarà previsto un indice di ventilazione di 5 Vol/h per tutti i locali serviti.

### **A1-6.6. Sistema di evacuazione fumi**

#### **A1-6.6.1 Requisiti funzionali del sistema**

In caso di incendio e successivo intervento, in un compartimento, dell'impianto di estinzione incendi automatico, è necessario evitare che il comparto stesso si porti in condizioni di sovrappressione rispetto ai locali adiacenti, con conseguente perdita del confinamento dinamico.

La sovrappressione nel locale sinistrato potrebbe essere causata sia dall'innalzamento della temperatura nel compartimento, sia dall'immissione di estinguente.

A tal fine è previsto un impianto di evacuazione fumi, completamente separato dall'impianto di estrazione normale, che serve tutti i locali protetti dal sistema di estinzione automatico.

#### **A1-6.6.2. Descrizione del sistema**

L'impianto in questione è composto da:

- presa fumi, normalmente chiusa, nella parte alta di ciascun comparto, dotata di serranda tagliafuoco motorizzata;
- condotto di evacuazione fumi con protezione REI 120, che raccorda le estrazioni dei comparti con i ventilatori di estrazione fumi;
- gruppo di filtrazione assoluta, resistente a 200°C per 2 ore;
- coppia di ventilatori, uno di riserva all'altro, resistenti a 200°C per 2 ore, dotati di serrande di intercettazione motorizzate;
- inverter a servizio di ciascun ventilatore, per permettere la variazione di depressione sul condotto di estrazione fumi;
- sistema di controllo della depressione a mezzo misuratori;
- condotto di scarico fumi al camino, REI 120.
- presa di aria esterna a valle dei filtri assoluti, con regolazione tramite serranda motorizzata, al fine di garantire una portata minima al ventilatore in assenza di fumi;
- presa d'aria esterna a monte dei filtri assoluti, con regolazione tramite serranda motorizzata, per permettere la diluizione dei fumi mantenendoli a temperatura inferiore a 200°C.

#### **A1-6.6.3 Logica di funzionamento del sistema**

- In condizioni normali le serrande tagliafuoco dei locali protetti sono mantenute chiuse ed il condotto di estrazione viene mantenuto ad un opportuno livello di depressione con uno dei due ventilatori in funzione e con prelievo dell'aria dalla presa a valle dei filtri assoluti. In questo modo si garantisce la portata minima necessaria a mantenere in depressione il condotto di estrazione, senza però comportare lo sporco dei filtri.
- In caso di incendio in un locale protetto dal sistema di estinzione automatico viene chiusa la serranda tagliafuoco sul canale di immissione aria nel compartimento e viene arrestato il ventilatore premente del sistema di ventilazione; successivamente viene chiusa la serranda tagliafuoco sul canale di estrazione aria dal compartimento e viene arrestato il ventilatore di estrazione del sistema di ventilazione;
- viene quindi chiusa la presa aria esterna a valle dei filtri e aperta la presa aria esterna a monte dei filtri;
- viene infine aperta la sola serranda tagliafuoco dell'impianto di evacuazione fumi relativa al comparto in cui si è sviluppato l'incendio;
- ha inizio la scarica veloce e l'estrazione fumi, con funzionamento del sistema di evacuazione fumi tale da garantire la portata desiderata e la depressione voluta nel comparto; questa fase ha una durata dell'ordine di 10 secondi;
- ha inizio la scarica di mantenimento per una durata dell'ordine di 10 minuti, con funzionamento del sistema di evacuazione fumi a portata ridotta.

### **A1-6.7. Sistema drenaggi**

Il sistema drenaggi avrà la funzione di evitare eventuali contaminazioni della biosfera che potrebbero risultare dallo scarico incontrollato di reflui liquidi durante la gestione del deposito.

#### **A1-6.7.1. Ipotesi iniziali**

Nella configurazione prevista, si esclude la presenza di liquidi nel deposito per i seguenti motivi:

- Non saranno stoccati rifiuti liquidi;
- Non sono previste tubazioni che adducano acqua nei locali destinati a deposito;
- Il sistema di estinzione incendi sarà a soppressione gassosa, quindi senza impiego di liquidi;
- Le fondazioni dovranno essere poste sopra il massimo livello di falda ipotizzabile, in riferimento alle caratteristiche idro-geologiche del sito dove dovrà essere costruito il deposito.
- Le porte di accesso dovranno essere dotate di soglia rialzata (almeno 20 cm) per impedire l'ingresso dell'acqua dall'esterno nonché la dispersione all'esterno di eventuali liquidi sversati all'interno dei locali.
- La copertura dell'edificio dovrà essere impermeabile al passaggio dell'acqua piovana.
- Le acque piovane si prevede siano convogliate dalla copertura alla rete fognaria.

Sulla base di queste considerazioni potrebbe essere possibile non realizzare una specifica rete di raccolta a pavimento.

Tuttavia, nonostante se ne preveda un uso molto limitato, prevalentemente legato a situazioni di emergenza e in quantità ancora minore, come nel caso di eventuali fenomeni di condensa al camino, saranno previsti i seguenti scarichi controllati:

- pilette area di stoccaggio;
- pilette e lavabi spogliatoi caldi;
- pilette doccia e lavabo locale di decontaminazione;
- raccolta condensa camino.

#### **A1-6.7.2. Logica di gestione degli effluenti**

Sono previsti due serbatoi (1+1 di riserva) per l'accumulo degli scarichi eventualmente prodotti dall'impianto. Tali serbatoi saranno ubicati in un locale al di sotto della quota di stoccaggio dei rifiuti.

Una volta verificata la presenza di liquido all'interno dei serbatoi di accumulo, lo stesso sarà trattato secondo la seguente procedura:

- campionamento, per verificare la rilasciabilità del liquido in accordo alla procedura di scarico del sito;
- rilascio diretto del liquido ovvero attivazione di un sistema di trattamento in caso di non rispondenza del liquido alle condizioni imposte per il rilascio diretto.

Il campionamento, l'eventuale trattamento ed il rilascio del liquido saranno effettuati mediante un sistema (skid) da posizionare all'interno del locale serbatoi. Il sistema sarà dotato di pompa (ridondata) autoadescante per il ricircolo ed il trasferimento del liquido, serbatoio di piccola capacità per il campionamento, batterie modulari di cartucce filtranti per l'eventuale trattamento dei liquidi e tubazioni di collegamento flessibili alle vasche di raccolta del sito ed alla tubazione di scarico.

In particolare, saranno previsti due collegamenti flessibili con la vasca di raccolta. Le tubazioni flessibili saranno collegate alle estremità di due tubazioni, rese accessibili nel locale serbatoi, collegate con la vasca di raccolta ed annegate nella struttura civile del deposito. Normalmente, tali estremità saranno chiuse con flangia cieca. Una tubazione sarà utilizzata per il prelievo del liquido, l'altra per il ricircolo del liquido nella vasca.

Il rilascio del liquido sarà realizzato mediante una tubazione fissa, collegata con la rete scarichi bianchi di centrale. L'estremità di tale tubazione sarà disponibile per il collegamento con la tubazione flessibile del sistema carrellato all'interno dell'area operativa. Tale estremità sarà, normalmente, chiusa con flangia cieca.

Eventuali perdite durante le operazioni rimarranno confinate nel deposito, raccolte dal sistema drenaggi previsto nell'area operativa e convogliate nuovamente nelle vasche di raccolta. Inoltre, durante le operazioni di campionamento, trattamento e rilascio dei liquidi sarà garantito il confinamento dinamico dell'area operativa, attraverso il sistema di ventilazione del deposito. Il comando delle operazioni sarà effettuato dall'operatore direttamente dal pannello di comando previsto sullo skid.

#### **A1-6.8. Sistema di movimentazione colli**

La movimentazione dei colli nel deposito si prevede sia effettuata mediante carrelli elevatori elettrici a forche frontali e mediante carroponete.

L'utilizzo dei carrelli elevatori è previsto lungo i corridoi e nei locali di immagazzinamento dei rifiuti non condizionati (Pu1 ÷ Pu7).

I carriponte, invece, saranno utilizzati nei soli locali destinati allo stoccaggio dei rifiuti cementati (CM1 e CM2).

Si riportano di seguito le caratteristiche principali dei carriponte che dovranno essere installati.



### **A1-6.8.1. Carriponte di movimentazione**

#### **A1-6.8.1.1 Requisiti**

- Il guasto di un singolo componente o un qualsiasi errore singolo dell'operatore, non dovranno causare lo sbilanciamento o la caduta del carico.
- Le apparecchiature dovranno consentire le operazioni di manutenzione straordinaria, compresa la sostituzione dei componenti danneggiati, con il massimo carico appeso.
- Le apparecchiature dovranno permettere il ripristino dei guasti durante la movimentazione dei contenitori in modo da minimizzare le dosi al personale addetto alle riparazioni (permettendo, ad esempio, il posizionamento dei contenitori in zona sicura, l'adozione di schermi ecc.).
- I carichi dovuti alle operazioni di movimentazione dei manufatti dovranno essere valutati secondo quanto previsto dalle normativa vigente.
- Le strutture portanti dei carriponte dovranno essere dimensionate per resistere, senza svincolarsi dalle vie di corsa, anche al sisma di progetto SSE.
- Le verifiche in condizioni sismiche dovranno essere effettuate considerando la presenza del carico massimo appeso.

#### **A1-6.8.2. Funzioni**

Ai carriponte di movimentazione saranno affidate le seguenti funzioni:

- consentire la movimentazione e l'impilaggio dei vari colli;
- minimizzare le dosi ed i rischi per i lavoratori addetti alle operazioni di movimentazione in tutte le condizioni di impianto.

#### **A1-6.8.3. Descrizione**

Il deposito sarà servito da due carriponte, uno per campata. I carriponte saranno del tipo bitrave con portata adatta alla movimentazione dei contenitori immagazzinati nei due locali CM1 e CM-2.

Il meccanismo di sollevamento previsto è basato sull'impiego di 4+4 funi avvolte a due tamburi.

Le funi agganciano un corpo di sollevamento intermedio, che è a sua volta vincolato alla pinza di sollevamento del collo.

Lo schema funzionale previsto per il singolo carroponte è riportato nella Figura A1. Con il sistema di doppia fune risulta anche garantita la totale ridondanza nel caso di rottura fune, sia per la movimentazione che per lo sbilanciamento del carico.

Le vie di corsa per la movimentazione saranno posizionate su mensole continue in calcestruzzo. Il carro ponte sarà comandato in modo semiautomatico da una postazione ubicata in sala controllo. Tale scelta è stata attuata per minimizzare la dose assorbita dagli operatori durante le attività di movimentazione dei colli (fase di caricamento e fase di svuotamento del deposito).

Un sistema di presa video sul carrello fornirà all'operatore il supporto visivo necessario allo svolgimento delle operazioni. Il numero di telecamere sarà definito nel corso delle successive fasi operative di sviluppo del progetto.

Di conseguenza, in generale, non è prevista la presenza dell'operatore nel deposito durante le fasi di carico e scarico dei contenitori/colli.

Dal punto di vista operativo, la movimentazione sarà gestita attraverso il supervisore abbinato al carro ponte. Il sistema di controllo utilizzerà un sistema di coordinate tridimensionale (x,y,z) per definire il volume interno dei due locali. Rispetto a tale sistema di riferimento, saranno definite le coordinate occupate da un punto identificato del singolo collo (ad es. il centro geometrico) nella configurazione di stoccaggio.

L'operatore avrà la possibilità di definire le coordinate in pianta (x;y) della posizione occupata dal generico collo nell'area deposito ed abilitare lo spostamento orizzontale del carro ponte. Solo una volta raggiunta la posizione definita, sarà possibile abilitare la discesa del collo (traslazione lungo la verticale, asse z) alla quota di scarico/carico.

Per guidare il carro ponte nella posizione desiderata l'operatore avrà la possibilità di utilizzare opportuni sistemi ottici e sistemi di ausilio alla manovra (come celle di carico, sistemi per la valutazione della distanza dal pavimento, ecc.), che forniscono all'operatore informazioni aggiuntive alle immagini riprese dalla telecamera.

Il carro ponte sarà dotato di opportuni sistemi di antipendolamento del carico.

Il comando della traslazione verticale del carico sarà effettuato manualmente dall'operatore.

Durante la fase di sollevamento, lo spostamento sul piano x,y potrà essere abilitato solo una volta raggiunta la quota definita per la movimentazione orizzontale.

Dal punto di vista della sicurezza, il sistema è concepito per riportare, in caso di anomalie, il carico nella zona di accesso e spedizione. La macchina sarà pertanto dotata di motori ridondati per la movimentazione in tutte le direzioni (x,y,z).

La modalità di aggancio del sistema di sollevamento intermedio (tiro a 4+4 funi) è stata scelta per garantire, in caso di rottura di una fune, che il collo rimanga sospeso senza subire inclinazione.

Le singole funi avranno un elevato fattore di sicurezza.

Nella configurazione di riposo, il carro ponte sarà posizionato nella zona dell'edificio sovrastante l'area operativa, nella quale saranno effettuate tutte le attività di manutenzione previste. L'accesso alle diverse parti della macchina, sarà possibile attraverso passerella.

Sono possibili interventi straordinari, di breve durata, sulla macchina all'interno dell'area di stoccaggio del locale. Tali interventi saranno finalizzati esclusivamente a ripristinare un eventuale

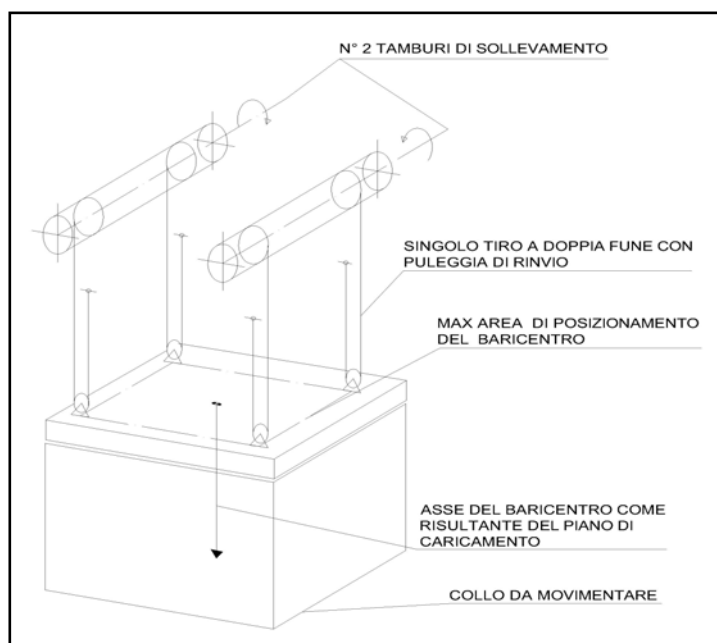
malfunzionamento al sistema di traslazione del ponte necessario per trasferire la macchina stessa nella zona di manutenzione.

Da quanto riportato nei requisiti, non si prevede che possano verificarsi, a seguito di sisma, danneggiamenti al sistema in esame che potrebbero richiedere interventi di manutenzione. Inoltre, come nei locali serviti da carrello elevatore, è necessario garantire che i contenitori stoccati rimangano nella posizione originaria affinché sia possibile la loro movimentazione anche in seguito al sisma di progetto.

Il sistema sarà alimentato dalla sezione normale del quadro elettrico generale.

Il carro ponte dovrà assicurare il mantenimento del carico in condizioni di sicurezza in caso di perdita di alimentazione elettrica o malfunzionamenti al suo sistema di controllo.

La ridondanza dei sistemi di alimentazione elettrica non è pertanto necessaria ai fini della sicurezza durante le varie fasi di movimentazione. Infatti, in caso di mancanza di energia, le operazioni di movimentazione saranno temporaneamente sospese, lasciando il carico appeso fino al ritorno dell'alimentazione.



**Figura A1 - Schema preliminare carriponte**

## **A1-7. Gestione del deposito**

### **A1-7.1. Piano di caricamento: criteri**

Il piano di caricamento è stato elaborato in maniera tale da soddisfare i seguenti criteri specifici di progetto, derivati da quelli generali contenuti nei Capitoli precedenti:

- garantire il confinamento statico e dinamico dei rifiuti, per circoscrivere, in caso di incidente, l'eventuale contaminazione nei punti di produzione e impedire il trasferimento di materiale radioattivo verso l'esterno e verso gli altri locali dell'edificio;
- minimizzare le dosi al personale non classificato nelle condizioni di massimo riempimento del deposito;
- minimizzare le dosi al personale addetto alle attività di movimentazione ed ispezione dei colli, schermando, ove possibile, i colli con l'intensità di esposizione a contatto più elevata per mezzo di quelli "più freddi";
- minimizzare il numero di movimentazioni richieste per recuperare i colli dalla configurazione di stoccaggio;
- facilitare le operazioni di caricamento e svuotamento delle aree di deposito, minimizzando il numero di operatori richiesti per lo svolgimento delle operazioni;
- garantire l'ispezionabilità (diretta e/o indiretta) della minima superficie esterna dei colli statisticamente rappresentativa per valutare lo stato di conservazione degli stessi durante la fase di stoccaggio;
- garantire gli spazi necessari agli operatori addetti alle operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria sui sistemi presenti all'interno dell'area di stoccaggio.
- garantire la presenza di corridoi e vie di transito normalmente liberi nel deposito, che consentano di accedere a ciascun locale di stoccaggio senza dover transitare per un altro locale di stoccaggio;
- garantire la presenza di vie di fuga e uscite di emergenza dai locali ai corridoi del deposito e da questi all'esterno;
- garantire, ove possibile, la presenza di spazi liberi a disposizione per operazioni di stoccaggio temporaneo, movimentazione o manutenzione dei colli;
- consentire l'installazione, la funzionalità e la manutenzione di tutti gli altri sistemi e impianti previsti nel deposito;
- stoccare i rifiuti, per quanto possibile, per lotti omogenei.

### **A1-7.2 Modalità di stoccaggio**

L'area di stoccaggio è ricavata esclusivamente al piano terra dell'edificio, dove sono stati ricavati i seguenti locali di stoccaggio:

- da Pu1 a Pu7, per lo stoccaggio dei fusti;
- CM1 e CM2 per lo stoccaggio dei rifiuti cementati.

I rifiuti sono stati quindi disposti per lotti omogenei.

L'accesso a ciascun locale di stoccaggio non comporta il transito attraverso altri locali di stoccaggio.

I fusti dovranno essere stoccati all'interno delle gabbie in gruppi da 4 unità ciascuno.

Le gabbie sono impilate l'una sull'altra da un minimo di 2 livelli ad un massimo di 3, in funzione:

- dell'altezza dei solai;
- degli spazi richiesti dalle operazioni di installazione e di periodica manutenzione sugli impianti;
- della portanza dei pavimenti;
- della stabilità a scorrimento e ribaltamento in caso di sisma.

A tal proposito va considerato che le gabbie occorre che siano munite di dispositivi di aggancio, non solo con le gabbie superiori ed inferiori, ma anche con le gabbie adiacenti. L'aggancio reciproco delle gabbie aumenta ovviamente la stabilità delle medesime in caso di sisma, consentendo di raggiungere livelli di impilaggio maggiori.

Sarà garantita la verticalità dei colli impilati.

Compatibilmente con le esigenze di altezza dei solai, di installazione e manutenzione sugli impianti e di portanza dei pavimenti, le gabbie dovranno essere disposte:

- su tre livelli, laddove è possibile agganciare reciprocamente file di gabbie adiacenti;
- su due livelli, laddove le gabbie appartengono a file isolate.

Per sfruttare al massimo le altezze dei locali, è stata esclusa la possibilità di movimentare le gabbie contenenti i fusti da 220 litri mediante carroponete nei locali PU1/PU7. Tali gabbie saranno quindi movimentate mediante carrello elevatore.

I locali adibiti allo stoccaggio dei rifiuti cementati (CM1, CM2) saranno invece serviti da carroponete.

Tali rifiuti condizionati saranno disposti su tre livelli di impilaggio.

Tutti i locali di stoccaggio e i corridoi sono muniti di vie di fuga e uscite di emergenza.

Il deposito è munito di spazi aggiuntivi per:

- operazioni di stoccaggio temporaneo dei colli (ad es. dovute al recupero di colli);
- operazioni di manutenzione o decontaminazione sui colli;
- lo stoccaggio di contenitori da utilizzare per il reinfustaggio di fusti eventualmente danneggiati.

### **A1-7.2.1. Ispezionabilità**

L'ispezionabilità dei colli occorre che sia garantita attraverso l'ispezione visiva diretta dall'operatore, dal momento che nei locali di stoccaggio non sussistono rischi di irraggiamento esterno che sconsiglino lo svolgimento di tale operazione.

A tal fine, saranno utilizzati appositi dispositivi di movimentazione/sollevamento che saranno d'aiuto all'operatore per raggiungere i livelli di impilaggio più elevati. Oltre a scale e trabattelli, potranno essere utilizzate piattaforme semoventi elettriche.

Saranno previste all'interno dei locali, in opportuna posizione, più telecamere mobili (su monorotaia) a parete, collegate con la sala controllo, dove sarà possibile registrare e conservare le riprese effettuate.

Gli accostamenti dei colli rispetto alle pareti dei locali di stoccaggio o agli altri colli dovranno consentire l'ispezione diretta e/o indiretta degli stessi. Sarà garantito, ad esempio, un accostamento minimo alle pareti non inferiore a 1200 mm.

Oltre l'ispezione visiva (diretta ed indiretta) dei colli, lo stato di conservazione dei colli sarà monitorato attraverso:

- Una rete di misuratori continui  $\alpha$  sui canali di estrazione dell'aria dai locali di stoccaggio;
- una rete di campionatori locali di aria che, opportunamente posizionati nei locali, dovranno essere in grado di raccogliere sui filtri l'eventuale contaminazione dispersa a seguito della rottura del confinamento di uno o più fusti posizionati nell'intorno dell'apparecchiatura;
- survey di contaminazione condotti sui fusti e sulle strutture di stoccaggio.

### **A1-7.3. Movimentazione colli: descrizione generale**

La movimentazione dei colli nel deposito dovrà aver luogo attraverso carrelli elevatori a trazione elettrica a forche frontali e mediante carroponte nei locali di stoccaggio dei rifiuti condizionati.

#### **A1-7.3.1. Caricamento/svuotamento del deposito**

Tutti i rifiuti entreranno nel deposito già nello stato in cui dovranno essere stoccati e quindi senza richiedere ulteriori operazioni di preparazione.

I rifiuti dovranno entrare all'interno del deposito dal SAS ingresso/uscita materiali, previsto sul lato nord dell'edificio deposito.

La sequenza operativa per lo stoccaggio delle gabbie modulari contenenti i fusti da 220 litri all'interno del deposito dovrà essere la seguente:

- 1) apertura del portone esterno del SAS ingresso/uscita materiali;

- 2) trasferimento della gabbia modulare contenente i fusti all'interno del SAS per mezzo del sistema di movimentazione esterno;
- 3) chiusura del portone esterno del SAS ingresso/uscita materiali;
- 4) apertura del portone interno del SAS ingresso/uscita materiali;
- 5) prelievo della gabbia modulare mediante il carrello elevatore elettrico previsto per lo svolgimento delle operazioni all'interno del deposito ed estrazione della gabbia dal SAS ingresso/uscita materiali;
- 6) chiusura del portone interno del SAS ingresso/uscita materiali;
- 7) acquisizione da parte dell'operatore preposto dei dati identificativi della gabbia;
- 8) trasferimento della gabbia modulare al locale di stoccaggio, secondo il piano di caricamento prestabilito;
- 9) apertura del portone del locale di stoccaggio;
- 10) ingresso del carrello elevatore elettrico con la gabbia nel locale di stoccaggio;
- 11) chiusura del portone del locale di stoccaggio;
- 12) trasferimento della gabbia nella relativa posizione di stoccaggio, secondo il piano di caricamento prestabilito;
- 13) apertura del portone del locale di stoccaggio;
- 14) uscita del carrello elevatore elettrico e dell'operatore di ausilio alla manovra dal locale di stoccaggio.

A fine giornata, l'operatore preposto dovrà inserire i dati relativi al caricamento nel Sistema di Acquisizione Dati, associando ad ognuna delle gabbie la posizione di stoccaggio finale nel deposito. L'impiego di carro ponte è previsto per i locali ubicati nella zona centrale dell'edificio (CM-1 e CM-2). Tali locali si prevede che siano utilizzati per lo stoccaggio di rifiuti che potrebbero causare dosi al personale addetto superiori ai limiti previsti dalla normativa vigente, per cui si ritiene vantaggioso ricorrere ad una movimentazione dei fusti tramite carro ponte per far sì che tali operazioni vengano effettuate in maniera remotizzata senza che sia necessaria la presenza degli operatori nel locale in questione. Inoltre con l'utilizzo del carro ponte viene aumentata la capacità di stoccaggio del locale dato che è possibile disporre i contenitori a minor distanza l'uno dall'altro. Si prevede che siano utilizzati carrelli con due diverse capacità di carico:

- portata 40 q: per la movimentazione dei contenitori ;
- portata < 15 q: per la movimentazione delle gabbie metalliche.

I portoni e gli accessi del deposito è necessario che siano idonei a consentire la movimentazione dei colli mediante i carrelli elevatori suddetti.

Tali carrelli devono essere compatibili con gli ingombri in pianta e le altezze dei locali all'interno dei quali ne è previsto l'impiego.

### **A1-7.3.2. Modalità di recupero dei fusti danneggiati**

Non si prevede l'utilizzo di sistemi remotizzati di intervento per l'eventuale recupero dei fusti danneggiati, ossia dei fusti che abbiano perso, anche localmente, la capacità di confinare la contaminazione.

Il recupero di fusti che potrebbero danneggiarsi durante la fase di stoccaggio, a seguito di fenomeni corrosivi, sarà effettuato dall'operatore in modalità inversa rispetto alle operazioni di posizionamento dello stesso nell'area di stoccaggio. Il fusto danneggiato sarà confezionato all'interno di un contenitore di dimensioni maggiori. Ai fini della movimentazione, si considera che il fusto non abbia perso l'integrità strutturale complessiva.

Il piano di caricamento prevedrà apposite aree libere preposte ad ospitare le operazioni di riconfezionamento dei fusti danneggiati. Tali operazioni potranno essere effettuate nel locale Manutenzione "calda" (M1).

Non è prevista la necessità di particolari attrezzature richieste per tali operazioni. La movimentazione dei fusti danneggiati sarà effettuata con gli stessi carrelli elevatori e con le stesse apparecchiature impiegati per la movimentazione dei fusti integri.

Il piano di caricamento sarà tale da ridurre il rischio radiologico e da semplificare le operazioni di recupero dei colli e di manutenzione ordinaria e straordinaria di sistemi ed impianti.

Il recupero dei fusti danneggiati a seguito di eventi incidentali sarà sempre effettuato manualmente dall'operatore, dotato di appositi dispositivi di protezione individuale. Il confinamento dell'area di intervento sarà realizzato mediante sistemi provvisori come strutture montabili.

Il controllo dello stato di conservazione dei colli, durante la fase di stoccaggio, dovrà essere effettuato mediante ispezione visiva diretta o indiretta e mediante campionamento dell'aria estratta dai locali di stoccaggio.

## **A1-8. Protezione radiologica**

### **A1-8.1. Classificazione delle aree**

Il sistema di immagazzinamento è stato suddiviso, in conformità a quanto previsto dal D.L. 241/2000 (Rif. /1/), in zone a differente rischio di irraggiamento e contaminazione.

Sono state individuate due tipologie di zone:

- zona non classificata ;
- zona classificata controllata;

Appartengono alla prima zona tutte le aree in cui non è presente rischio di irraggiamento e/o contaminazione per il personale e per l'ambiente. In particolare, rientrano tra le zone non classificate:



- area esterna al corpo edificio;
- l'edificio sociale esclusa la zona oltre la barriera di fisica sanitaria.

Appartengono alla seconda zona tutte le aree con potenziale rischio di irraggiamento e/o contaminazione per il personale e per l'ambiente. L'accesso a tale zona del personale operativo è sorvegliato e regolamentato. In particolare, rientrano tra le zone classificate controllate:

- locali di stoccaggio;
- locale di manutenzione calda.

Tutta l'area interessata dalle operazioni inerenti lo stoccaggio dei rifiuti è classificata come zona controllata. Per questo motivo l'ingresso e/o l'uscita del personale operativo (dei componenti e delle apparecchiature) è regolamentato attraverso apposite procedure.

Le varie aree del deposito saranno regolamentate come segue:

- Area stoccaggio: zona controllata;
- Corridoi deposito: zona controllata;
- Area controllo e RPO: zona controllata;
- Spogliatoi caldi: zona controllata;
- Spogliatoi freddi: zona libera;
- Sala controllo: zona libera;
- Sala quadri: zona libera;

L'accesso/uscita del personale al deposito dovrà essere possibile solo attraverso il presidio di fisica sanitaria.

L'accesso alla zona controllata è realizzato attraverso 2 spogliatoi, suddivisi in zona fredda e calda separate da una barriera di fisica sanitaria.

Il presidio di Radioprotezione Operativa (RPO) dovrà essere dotato di adeguata strumentazione per la misura della contaminazione del personale (compreso un monitore mani-piedi) e di un locale adibito all'intervento per la prima decontaminazione del personale eventualmente contaminato.

Il locale di decontaminazione comprenderà un lavabo ed una doccia caldi e gli scarichi liquidi (doccia, lavabo e piletta a pavimento) dovranno essere collegati al sistema di raccolta liquidi contaminati.

Nel punto di accesso gli addetti alla RPO dovranno provvedere a fornire i dispositivi di protezione individuale e la relativa strumentazione per il monitoraggio personale in relazione alle attività da condurre.

L'accessibilità sarà comunque consentita a personale opportunamente protetto e monitorato.

Per accedere, gli operatori debbono indossare tutti i dispositivi di protezione individuale (D.P.I.), stabiliti in base alla natura ed ai rischi associati all'intervento da effettuare all'interno della zona controllata. Ogni operatore è dotato di dosimetri personali per la determinazione della dose integrale assorbita.

Al termine delle operazioni, il personale operativo, per uscire dalla zona controllata, userà le procedure in senso inverso. Prima di oltrepassare la barriera, il personale dovrà gettare il materiale a perdere negli appositi contenitori e quindi verificare l'assenza di contaminazione trasferibile ai monitors previsti nel presidio di Fisica Sanitaria.

### **A1-8.1. Classificazione del personale**

La classificazione dei lavoratori, ai fini della radioprotezione, viene effettuata sulla base dei rischi associati alle rispettive mansioni e delle dosi pregresse. In particolare, in accordo a quanto previsto dal D.L. n. 230/95 (Rif. /1/), il personale è stato suddiviso in:

- personale non esposto, che non è sottoposto ad un'esposizione che può comportare dosi superiori ai pertinenti limiti fissati per il pubblico;
- personale classificato esposto, che è sottoposto ad un'esposizione che può comportare dosi superiori ai pertinenti limiti fissati per il pubblico.

Il personale classificato esposto è, ulteriormente, suddiviso in due categorie:

1. personale classificato esposto di categoria A, che è suscettibile di ricevere, in un anno solare, una dose superiore a 6 mSv per esposizione globale;
2. personale classificato esposto di categoria B, che non è suscettibile di ricevere, in un anno solare, una dose superiore a 6 mSv per esposizione globale.

In particolare, è classificato come personale non esposto tutto il personale addetto a mansioni amministrative e non deputato ad accedere alla zona controllata.

Risultano classificati come personale esposto di categoria A tutti i lavoratori deputati ad operare in zona controllata. Sono classificati come personale esposto di categoria B i lavoratori che, pur essendo deputati ad operare fuori dalla zona controllata, possono dover accedere per motivi collegati alle loro funzioni.

## **A1-9. analisi di sicurezza TRAMITE UTILIZZO DELLA FMEA**

### **A1-9.1 Generalità**

L'analisi di sicurezza ha lo scopo di accertare il rispetto dei requisiti di sicurezza e degli obiettivi di radioprotezione per gli operatori e la popolazione per tutti gli eventi ipotizzati (Eventi di Categoria I, II e III).

Essa si basa su un'analisi deterministica, con opportuni margini di conservativismo, del comportamento dell'impianto a fronte dei transitori postulati e dei possibili malfunzionamenti o rotture di sistemi o componenti.

L'approccio metodologico adottato per sviluppare l'Analisi di Sicurezza è quello della "FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA)" (vd. Capitolo 3. Tale metodologia consiste in un sistematico e strutturato esame delle informazioni tecniche e dei modi di guasto delle strutture, dei sistemi e dei componenti al fine di assicurare che tutti i maggiori "hazards" siano stati identificati ed adeguatamente tenuti in conto sia attraverso soluzioni ingegneristiche che attraverso l'implementazione di opportune procedure di controllo. La valutazione delle conseguenze degli eventi viene poi effettuata con un'analisi di tipo "conservativo", cioè basata su assunzioni e metodologie caratterizzate da elevati margini di sicurezza e che conducono a valutazioni pessimistiche dei rilasci all'ambiente e delle dosi.

### **A1-9.2 Individuazione delle fonti di rischio**

Le fonti di rischio associate alle attività di gestione del deposito sono correlate alla presenza di colli contenenti materiale radioattivo.

In particolare, nell'ambito di tutte le attività previste, le fasi operative cui può essere associato un effettivo rischio radiologico per gli operatori o per la popolazione sono le seguenti:

- Movimentazione colli – Caricamento e svuotamento del deposito;
- Stoccaggio colli – Gestione del deposito durante la fase di stoccaggio.

Nell'ambito dell'analisi di sicurezza, per ognuna delle fasi sopra riportate (di seguito indicate come Nodo I e Nodo II), sono stati definiti ed analizzati gli eventi che possono avere conseguenze radiologiche.

### **A1-9.3. Definizione degli eventi e dei processi iniziatori (EPs)**

Gli EPs, ai quali far riferimento per lo sviluppo della FMEA, sono stati raggruppati in 4 categorie:

- EVENTI ESTERNI di origine naturale e/o origine umana.
- EVENTI INTERNI DI AREA.
  
- EVENTI INTERNI FUNZIONALI E DI PROCESSO legati al processo/attività da realizzare.
  
- MALFUNZIONAMENTO/PERDITA TOTALE FUNZIONALITA'DEI SISTEMI DI IMPIANTO.

Più in dettaglio, gli EPs considerati per lo sviluppo della FMEA sono i seguenti:

➤ **EVENTI ESTERNI:**

- Condizioni meteorologiche estreme (Temperatura, precipitazioni, vento, fulmini, umidità, ecc.).
- Inondazioni.
- Incendio esterno.
- Sisma.
- Tornado e missili associati.
- Intrusione umani e/o animali.
- Hazard industriali.

➤ **EVENTI INTERNI DI AREA:**

- Incendio interno.
- Allagamento da cause interne.
- Esplosione interna.
- Impatti meccanici.
- Degradazione componenti e apparecchiature.

➤ **EVENTI INTERNI FUNZIONALI E DI PROCESSO:**

- Irraggiamento.
- Rilasci di radioattività.
- Caduta e/o urto dei colli.
- Domino.
- Malfunzionamento/perdita totale della funzionalità dei sistemi di impianto.

#### **A1-9.4. Sviluppo della FMEA**

Lo sviluppo della FMEA è stato effettuato, per ognuno dei nodi precedentemente individuati, procedendo come segue:

- 1) selezione dell'evento iniziatore di riferimento dalla lista degli eventi di riferimento per la FMEA;
- 2) definizione della causa iniziatrice;
- 3) analisi delle eventuali conseguenze dirette sulla popolazione associate all'evento considerato, senza affidare alle SSC dell'installazione alcuna funzione (né di resistenza né di mitigazione);
- 4) verifica dell'accettabilità dello scenario ipotizzato;

- 5) implementazione, in caso di non accettabilità dello scenario, delle caratteristiche delle SSC dell'installazione e/o di procedure operative (salvaguardie progettuali) per annullare la probabilità che l'evento occorra o per minimizzare le conseguenze ad esso associate;
- 6) nuova analisi delle conseguenze attese per l'evento in esame, in relazione alle caratteristiche delle SSC e/o delle procedure operative definite al punto precedente;
- 7) identificazione delle eventuali azioni correttive a valle dell'evento;
- 8) identificazione dei fattori mitigativi che consentono la riduzione dell'eventuale termine sorgente rilasciato;
- 9) classificazione dell'evento ed indicazione sul danno radiologico previsto.

L'impatto radiologico valutato è confrontato con gli obiettivi di radioprotezione. Se risulta inferiore agli obiettivi, i requisiti stabiliti per le SSC dell'installazione, unitamente alle procedure operative previste, si ritengono idonei a fronteggiare l'evento considerato, altrimenti si torna al punto 5 della procedura descritta implementando ulteriormente i requisiti delle SSC e/o le procedure operative.

La metodologia descritta consente, a fronte di una lista eventi di riferimento, di:

- individuare gli eventi anomali e/o incidentali a cui l'installazione potrebbe essere soggetta nel corso della sua vita operativa;
- definire in modo iterativo i requisiti delle SSC dell'installazione e le procedure operative da impiegare per l'esecuzione delle attività, in modo che l'impatto radiologico sulla popolazione e sugli operatori, conseguente a detti eventi, sia compatibile con gli obiettivi di radioprotezione.

La definizione dei requisiti specifici per le singole SSC consente, quindi, la loro classificazione ai fini della sicurezza in funzione della loro richiesta di disponibilità, necessaria per escludere un evento o per mitigarne i rilasci che altrimenti comporterebbero un impatto radiologico inaccettabile.

#### **A1-9.5. Classificazione degli eventi**

Gli eventi individuati attraverso la FMEA sono stati classificati come segue:

[OUT] – Eventi o azioni a seguito dei quali non si aspetta una dose addizionale ai lavoratori e/o alla popolazione.

[X I -Y] - Eventi di Categoria I. Rientrano in questa categoria le operazioni di normale svolgimento delle attività di bonifica (operazioni pianificate di smantellamento e trattamento materiali, di movimentazione etc.), incluse operazioni complementari quali ispezioni e interventi di manutenzione ordinaria a sistemi e a macchinari.

[X II -Y] - Eventi credibili di Categoria II. Rientrano in questa categoria gli eventi anomali ritenuti statisticamente possibili nell'arco di tempo delle attività di bonifica e dovuti ad esempio a guasti di singoli componenti, a errori umani, etc.

[X III -Y] - Eventi credibili di Categoria III. Rientrano in questa categoria gli eventi incidentali che, pur non essendo attesi durante il periodo considerato per le attività di bonifica, sono comunque contemplati ai fini dell'analisi incidentale.

#### **A1-9.6. Risultati dell'analisi FMEA**

I risultati dell'analisi FMEA sono riportati nelle Tabelle A2 (nodo 1 - movimentazione) e nella Tabelle A3 (nodo 2 - stoccaggio).

#### **A1-9.7. Conclusioni**

Attraverso l'analisi FMEA sono stati individuati gli eventi che hanno un impatto radiologico sugli operatori e/o sulla popolazione.

L'analisi di dettaglio, con l'individuazione di tutti gli scenari incidentali (Eventi di Categoria I, II e III) per il nodo *movimentazione* e per il nodo *stoccaggio* è riportata nella Tabella A2 e nella Tabella A3 rispettivamente.

Nelle Tabelle A4 sono riportati gli eventi di Categoria III per il nodo *movimentazione* e nelle Tabelle A5 sono riportati gli eventi di Categoria III per il nodo *stoccaggio*.

Tabella A 2 - Analisi FMEA per il nodo "Movimentazione Manufatti"

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
<b>1. Eventi Esterni</b>												
1.1	Sisma di progetto (OPCM n° 3274 del 29/03/2003) (0.1 g).	Evento naturale.	1	Collasso dell'edificio.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero o troppo onerose dal punto di vista radiolo- gico.	L'edificio è costruito per resistere al "Sisma di progetto" (0.1g).	Nessuna.				Nessuno.	OUT
			2	Caduta dei colli già impilati nella posizione di stoccaggio.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero o troppo onerose dal punto di vista radiolo- gico.	Il collo/modulo di stoccaggio (pallet) è verificato per resistere in campo elastico alle sollecitazioni indotte dal sisma di progetto nella configurazione di stoccaggio più severa (max livello di impilaggio). Le pile di colli/moduli di stoccaggio sono verificate al ribaltamento ed al martellamento.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
			3	Danneggia-mento grave del sistema di movimenta-zione.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Il carropon-te è progettato per resistere in campo elastico alle sollecitazioni indotte dal sisma di progetto.	Nessuna.			Si esclude il sisma durante l'esecuzione delle operazioni di movimentazione.	Nessuno.	OUT
			4	Indisponibilità del sistema antincendio.	Si.	Ubicazione dei componenti energizzati in aree a rischio radiologico nullo.	Nessuna.	Riparazione e/o sostituzione dei componenti energizzati danneggiati.		L'incendio non è considerato una conseguenza del sisma.	Nessuno.	OUT
			5	Indisponibilità del sistema di alimentazione elettrica.	Si. Non è richiesto l'interven-to di sistemi energizzati.	Ubicazione dei componenti del sistema elettrico in aree a rischio radiologico nullo.	Nessuna.	Riparazione e/o sostituzione dei componenti danneggiati.		Il sisma non induce rilasci di radioattività nel deposito.	Nessuno.	OUT



**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
			6	Indisponibilità del sistema di ventilazione.	Si. Non si hanno rilasci di radioattività nel deposito.	Ubicazione dei componenti energizzati in aree a rischio radiologico nullo. Ancoraggio del canister di contenimento dei filtri verificato sismicamente.	Nessuna.	Riparazione e/o sostituzione dei componenti energizzati danneggiati.			Nessuno.	OUT
			7	Caduta di missili secondari sui colli stoccati.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Gli ancoraggi/supporti dei componenti dei sistemi previsti nell'area di stoccaggio sono verificati al sisma di progetto.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
1.2	Allagamento deposito da cause esterne.	Straripamento o corsi d'acqua.	1	Danneggiamento della prima barriera di confinamento dei colli e rilascio di radioattività in forma liquida.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	L'opera di difesa idraulica esistente garantisce il deposito contro l'allagamento. Il piano di stoccaggio è elevato di 1 m rispetto al piano campagna esterno al deposito.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
1.3	Tornado e missili associati.	Condizioni atmosferiche eccezionali.	1	Collasso locale o generale dell'edificio.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	L'edificio è progettato per resistere a tornado e missili associati.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

## Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"

### Fase operativa: Esercizio

### Nodo EM: Movimentazione manufatti

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
1.4	Incendio esterno.	Incendio generato dall'esecuzione di processi non connessi a quelli inerenti il deposito.	1	Coinvolgimento nell'incendio del materiale presente nel deposito (soprattutto combustibile)	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Adozione di griglie sulla presa di immissione aria che non permettono l'entrata di materiale incandescente o infiammato. Griglie di presa aria esterna non previste nell'area di stoccaggio. Sulle condotte di immissione aria dall'esterno sono disposti dei rilevatori di fumo per permettere agli operatori in sala controllo di discriminare tra incendio esterno ed interno.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
1.5	Condizioni atmosferiche estreme (oltre le condizioni di progetto).	Nubifragio o pioggia eccessiva.	1	Allagamento deposito con danneggiamento della prima barriera di confinamento dei colli e rilascio di radioattività in forma liquida.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Il piano di stoccaggio è elevato di 1 m rispetto al piano campagna esterno al deposito.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Accumulo di neve.	2	Crollo della copertura per un valore eccessivo del carico accidentale.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Nessuna.	Nessuna.			La struttura civile, i cui carichi dimensionanti sono costituiti dal sisma di progetto e dai missili associati al tornado, presenta ampi margini di sicurezza rispetto ai carichi da neve previsti dalla normativa italiana vigente.	Nessuno.	OUT
		Fulminazione.	3	Collasso locale della struttura. Perdita dell'alimentazione elettrica.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	L'edificio ha una protezione ceramica che esclude conseguenze alla struttura e/o ai sistemi del processo.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Risalita della falda.	4	Acqua o umidità all'interno del deposito e conseguente possibile innesco di corrosione dei contenitori.	No.	Adozione doppio manto di impermeabilizzazione delle fondazioni. Realizzazione di fondazioni "galleggianti" ispezionabili dotate di sistema di raccolta di eventuale acqua di risalita. Il piano di stoccaggio è elevato di 1 m rispetto al piano campagna esterno al deposito.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
		Vento.	5	Danneggiamento grave della struttura civile.	No.	Nessuna.	Nessuna.			La struttura civile, i cui carichi dimensionanti sono costituiti dal sisma di progetto e dai missili associati al tornado, presenta ampi margini di sicurezza rispetto ai carichi da vento previsti dalla normativa italiana vigente.	Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
1.6	EMI	Campi elettromagnetici.	1	Movimenti spuri dei componenti.	No.	Sistemi e componenti progettati per essere insensibili alle interferenze elettromagnetiche.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
1.7	Intrusione da umani (escluso l'intrusione per sabotaggio) e/o animali.	Violazione di procedure.	1	Dose alla persona entrata.	No.	La recinzione e la guardiania del sito escludono l'ingresso a persone del pubblico non autorizzate. Inoltre gli edifici sono all'interno della zona sorvegliata del sito delimitata da una recinzione di sicurezza.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
			2	Danneggiamento componenti.	No.	Barriere fisiche (es. reti all'aspirazione della ventilazioni) permettono di escludere l'entrata di animali.	Nessuna.			Assenza di contaminazione in aria o sulle pareti o sui fusti nell'area di stoccaggio che possa essere trasportata all'esterno dell'edificio.	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
1.8	Hazard industriali.	Urto di un veicolo contro la parete esterna del deposito.	1	Danneggia- mento della struttura esterna dell'edificio.	No.	Adozione di adeguate procedure di accesso/gestione nell'area del deposito per i mezzi (movimentazione materiali, mezzi per la manutenzione, ecc.). Limiti di velocità all'interno dell'area del deposito.	Nessuna.			Le strutture dell'edificio sono progettate per resistere ad impatti maggiori di quelli derivanti dall'urto di un veicolo.	Nessuno.	OUT

**2. Eventi Interni d'Area**

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
2.1	Incendio interno.	<u>Area di Stoccaggio:</u> caduta collo durante le operazioni di movimentazione	1	Incendio del materiale combustibile già stoccato nel deposito.	No.	Definizione del piano di caricamento in modo da minimizzare il materiale combustibile che può tecnicamente partecipare all'incendio (utilizzando i colli incombustibili come barriere alla trasmissione del calore). Adozione di prescrizioni che vietano l'introduzione di materiale infiammabile all'interno del deposito. Impiego di mezzi ad azionamento elettrico. Impiego di carrelli elevatori ampiamente sovradimensionati rispetto al carico da movimentare. Interventi programmati di manutenzione sui carrelli. Limitazione dell'altezza di sollevamento del collo durante la movimentazione (30 cm). Limitazione della velocità di	Incendio di una frazione attesa del materiale combustibile già stoccato nel deposito con rilascio di radioattività nell'ambiente.	Recupero del materiale coinvolto nell'incendio.	Intervento del sistema di estinzione incendio a gas (dotato di Back up) per ridurre ulteriormente il materiale partecipante all'incendio.	Le salvaguardie previste possono ridurre la possibilità di accadimento dell'evento considerato ma non possono escluderlo (il mezzo non garantisce la resistenza al guasto singolo).	Da valutare	M III -1



**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		<p><u>Area Operativa:</u>                      innesco prodotto dall'urto di un mezzo di trasporto contro un pallet contenente fusti con materiale combustibile lasciato nell'area in esame in violazione alle prescrizioni di esercizio.</p>	2	<p>Rottura dei fusti ed incendio di tutto il materiale combustibile in essi confezionato.</p>	No.	<p>Adozione di prescrizioni che vietano l'ingresso nel deposito di mezzi di trasporto a benzina. Adozione di prescrizioni che prevedono l'immediato trasferimento del pallet nell'area di stoccaggio.</p>	<p>Incendio del materiale combustibile contenuto nei fusti.</p>	<p>Recupero del materiale coinvolto nell'incendio.</p>		<p>L'adozione di salvaguardie a livello procedurale non esclude, di per sè, l'evento considerato. L'incendio coinvolge materiale combustibile sfuso.</p>	Da valutare	M III -2

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		<p><u>Quadri Elettrici:</u> cortocircuito o sovraccarico</p>	3	<p>Perdita dei sistemi energizzati, incluso il sistema di supervisione e controllo. Arresto delle operazioni. Infortunio convenziona-le agli operatori.</p>	<p>Si, dal punto di vista radiologico. Ritenuta non accettabile, dal punto di vista gestionale, la perdita del sistema supervisione e controllo.</p>	<p>Duplicazione (ridondanza) dei quadri generali della sezione di emergenza e della sezione di ininterrompibilità ed ubicazione degli stessi in locali compartimentati al fuoco (separazione).</p>	<p>Perdita dell'alimentazione normale.</p>	<p>Esecuzione degli interventi di ripristino sui quadri danneggiati.</p>	<p>Impiego di materiali non propaganti la fiamma ed a basso sviluppo di gas tossici.</p>		<p>Nessuno.</p>	<p>OUT</p>

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		<u>Locale impianto di ventilazione e filtrazione:</u> innesco generato dall'impianto elettrico di alimentazione e dei motori o di altri carichi presenti nei locali.	4	Incendio dei filtri HEPA e perdita del sistema di ventilazione.	Si. L'eventuale perdita del sistema di confinamento dinamico non induce rischi aggiuntivi per la popolazione oltre a quelli associati all'evento considerato.	Il locale è compartimentato rispetto agli altri locali dell'edificio. I componenti elettrici hanno le opportune protezioni da sovraccarico. Adozione di prescrizioni che prevedono l'immediata sostituzione dei filtri una volta completate le operazioni di ripristino a seguito di eventi anomali o incidentali che abbiano prodotto rilascio di radioattività all'interno del deposito.	Incendio dei filtri HEPA e rilascio nella biosfera del materiale radioattivo in essi eventualmente accumulato.	Sostituzione dei gruppi filtranti e decontaminazione del locale.	Presenza di un sistema di rivelazione incendi che consente un rapido intervento nel locale.	L'incendio di filtri HEPA contaminati presuppone la seguente concatenazione di eventi non correlati tra loro: -anomalia/incidente con rilascio di radioattività; -violazione della procedura per la sostituzione del gruppo filtrante sporco; -innesco di incendio nel locale.	Da valutare	M III -3

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		<u>Altri locali dell'edificio:</u> innesco generato dall'impianto elettrico.	5	Perdita temporanea dei sistemi ubicati nei locali considerati.	Si.	Compartimentazione al fuoco dei locali.	Incendio di materiale combustibile non contaminato.	Sostituzione dei componenti danneggiati in locali a rischio radiologico nullo o bassissimo.	Presenza di un sistema di rivelazione incendio che consente un rapido intervento nel locale.		Nessuno.	OUT
2.2	Esplosione.	<u>Area di Stoccaggio:</u> accumulo, fino a concentrazioni esplosive, di H <sub>2</sub> generato da radiolisi dei rifiuti.	1	Danneggiamento localizzato dell'edificio.	No.	Ricambio dell'aria, garantito dal sistema di ventilazione (attivo durante le fasi di caricamento), che esclude possibili punti di accumulo di H <sub>2</sub> .	Nessuna.			La produzione di H <sub>2</sub> è talmente bassa da rendere trascurabile, di per sé, l'evento in esame.	Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
2.3	Allagamento da cause interne.	Rottura tubazioni e/o serbatoi.	1	Rilascio di radioattività in forma liquida.	No.	Non sono previste tubazioni in pressione e/o serbatoi di accumulo in aree classificate controllate.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
2.4	Missili generati internamente.	Rottura di un ventilatore	1	Danneggiamento dei filtri HEPA contaminati e perdita temporanea del sistema di ventilazione.	Si.	Le strutture civili del locale resistono alle sollecitazioni indotte dall'urto associato al missile generato dalla rottura del ventilatore.	Rottura meccanica dei filtri HEPA e rilascio nella biosfera del materiale radioattivo in essi eventualmente accumulato.	Sostituzione dei gruppi filtranti e decontaminazione del locale.		La rottura dei filtri HEPA contaminati presuppone la seguente concatenazione di eventi non correlati tra loro: -anomalia/incidente con rilascio di radioattività; -violazione della procedura per la sostituzione del gruppo filtrante sporco; -rottura del ventilatore con generazione di missili.	Da valutare	M III- 4

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Rottura fusti per pressurizzazione interna.	2	Danneggiamento dei fusti adiacenti con fuoriuscita di materiale contaminato.	No.	Impiego di contenitori dotati di filtro a tenuta di particolato per tutti i colli condizionati idonei al trasferimento al deposito nazionale.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
		Rottura di tubazioni o serbatoi.	3	Danneggiamento dei colli e rilascio di radioattività in forma liquida.	No.	Non sono previste tubazioni in pressione e/o serbatoi di accumulo in aree classificate controllate.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
2.5	Degradazione componenti e apparecchiature.	Radiazioni ionizzanti.	1	Danneggiamento di strutture e componenti.	No.	Strutture e componenti progettati per tener conto del campo di radiazioni indotto dai colli stoccati.	Nessuna.			Il campo di radiazioni associato ai colli stoccati non è in grado di produrre variazioni delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali utilizzati per le strutture e per i componenti dei sistemi.	Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Usura di componenti ed apparecchiature di processo.	2	Rottura di componenti di processo con possibile danneggiamento dei colli e dispersione di materiale radioattivo.	No.	Dimensionamento dei componenti del sistema di movimentazione per cicli operativi più onerosi di quelle reali. Ridondanza delle funi e dei motori dei carriponte. Procedure di manutenzione programmata per valutare lo stato di conservazione dei componenti.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Corrosione dei fusti.	3	Perdita di integrità della prima barriera di confinamento	No.	Impiego di contenitori in acciaio inox per tutti i colli condizionati idonei al trasferimento al deposito nazionale. Controllo dell'umidità relativa nel deposito mediante riscaldamento (se necessario) della portata d'aria in ingresso al deposito. Overpacking dei colli danneggiati. Ispezioni periodiche programmate per verificare lo stato di conservazione dei colli.	Danneggiamento di una frazione modestissima di colli "tal quali".	Overpacking in contenitori di maggiori dimensioni dei colli danneggiati.	Presenza di un sistema di ventilazione e filtrazione che abbatte l'eventuale materiale rilasciato al camino.		Nessuno.	OUT

**3. Eventi Interni Funzionali e di Processo**



**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
3.1	Irraggiamento.	Presenza di materiale radioattivo (soprattutto gamma emettitore)	1	Dose agli operatori.	No.	Schermi in c.a. per ridurre il campo di irraggiamento nelle aree con presenza di personale. Remotizzazione delle operazioni. Impiego di schermi temporanei per i colli più caldi durante le movimentazioni. Adozione di procedure per regolamentare la presenza degli operatori nel deposito classificato in relazione al rischio di esposizione esterna.	Dose assorbita per esposizione esterna ampiamente al di sotto dei limiti di legge.	Turnazione del personale. Impiego di schermi aggiuntivi nel caso in cui la dose a consuntivo assorbita dagli operatori risultasse superiore alla stima effettuata.	Impiego di personale classificato ai sensi del D.Lgs. 230/00 e s.m.i.		Da valutare	M I -1
			2	Dose alla popolazione.	No.	Spessori delle pareti esterne e della copertura del deposito tali da annullare il rischio di esposizione esterna lungo la linea di recinzione dell'impianto. Impiego di schermi temporanei per i colli più caldi durante le operazioni di movimentazione all'esterno del deposito.	Nessuna.					Nessuno.

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
3.2	Rilascio di radioattività (in forma aeriforme e/o liquida).	Processi chimico fisici.	1	Dose agli operatori.	No.	Impiego di contenitori dotati di filtro a tenuta di particolato per tutti i colli condizionati idonei al trasferimento al deposito.  Sistema di ventilazione per garantire opportuni ricambi aria sempre acceso quando è presente personale nel deposito.	Nessuna.		Sistema di monitoraggio per il controllo della contaminazione in aria all'interno del deposito.	In condizioni di normale esercizio non si instaurano nei fusti processi che portano alla produzione ed al rilascio di radioattività	Nessuno.	OUT
			2	Dose alla popolazione.	No.	Sistema di filtrazione assoluta per il trattamento dell'aria espulsa al camino.	Nessuna.		Sistema di monitoraggio in continuo per il controllo della contaminazione nell'aria espulsa al camino.		Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
3.3	Caduta e/o urto dei colli.	Sisma.	1	Danneggia-mento e/o rottura dei colli con rilascio di radioattività.	No.	Il collo/modulo di stoccaggio (pallet) è verificato per resistere in campo elastico alle sollecitazioni indotte dal sisma di progetto nella configurazione di stoccaggio più severa (max livello di impilaggio). Le pile di colli/moduli di stoccaggio sono verificate al ribaltamento ed al martellamento. Le strutture del carroponte sono dimensionate per resistere in campo elastico alle sollecitazioni indotte dal sisma.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Danni o malfunzionamenti del sistema di movimentazione principale (carroponte).	2	Danneggiamento e/o rottura dei colli con rilascio di radioattività.	No.	<p>Carroponte costruito secondo le norme dettate dal NUREG 0612 e 0554.</p> <p>Pertanto il sistema, incluso il mezzo di presa, è progettato per garantire/consentire, <u>in caso di guasto singolo</u>, quanto di seguito indicato:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-mantenimento del carico;</li> <li>-planarità del carico;</li> <li>-completamento delle operazioni e/o recupero della macchina (con il carico) nell'area operativa.</li> </ul> <p>Gestione automatizzata e relativi interblocchi duplicati impediscono malfunzionamenti che possono generare urti.</p> <p>Presenza di un sistema di antipendolamento del carico che previene pericolose oscillazioni dello stesso durante la fase di movimentazione.</p>	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Danni o malfunzionamenti al carrello elevatore elettrico o al vettore di trasporto colli al deposito.	3	Danneggiamento e/o rottura dei colli con conseguente possibile sviluppo di incendio e rilascio di radioattività.	No.	<p>Impiego di mezzi ad azionamento elettrico ampiamente sovradimensionati rispetto al carico da movimentare. Interventi programmati di manutenzione.</p> <p>Limitazione dell'altezza massima di sollevamento durante la movimentazione.</p> <p>Limitazione della velocità di movimentazione (non regolabile dall'operatore).</p> <p>Adozione di prescrizioni che vietano l'introduzione di materiale infiammabile all'interno del deposito.</p>	<p>Caduta del collo nell'area di stoccaggio durante le operazioni di movimentazione con carrello elevatore elettrico con conseguente sviluppo di incendio</p>	<p>Recupero dei colli coinvolti nell'evento, eventuale overpacking dei colli danneggiati e decontaminazione dell'area.</p>	<p>Intervento del sistema di estinzione incendio (dotato di Back up) per ridurre ulteriormente il materiale partecipante all'incendio.</p>	<p>Le salvaguardie previste possono ridurre la possibilità di accadimento dell'evento considerato ma non possono escluderlo (il mezzo non garantisce la resistenza al guasto singolo).</p>	Da valutare.	M III -5

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Cedimen-to strutturale pallet di stoccaggio	4	Danneggia-mento e/o rottura dei colli con rilascio di radioattività.	No.	Il pallet è progettato per garantire ampi margini di sicurezza in relazione ai carichi che lo stesso deve sopportare durante le fasi di movimentazione e stoccaggio.  La capacità di resistenza strutturale del pallet è verificata "by analysis" mediante analisi numeriche condotte con codici espliciti validati a livello internazionale.  Il pallet è realizzato secondo elevati standard di qualità che prevedono controlli sui materiali, sui procedimenti costruttivi e sul prodotto finale.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Errore umano.	5	Danneggia-mento e/o rottura dei colli con conseguente possibile sviluppo di incendio e rilascio di radioattività.	No.	Esecuzione in automatico delle operazioni di movimentazione mediante il carroponte. Interblocchi elettrici che disabilitano il comando "sgancio" del carico fino a quando i sensori preposti al controllo dello stato del carico non danno il consenso all'esecuzione delle operazioni. Sensori ridondati e basati su principi di funzionamento differenti. Impiego di personale esperto nella movimentazione con carrelli elevatori. Definizione per i carrelli di percorsi di manovra lineari e privi di ostacoli da superare. Presenza di n° 2 operatori (oltre quello addetto alla guida del carrello) durante la fase di movimentazione che risulteranno di ausilio durante l'effettuazione delle manovre.	Caduta del collo nell'area di stoccaggio durante le operazioni di movimentazione con il carrello elevatore con conseguente sviluppo di incendio	Recupero dei colli coinvolti nell'evento, eventuale overpacking dei colli danneggianti e decontaminazione dell'area.	Intervento del sistema di estinzione incendio (dotato di Back up) per ridurre ulteriormente il materiale partecipante all'incendio.	Le salvaguardie previste nel caso della movimentazione mediante carrello elevatore elettrico sono tali da non consentire l'esclusione dell'evento considerato.	Da valutare.	M III -6

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
3.4	Domino.	Sisma.	1	Danneggiamento dei colli stoccati con rilascio di radioattività.	No.	Il collo/modulo di stoccaggio (pallet) è verificato per resistere in campo elastico alle sollecitazioni indotte dal sisma di progetto nella configurazione di stoccaggio più severa (max livello di impilaggio). Le pile di colli/moduli di stoccaggio sono verificate al ribaltamento ed al martellamento.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
		Caduta di un pallet nella movimentazione con carroponete	2	Danneggiamento dei colli stoccati con rilascio di radioattività.	No.	Movimentazione dei colli mediante carroponete in grado di resistere al guasto singolo.	Nessuna.				Nessuno.	OUT



**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"****Fase operativa: Esercizio****Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Caduta di un pallet nella movimentazione con carrello elevatore.	3	Danneggiamento dei colli stoccati con rilascio di radioattività.	No.	Piano di caricamento definito in modo da prevedere max 2 livelli di impilaggio per i colli movimentati mediante il carrello elevatore (impilaggio dei colli per livelli superiori solo mediante carroponte). Stoccaggio dei colli in lotti distanti tra loro.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**4. Perdita Totale/Malfunzionamento dei Sistemi d'Impianto**

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
4.1	Perdita o malfunzionamento del sistema di ventilazione.	Perdita sistema di alimentazione e elettrica.	1	Perdita del confinamento dinamico dei locali.  Rilascio non controllato a quota zero di radioattività eventualmen-te dispersa nell'edificio.	Si.	Interruzione delle operazioni di caricamento del deposito che potrebbero essere la causa di eventuali rilasci di radioattività.	Nessuna.	.		Durante il normale esercizio non è presente contaminazione in aria, pertanto la perdita del sistema non induce rilasci nella biosfera.  L'interruzione di alim. el. non induce eventi che portano a rilasci nel deposito; si esclude che l'evento avvenga in concomitanza con presenza di contamin. in aria nel deposito (Double failure).	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Guasto/rottura ventilatore estraente.	2	Perdita del confinamento dinamico dei locali.	Si.	Ridondanza del ventilatore di estrazione. Componenti del sistema ubicati in aree a basso rischio radiologico.	Nessuna.	Fermata delle operazioni se ritenuto necessario.		La ridondanza del ventilatore consente di aumentare la disponibilità del sistema. Essa non è dettata dalla necessità di rispettare gli obiettivi di radioprotezione.	Nessuno.	OUT
		Rottura filtro HEPA.	3	Rilascio della eventuale radioattività accumulata sui filtri.	Si.	Ridondanza del sistema di filtrazione. Ridondanza dei sistemi di controllo della pressione differenziale a monte e a valle dei filtri.	Rilascio nella biosfera di parte del materiale accumulato sui filtri. Dose addizionale per gli operatori addetti alla riparazione.	Arresto delle operazioni. Arresto della ventilazione. Sostituzione filtro in condizioni di sicurezza.	Gli operatori addetti alla riparazione sono dotati di adeguati DPI.	Perché ci sia presenza di contaminazione è necessario che si sia verificato un evento incidentale che abbia comportato l'accumulo di radioattività sui filtri, oltre alla violazione di una procedura (sostituzione filtri "sporchi").	Da valutare.	M III -7

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
4.2	Perdita / malfunzionamento del sistema rilevazione ed estinzione incendi.	Perdita totale per guasti meccanici, PLC o perdita di alimentazione elettrica.	1	Combustione completa del massimo incendio plausibile nel deposito in assenza di operatori.	No.	Alimentazione del sistema di rivelazione incendi dalla sezione ininterrompibile del sistema elettrico.	Vedi caso "incendio interno" (2.1.1- Area di stoccaggio).			Le scelte progettuali sono mirate ad elevare il grado di disponibilità del sistema. In ogni caso, la valutazione delle conseguenze sulla popolazione è stata effettuata ipotizzando la perdita totale dei sistemi antincendio.	Vedi caso "incendio interno" (2.1.1- Area di stoccaggio).	M III -8
4.3	Perdita / malfunzionamento dell'alimentazione elettrica di potenza.	Perdita della rete elettrica esterna.	1	Perdita completa di tutti i sistemi energizzati dell'installazione.	No.	Sistema elettrico suddiviso in sezioni alimentate da sorgenti elettriche ridondate, separate ed indipendenti: sezione normale, sezione di emergenza e sezione ininterrompibile.	Nessuna.	Arresto delle operazioni nel deposito.		Autonomia degli UPS ≥ 20 min. (tempo ampiamente sufficiente per garantire la presa del carico dei diesel che alimentano la sezione di emergenza).	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Movimentazione manufatti**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
4.4	Perdita / malfunzionamento sistema di illuminazione.	Guasto rete elettrica.	1	Impossibilità di completare in sicurezza la movimentazione in corso. Possibile infortunio agli operatori.	No.	Presenza di tre diversi sistemi di illuminazione, alimentati da sorgenti elettriche ridondate, separate ed indipendenti. Illuminazione di emergenza alimentata dalla sezione di emergenza del sistema elettrico. Illuminazione di emergenza in grado di fornire i lux necessari per arrestare in sicurezza le operazioni. Illuminazione di sicurezza alimentata direttamente dalla sezione in interrompibile del sistema elettrico.	Nessuna.	Fermata delle operazioni.		La sezione normale del sistema di illuminazione fornisce i lux necessari per l'esecuzione delle attività in condizioni di normale esercizio. La sezione di emergenza fornisce i lux necessari per l'arresto in sicurezza delle operazioni in condizioni anomale. La sezione di sicurezza fornisce i lux necessari per l'evacuazione dei locali dell'edificio.	Nessuno.	OUT

## Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"

### Fase operativa: Esercizio

### Nodo EM: Movimentazione manufatti

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
4.5	Perdita / malfunzionamento del sistema di movimentazione manufatti (carroponte).	Cedimento delle strutture del ponte.	1	Rilascio del carico in movimento con generazione di missili secondari sui colli già stoccati.	No.	Elevati fattori di sicurezza nella progettazione dei carriponte e delle componenti meccanici. Strutture sovradimensionate per resistere in campo elastico alle peggiori condizioni carico (Sisma di progetto).	Nessuna.				Nessuno.	OUT
		Rottura di componenti del sistema di sollevamento ed apprensione (funi, pinza, argani, ecc.).	2	Rilascio del carico in movimento con generazione di missili secondari sui colli già stoccati.	No.	Due unità di sollevamento collegate in cinematica chiusa. Sul tamburo di ognuna delle unità agiranno 2 coppie di funi (8 funi). L'eventuale rottura di una fune eviterà sia la caduta, che i movimenti accidentali del carico. Dimensionamento dei componenti per cicli operativi più onerosi di quelle reali.	Nessuna.	Completamento delle operazioni, trasferimento della macchina nell'area operativa ed esecuzione degli interventi di manutenzione.	Gli eventuali interventi saranno condotti nell'area operativa, dove è minimo il rischio per gli operatori.	Il sistema è progettato per garantire, <u>in caso di guasto singolo</u> : -mantenimento del carico; -planarità del carico; -completamento delle operazioni e/o recupero della macchina (con il carico) nell'area operativa.	Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Guasto al sistema di gestione automatica del carroponete.	3	Arresto delle operazioni.	Si.	Quadri di automazione ubicati in locali a rischio radiologico nullo o molto basso. Duplicazione degli elementi in campo. Gestione delle operazioni di recupero in modalità manuale mediante sistema TVCC, interblocchi, sensori di contatto ed ausili visivi sulle strutture del deposito.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
		Perdita alimentazione e elettrica.	4	Arresto delle operazioni.	Si.	Quadri elettrici previsti a terra in locali a rischio radiologico basso ovvero nullo.	Nessuna.			Il carico resta sospeso in sicurezza fino al ripristino dell'alimentazione.	Nessuno.	OUT
4.6	Perdita / malfunzionamento del sistema di monitoraggio radiologico.	Perdita alimentazione e elettrica.	1	Perdita monitoraggio radiologico dell'aria estratta dal sistema di ventilazione.	No.	Alimentazione del sistema di monitoraggio dalla sezione ininterrompibile del sistema elettrico.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Movimentazione manufatti"												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Movimentazione manufatti												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
4.7	Perdita / malfunzionamento del sistema drenaggi potenzialmente contaminati.	Guasti meccanici o perdita dell'alimenta zione elettrica.	1	Rilascio di radioattività in forma liquida nella biosfera.		Sistema completamente passivo costituito da canalette di raccolta a pavimento nell'area di stoccaggio e nell'area operativa che colluttano i liquidi sversati in una vasca di accumulo rivestita internamente con liner in acciaio inox.  Vasca di raccolta verificata sismicamente.  Trasferimento dei liquidi dalla vasca effettuato mediante skid carrellato.	Nessuna.				Nessuno.	OUT



Tabella A3 - Analisi FMEA per il nodo "Stoccaggio"

Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Stoccaggio												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
<b>1. Eventi Esterni</b>												
1.1	Sisma di progetto (OPCM n° 3274 del 29/03/2003) (0.1 g)	Evento naturale.	1	Collasso dell'edificio.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	L'edificio è costruito per resistere al "Sisma di progetto" (0.1g).	Nessuna.				Nessuno.	OUT
			2	Caduta dei colli già impilati nella posizione di stoccaggio.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Il collo/modulo di stoccaggio è verificato per resistere in campo elastico alle sollecitazioni indotte dal sisma nella configurazione di stoccaggio più severa (max livello di impilaggio). Le pile di colli/moduli di stoccaggio sono verificate al ribaltamento e martellamento.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
			3	Danneggia-mento grave del sistema di movimenta-zione.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Il carro ponte è progettato per resistere in campo elastico alle sollecitazioni indotte dal sisma di progetto.	Nessuna.			Si esclude il sisma durante l'esecuzione delle operazioni di ispezione remota.	Nessuno.	OUT
			4	Indisponibili-tà del sistema antincendio.	Si.	Ubicazione dei componenti energizzati in aree a rischio radiologico nullo.	Nessuna.	Riparazione e/o sostituzione dei componenti energizzati danneggiati.		L'incendio non è considerato una conseguenza del sisma.	Nessuno.	OUT
			5	Indisponibili-tà del sistema di alimenta-zione elettrica.	Si. Non è richiesto l'intervento di sistemi energizzati.	Ubicazione dei componenti del sistema elettrico in aree a rischio radiologico nullo.	Nessuna.	Riparazione e/o sostituzione dei componenti danneggiati.		Il sisma non induce rilasci di radioattività nel deposito.	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
			6	Indisponibilità del sistema di ventilazione.	Si. Non si hanno rilasci di radioattività nel deposito.	Ubicazione dei componenti energizzati in aree a rischio radiologico nullo. Ancoraggio del canister di contenimento dei filtri verificato sismicamente.	Nessuna.	Riparazione e/o sostituzione dei componenti energizzati danneggiati.			Nessuno.	OUT
			7	Caduta di missili secondari sui colli stoccati.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Gli ancoraggi/supporti dei componenti dei sistemi previsti nell'area di stoccaggio sono verificati al sisma di progetto.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Stoccaggio												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
1.2	Allagamento deposito da cause esterne.	Straripamento corsi d'acqua.	1	Danneggia-mento della prima barriera di confinamento dei colli e rilascio di radioattività in forma liquida.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	L'opera di difesa idraulica esistente garantisce il deposito contro l'allagamento. Il piano di stoccaggio è elevato di 1 m rispetto al piano campagna esterno al deposito.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
1.3	Tornado e missili associati.	Condizioni atmosferiche eccezionali.	1	Collasso locale o generale dell'edificio.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	L'edificio è progettato per resistere a tornado e missili associati.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Stoccaggio												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
1.4	Incendio esterno.	Incendio generato dall'esecuzione di processi non connessi a quelli inerenti il deposito.	1	Coinvolgimento nell'incendio del materiale presente nel deposito (soprattutto combustib.)	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Adozione di griglie sulla presa di immissione aria che non permettono l'entrata di materiale incandescente o infiammato. Griglie di presa aria esterna non previste nell'area di stoccaggio.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
1.5	Condizioni atmosferiche estreme (oltre le condizioni di progetto).	Nubifragio o pioggia eccessiva.	1	Allagamento deposito con danneggiamento della prima barriera di confinamento dei colli e rilascio di radioattività in forma liquida.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Il piano di stoccaggio è elevato di 1 m rispetto al piano campagna esterno al deposito.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Accumulo di neve.	2	Crollo della copertura per un valore eccessivo del carico accidentale.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	Nessuna.	Nessuna.			La struttura civile, i cui carichi dimensionanti sono costituiti dal sisma di progetto e dai missili associati al tornado, presenta ampi margini di sicurezza rispetto ai carichi da neve previsti dalla normativa italiana vigente.	Nessuno.	OUT
		Fulminazione.	3	Collasso locale della struttura. Perdita dell'alimentazione elettrica.	No. Le azioni di ripristino risulterebbero troppo onerose dal punto di vista radiologico.	L'edificio ha una protezione ceramica che esclude conseguenze alla struttura e/o ai sistemi del processo.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Stoccaggio												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Risalita della falda.	4	Acqua o umidità all'interno del deposito e conseguente possibile innesco di corrosione dei contenitori.	No.	Adozione doppio manto di impermeabilizzazione delle fondazioni. Realizzazione di fondazioni "galleggianti" ispezionabili dotate di sistema di raccolta di eventuale acqua di risalita. Il piano di stoccaggio è elevato di 1 m rispetto al piano campagna esterno al deposito.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
		Vento.	5	Danneggiamento grave della struttura civile.	No.	Nessuna.	Nessuna.			La struttura civile, i cui carichi dimensionanti sono costituiti dal sisma di progetto e dai missili associati al tornado, presenta ampi margini di sicurezza rispetto ai carichi da vento previsti dalla normativa italiana vigente.	Nessuno.	OUT

Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Stoccaggio												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
1.6	EMI	Campi elettromagnetici.	1	Movimenti spuri dei componenti.	No.	Sistemi e componenti progettati per essere insensibili alle interferenze elettromagnetiche.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
1.7	Intrusione da umani (escluso l'intrusione per sabotaggio) e/o animali.	Violazione di procedure.	1	Dose alla persona entrata.	No.	La recinzione e la guardiana del sito escludono l'ingresso a persone del pubblico non autorizzate. Inoltre gli edifici sono all'interno della zona sorvegliata del sito, delimitata da una recinzione di sicurezza.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
			2	Danneggiamento componenti.	No.	Barriere fisiche (es. reti all'aspirazione della ventilazioni) permettono di escludere l'entrata di animali.	Nessuna.			Assenza di contaminazione in aria o sulle pareti o sui fusti nell'area di stoccaggio che possa essere trasportata all'esterno dell'edificio.	Nessuno.	OUT



**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
1.8	Hazard industriali.	Urto di un veicolo contro la parete esterna del deposito.	1	Danneggia-mento della struttura esterna dell'edificio.	No.	Adozione di adeguate procedure di accesso/gestione nell'area del deposito per i mezzi (movimentazione materiali, mezzi per la manutenzione, ecc.).  Limiti di velocità all'interno dell'area del deposito.	Nessuna.	Ripristino locale della parete danneggiata.		Le strutture dell'edificio sono progettate per resistere ad impatti maggiori di quelli derivanti dall'urto di un veicolo.	Nessuno.	OUT

**2. Eventi Interni d'Area**

2.1	Incendio interno.	Area _____ di _____ <u>Stoccaggio:</u> innesco da fonti di calore e materiale combustibile introdotti nell'area di stoccaggio in violazione alle prescrizioni di esercizio.	1	Incendio del materiale combustibile stoccato nel deposito al termine della prima fase di caricamento.	No.	Definizione del piano di caricamento in modo da minimizzare il materiale combustibile che può tecnicamente partecipare all'incendio (utilizzando i colli incombustibili come barriere alla trasmissione del calore).  Adozione di prescrizioni che vietano l'introduzione di materiale infiammabile all'interno del deposito.	Incendio di una frazione attesa del materiale combustibile stoccato nel deposito con rilascio di radioattività nell'ambiente.	Recupero del materiale coinvolto nell'incendio.	Intervento del sistema di estinzione incendio (dotato di Back up) per ridurre ulteriormente il materiale partecipante all'incendio.	L'incendio coinvolge materiale combustibile confezionato all'interno del fusto metallico.	Da valutare	S III -1
-----	-------------------	---	---	---	-----	---	---	---	---	---	-------------	----------

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Quadri Elettrici: cortocircuito o sovraccarico.	2	Perdita dei sistemi energizzati, incluso il sistema di supervisione e controllo. Arresto delle operazioni. Infortunio convenzionale agli operatori.	Si, dal punto di vista radiologico. Ritenuta non accettabile, dal punto di vista gestionale, la perdita del sistema di supervisione e controllo.	Duplicazione (ridondanza) dei quadri generali della sezione di emergenza e della sezione di ininterrompibilità ed ubicazione degli stessi in locali compartimentati al fuoco (separazione).	Perdita dell'alimentazione normale.	Esecuzione degli interventi di ripristino sui quadri danneggiati.	Impiego di materiali non propaganti la fiamma ed a basso sviluppo di gas tossici.		Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		<p><u>Locale impianto di ventilazione e filtrazione:</u>                      innesco generato dall'impianto elettrico di alimentazione dei motori o di altri carichi presenti nei locali.</p>	3	<p>Incendio dei filtri HEPA e perdita del sistema di ventilazione.</p>	<p>Si. L'eventuale perdita del sistema di confinamento dinamico non induce rischi aggiuntivi per la popolazione oltre a quelli associati all'evento considerato.</p>	<p>Il locale è compartimentato rispetto agli altri locali dell'edificio. I componenti elettrici hanno le opportune protezioni da sovraccarico. Adozione di prescrizioni che prevedono l'immediata sostituzione dei filtri una volta completate le operazioni di ripristino a seguito di eventi anomali o incidentali che abbiano prodotto rilascio di radioattività all'interno del deposito.</p>	<p>Incendio dei filtri HEPA e rilascio nella biosfera del materiale radioattivo in essi eventualmente accumulato.</p>	<p>Sostituzione dei gruppi filtranti e decontaminazione del locale.</p>	<p>Presenza di un sistema di rivelazione incendi che consente un rapido intervento nel locale.</p>	<p>L'incendio di filtri HEPA contaminati presuppone la seguente concatenazione di eventi non correlati tra loro:                      -anomalia/incidente con rilascio di radioattività;                      -violazione della procedura per la sostituzione del gruppo filtrante sporco;                      -innesco di incendio nel locale.</p>	<p>Da valutare.</p>	<p>S III -2</p>

Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Stoccaggio												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Altri locali dell'edificio: innesco generato dall'impianto elettrico.	5	Perdita temporanea dei sistemi ubicati nei locali considerati.	Si.	Compartimentazione al fuoco dei locali.	Incendio di materiale combustibile non contaminato.	Sostituzione dei componenti danneggiati in locali a rischio radiologico nullo o bassissimo.	Presenza di un sistema di rivelazione che consente un rapido intervento nel locale.		Nessuno.	OUT
2.2	Esplosione.	Area di Stoccaggio: accumulo, fino a concentrazioni esplosive, di H <sub>2</sub> generato da radiolisi dei rifiuti.	1	Danneggiamento localizzato dell'edificio.	No.	Ricambio dell'aria, garantito dal sistema di controllo dell'umidità, che esclude possibili punti di accumulo di H <sub>2</sub> .	Nessuna.			La produzione di H <sub>2</sub> è talmente bassa da rendere trascurabile, di per sé, l'evento in esame.	Nessuno.	OUT
2.3	Allagamento da cause interne.	Rottura tubazioni e/o serbatoi.	1	Rilascio di radioattività in forma liquida.	No.	Non sono previste tubazioni in pressione e/o serbatoi di accumulo in aree classificate controllate.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
2.4	Missili generati internamente.	Rottura di un ventilatore del sistema ventilazione.	1	Danneggiamento dei filtri HEPA contaminati e perdita temporanea del sistema di ventilazione.	Si.	Le strutture civili del locale resistono alle sollecitazioni indotte dall'urto associato al missile generato dalla rottura del ventilatore.	Rottura meccanica dei filtri HEPA e rilascio nella biosfera del materiale radioattivo in essi eventualmente accumulato.	Sostituzione dei gruppi filtranti e decontaminazione del locale.		La rottura dei filtri HEPA contaminati presuppone la seguente concatenazione di eventi non correlati tra loro: -anomalia/incidente con rilascio di radioattività; -violazione della procedura per la sostituzione del gruppo filtrante sporco; -rottura del ventilatore con generazione di missili.	Inviluppato da incendio filtro HEPA (Vedi 2.1.4).	S III-3
		Rottura fusti per pressurizzazione interna.	2	Danneggiamento dei fusti adiacenti con fuoriuscita di materiale contaminato.	No.	Impiego di contenitori dotati di filtro a tenuta di particolato per tutti i colli condizionati idonei al trasferimento al deposito nazionale.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Rottura di tubazioni o serbatoi.	3	Danneggiamento dei colli e rilascio di radioattività in forma liquida.	No.	Non sono previste tubazioni in pressione e/o serbatoi di accumulo in aree classificate controllate.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
2.5	Degradazione componenti e apparecchiature.	Radiazioni ionizzanti.	1	Danneggiamento di strutture e componenti.	No.	Strutture e componenti progettati per tener conto del campo di radiazioni indotto dai colli stoccati.	Nessuna.			Il campo di radiazioni associato ai colli stoccati non è in grado di produrre variazioni delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali utilizzati per le strutture e per i componenti dei sistemi.	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Usura di componenti ed apparecchiature di processo.	2	Rottura di componenti di processo con possibile danneggiamento dei colli e dispersione di materiale radioattivo.	No.	Dimensionamento del sistema di movimentazione per cicli operativi più onerosi di quelle reali. Ridondanza delle funi e dei motori dei carriponte. Manutenzione programmata per valutare lo stato di conservazione dei componenti.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Corrosione dei fusti.	3	Perdita di integrità della prima barriera di confinamento	No.	<p>Contenitori in acciaio inox per tutti i colli condizionati idonei al trasferimento al deposito nazionale.</p> <p>Controllo dell'umidità relativa nel deposito mediante riscaldamento dell'aria in ingresso, al deposito.</p> <p>Overpacking dei colli danneggiati prima del trasferimento al deposito.</p> <p>Ispezioni periodiche per verificare lo stato di conservazione dei colli.</p>	<p>Danneggiamento di una frazione modestissima di colli "tal quali".</p>	<p>Overpacking in contenitori di dimensioni dei colli danneggiati.</p>	<p>Presenza di un sistema di ventilazione e filtrazione che abbatte l'eventuale materiale rilasciato al camino.</p>	<p>La corrosione del contenitore dall'interno è possibile solo nella prima fase di vita del deposito (fino al trattamento e condizionamento dei colli "tal quali" nella SGM).</p>	Nessuno.	OUT

**3. Eventi Interni Funzionali e di Processo**



**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
3.1	Irraggiamento.	Presenza di materiale radioattivo (soprattutto gamma emettitore).	1	Dose agli operatori.	No.	Schermi in c.a. per ridurre il campo di irraggiamento nelle aree classificate ad elevato fattore di occupazione. Remotizzazione delle operazioni (ispezionabilità). Procedure per regolamentare la presenza degli operatori nel deposito, classificato in relazione al rischio di esposizione esterna.	Dose assorbita per esposizione esterna ampiamente al di sotto dei limiti di legge.	Turnazione del personale operativo. Impiego di schermi aggiuntivi nel caso in cui la dose a consuntivo assorbita dagli operatori risultasse superiore alla stima effettuata.	Impiego di personale classificato ai sensi del D.Lgs. 230/00 e s.m.i.	Durante la fase di stoccaggio la presenza degli operatori nel deposito è prevista solo in caso di ispezione o manutenzione.	Da valutare.	S I-1
			2	Dose alla popolazione.	No.	Spessori delle pareti esterne e della copertura del deposito tali da annullare il rischio di esposizione esterna lungo la linea di recinzione dell'impianto.	Nessuna.			La distanza del deposito dalla recinzione del sito garantisce l'abbattimento del campo di esposizione generato dai colli stoccati nel deposito stesso.	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
3.2	Rilascio di radioattività (in forma aeriforme e/o liquida).	Processi chimico fisici.	1	Dose agli operatori.	No.	Contenitori dotati di filtro a tenuta di particolato per tutti i colli condizionati idonei al trasferimento al deposito nazionale. Sistema di ventilazione per garantire opportuni ricambi aria.	Nessuna.		Sistema di monitoraggio per il controllo della contaminazione in aria all'interno del deposito.	In condizioni di normale esercizio non si instaurano nei fusti processi che portano alla produzione ed al rilascio di radioattività (vedi punto 2.4.2 "rottura fusto per pressurizzazione interna").	Nessuno.	OUT
			2	Dose alla popolazione.	No.	Sistema di filtrazione assoluta per il trattamento dell'aria espulsa al camino.	Nessuna.		Sistema di monitoraggio per il controllo della contaminazione dell'aria espulsa al camino.		Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo	
3.3	Caduta e/o urto dei colli.	Sisma.	1	Danneggiamento e/o rottura dei colli con rilascio di radioattività.	No.	Collo/modulo di stoccaggio verificato per resistere in campo elastico alle sollecitazioni del sisma nella configurazione di stoccaggio più severa (max livello di impilaggio).  Pile di colli/moduli di stoccaggio verificate al ribaltamento ed al martellamento.  Strutture del carroponete dimensionate per resistere in campo elastico alle sollecitazioni del sisma.  Strutture civili ed impianti verificati al sisma di progetto (esclude l'impatto di missili secondari sui colli).	Nessuna.					Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Danni o malfunzionamenti del sistema di movimentazione principale (carroponte).	2	Danneggiamento e/o rottura dei colli con rilascio di radioattività.	No.	<p>Carroponte costruito secondo le norme NUREG 0612 e 0554.</p> <p>Il sistema è progettato per garantire, <u>in caso di guasto singolo</u>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-mantenimento del carico;</li> <li>-planarità del carico;</li> <li>-completamento delle operazioni e/o recupero della macchina (con il carico) nell'area operativa.</li> </ul> <p>Gestione automatizzata e interblocchi duplicati impediscono che si possano generare urti.</p> <p>Sistema di antipendolamento del carico che previene oscillazioni durante la fase di movimentazione.</p>	Nessuna.			La movimentazione dei colli può essere determinata dalla necessità di interventi sugli stessi a valle di ispezioni nel deposito.	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Danni o malfunzionamenti al carrello elevatore.	3	Danneggiamento e/o rottura dei colli con conseguente sviluppo di incendio e rilascio di radioattività.	No.	<p>Impiego di mezzi ad azionamento elettrico ampiamente sovradimensionati rispetto al carico da movimentare. Interventi programmati di manutenzione.</p> <p>Limitazione dell'altezza massima di sollevamento durante la movimentazione.</p> <p>Limitazione della velocità di movimentazione (non regolabile dall'operatore).</p> <p>Adozione di prescrizioni che vietano l'introduzione di materiale infiammabile all'interno del deposito.</p>	<p>Caduta del collo nell'area di stoccaggio durante le operazioni di movimentazione con carrello elettrico (involupta le conseguenze attese per qualsiasi evento che possa coinvolgere il vettore di trasporto dei colli nell'area operativa) con conseguente sviluppo di incendio</p>	<p>Recupero dei colli coinvolti nell'evento, eventuale overpacking dei colli danneggiati e decontaminazione dell'area.</p>	<p>Intervento del sistema di estinzione incendio ad acqua (dotato di Back up) per ridurre ulteriormente il materiale partecipante all'incendio.</p>	<p>La movimentazione dei colli può essere determinata dalla necessità di interventi sugli stessi a valle di ispezioni nel deposito. Le salvaguardie previste possono ridurre la possibilità di accadimento dell'evento considerato ma non possono escluderlo (il mezzo non garantisce la resistenza al guasto singolo).</p>	Da valutare.	S III -4
		Cedimento	4	Danneggiamento	No.	Il pallet è progettato per	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		strutturale pallet di stoccaggio.		mento e/o rottura dei colli con rilascio di radioattività.		<p>garantire ampi margini di sicurezza in relazione ai carichi che lo stesso deve sopportare durante le fasi di movimentazione e stoccaggio.</p> <p>La capacità di resistenza strutturale del pallet è verificata "by analysis" mediante analisi numeriche condotte con codici espliciti validati a livello internazionale.</p> <p>Il pallet è realizzato secondo elevati standard di qualità che prevedono controlli sui materiali, sui procedimenti costruttivi e sul prodotto finale.</p>						

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Errore umano durante movimentazione colli con carrello elevatore nell'area di stoccaggio	5	Danneggia-mento e/o rottura dei colli con conseguente possibile rilascio di radioattività.	No.	Esecuzione in automatico delle operazioni di movimentazione mediante il carro ponte. Interblocchi elettrici che disabilitano il comando "sgancio" del carico fino a quando i sensori preposti al controllo dello stato del carico non danno il consenso all'esecuzione delle operazioni. Sensori ridondati e basati su principi di funzionamento differenti. Definizione per i carrelli di percorsi di manovra lineari e privi di ostacoli da superare. Presenza di n° 2 operatori (oltre quello addetto alla guida del carrello) durante la fase di movimentazione che risulteranno di ausilio durante l'effettuazione delle manovre.	Caduta del collo nell'area di stoccaggio durante le operazioni di movimentazione con il carrello elevatore con conseguente rilascio di radioattività	Recupero dei colli coinvolti nell'evento, eventuale overpacking dei colli danneggiati e decontaminazione dell'area.	Presenza di un sistema di ventilazione e filtrazione che abbate l'eventuale materiale rilasciato al camino.	Le salvaguardie previste nel caso della movimentazione mediante carrello elevatore elettrico sono tali da non consentire l'esclusione dell'evento considerato.	Da valutare.	S III -5

Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo												
Fase operativa: Esercizio												
Nodo EM: Stoccaggio												
I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
3.4	Domino.	Sisma.	1	Danneggiamento dei colli stoccati con rilascio di radioattività.	No.	Modulo di stoccaggio verificato per resistere in campo elastico alle sollecitazioni del sisma nella configurazione di stoccaggio più severa (max livello di impilaggio).  Pile di moduli verificate al ribaltamento ed al martellamento.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
3.5	Caduta del sistema di ispezione remotizzata appeso al carroponete. carichi o urti a seguito di sisma, malfunzionamenti o rotture, errori umani.	Sisma.	1	Danneggiamento dei colli stoccati con rilascio di radioattività.	No.	Il sistema di fissaggio del gruppo di presa video è verificato sismicamente.  Le strutture del carroponete sono dimensionate per resistere in campo elastico alle sollecitazioni indotte dal sisma.  Il peso del sistema di ispezione è trascurabile, per cui la sua caduta non può provocare alcun danneggiamento ai fusti stoccati.	Nessuna.			Si esclude il sisma durante l'esecuzione delle operazioni di ispezione remota.	Nessuno.	OUT



**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Danni o malfunzionamenti alla struttura di ancoraggio del sistema di presa video.	2	Danneggiamento dei colli stoccati con rilascio di radioattività.	No.	Sistema di fissaggio progettato per garantire ampi margini di sicurezza ai carichi che lo stesso deve sopportare durante le fasi di ispezione.  Il peso del sistema di ispezione è trascurabile, per cui la sua caduta non può provocare alcun danneggiamento ai fusti stoccati.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**4. Perdita Totale/Malfunzionamento dei Sistemi d'Impianto**

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
4.1	Perdita o malfunzionamento del sistema di ventilazione.	Perdita sistema di alimentazione elettrica.	1	Perdita temporanea del controllo dell'UR. Perdita del confinamento dinamico dei locali. Rilascio non controllato a quota zero di radioattività eventualmente dispersa nell'edificio.	Si.			.		Durante il normale esercizio non è presente contaminazione in aria, pertanto la perdita del sistema non induce rilasci nella biosfera.  L'interruzione di alim. el. non induce eventi che portano a rilasci nel deposito; si esclude che l'evento avvenga in concomitanza con presenza di contamin. in aria nel deposito (Double failure).	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Perdita/anomalia del sistema di controllo.	2	Sbilanciamento delle pressioni differenziali tra i vari locali con possibile inversione dei flussi d'aria.	Si.	Presenza di una catena indipendente per il controllo delle depressioni composta da elementi in campo e centrale per la segnalazione d'allarme. Componenti del sistema ubicati in aree a basso rischio radiologico.	Nessuna.	Arresto delle operazioni. Arresto della ventilazione.		Il sistema indipendente consente di rilevare immediatamente eventuali anomalie del sistema di controllo principale.	Nessuno.	OUT
		Guasto/rottura ventilatore.	3	Sbilanciamento delle pressioni nei locali.	Si.	Componenti del sistema ubicati in aree a basso rischio radiologico.	Nessuna.	Arresto delle operazioni. Arresto della ventilazione.		La ridondanza del ventilatore consente di aumentare la disponibilità del sistema. Essa non è dettata dalla necessità di rispettare gli obiettivi di radioprotezione.	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Rottura filtro HEPA.	4	Rilascio della eventuale radioattività accumulata sui filtri.	Si.	Ridondanza del sistema di filtrazione. Ridondanza dei sistemi di controllo della pressione differenziale a monte e a valle dei filtri.	Rilascio nella biosfera di parte del materiale accumulato sui filtri. Dose addizionale per gli operatori addetti alla riparazione.	Arresto delle operazioni. Arresto della ventilazione. Sostituzione filtro in condizioni di sicurezza.	Gli operatori addetti alla riparazione sono dotati di adeguati DPI.	Perchè la rottura del filtro porti al rilascio nella biosfera è necessario che si sia verificato un evento incidentale che abbia portato l'accumulo di radioattività sui filtri, oltre alla violazione di una procedura (sostituzione filtri "sporchi").	Da valutare.	S III-6
4.2	Perdita / malfunzionamento del sistema rilevazione ed estinzione incendi.	Perdita totale per guasti meccanici, PLC o perdita di alimentazione elettrica.	1	Combustione completa del massimo incendio plausibile nel deposito in assenza di operatori.	No.	Alimentazione del sistema di rivelazione incendi dalla sezione interrompibile del sistema elettrico. Ridondanza delle pompe di alimentazione degli sprinkler. Alimentazione delle pompe degli sprinkler direttamente dalla sezione di emergenza del sistema elettrico.	Vedi caso "incendio interno" (2.1.1- Area di Stoccaggio)			Le scelte progettuali sono mirate ad elevare la disponibilità del sistema. La valutazione delle conseguenze sulla popolazione è stata però effettuata ipotizzando la perdita totale dei sistemi antincendio ("defence in depth").	Vedi caso "incendio interno" (2.1.1- Area di Stoccaggio)	S III-7

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
4.3	Perdita di alimentazione elettrica di potenza.	Perdita della rete elettrica esterna.	1	Perdita completa di tutti i sistemi energizzati dell'installazione.	No.	Sistema elettrico suddiviso in sezioni alimentate da sorgenti elettriche ridondate, separate ed indipendenti: sezione normale, sezione di emergenza e sezione ininterrompibile.	Nessuna.	Arresto delle operazioni nel deposito.		I criteri di suddivisione dei carichi tra i diversi tipi di alimentazione è motivata di volta in volta nell'analisi dei singoli sistemi presenti nell'installazione.	Nessuno.	OUT
4.4	Perdita di sistema di illuminazione.	Guasto rete elettrica.	1	Impossibilità di completare in sicurezza le operazioni in corso Possibile infortunio degli operatori.	No.	Presenza di tre sistemi di illuminazione, alimentati da sorgenti elettriche ridondate, separate ed indipendenti. Illuminazione di emergenza alimentata dalla sezione di emergenza del sistema elettrico ed in grado di fornire i lux necessari per arrestare in sicurezza le operazioni. Illuminazione di sicurezza alimentata direttamente dalla sezione ininterrompibile del sistema elettrico.	Nessuna.	Fermata delle operazioni.		La sezione normale del sistema di illuminazione fornisce i lux necessari per l'esecuzione delle attività in condizioni di normale esercizio. La sezione di emergenza fornisce i lux necessari per l'arresto in sicurezza delle operazioni in condizioni anomale. La sezione di sicurezza fornisce i lux necessari per l'evacuazione dei locali dell'edificio.	Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
4.5	Perdita / malfunzionamento del sistema di movimentazione (carroponte).	Cedimento delle strutture del ponte.	1	Rilascio del carico in movimento con generazione di missili secondari sui colli già stoccati.	No.	Elevati fattori di sicurezza nella progettazione dei carriponte e delle componenti meccanici (carriponte progettati a norma NUREG 0554 e NUREG 0612). Strutture sovradimensionate per resistere in campo elastico alle peggiori condizioni carico (Sisma di progetto).	Nessuna.				Nessuno.	OUT

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Rottura di componenti del sistema di sollevamento ed apprensione (funi, pinza, argani, ecc..)	2	Rilascio del carico in movimento con generazione di missili secondari sui colli già stoccati.	No.	Carroponte costruito secondo le norme dettate dal NUREG 0612 e 0554. Previste due unità di sollevamento collegate in cinematica chiusa. Sul tamburo delle unità di sollevamento agiranno 2 coppie di funi. Si otterranno così due sistemi di rinvio indipendenti per il collegamento al mezzo di presa del carico in 4 punti, ognuno dei quali ridondato. L'eventuale rottura di una fune eviterà sia la caduta, che i movimenti accidentali del carico. Dimensionamento dei componenti per cicli operativi più onerosi di quelle reali.	Dose agli operatori	Completamento delle operazioni, trasferimento della macchina nell'area operativa ed esecuzione degli interventi di manutenzione.	Gli eventuali interventi saranno condotti nell'area operativa, dove è minimo il rischio per gli operatori.	Il sistema, incluso il mezzo di presa, è progettato per garantire/consentire, in caso di guasto singolo, quanto di seguito indicato: -mantenimento del carico; -planarità del carico; -completamento delle operazioni e/o recupero della macchina (con il carico) nell'area operativa. L'intervento di ripristino è condotto nell'area operativa	Da valutare	S II-1

**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Guasto al sistema di gestione automatica del carroponte.	3	Arresto delle operazioni.	Si	Quadri di automazione ubicati in locali a rischio radiologico nullo o molto basso. Gestione delle operazioni di recupero in modalità manuale mediante sistema TVCC.	Nessuna.				Nessuno.	OUT
		Perdita alimentazione elettrica.	4	Arresto delle operazioni.	Si.	Quadri elettrici previsti a terra in locali a rischio radiologico basso ovvero nullo.	Nessuna.			Il carico resta sospeso in sicurezza fino al ripristino dell'alimentazione.	Nessuno.	OUT
4.6	Perdita / malfunzionamento del sistema di monitoraggio radiologico (interno ed esterno edificio).	Perdita alimentazione elettrica.	1	Perdita monitoraggio radiologico dell'aria estratta dal sistema di ventilazione.	No.	Alimentazione del sistema di monitoraggio dalla sezione ininterrompibile del sistema elettrico.	Nessuna.				Nessuno.	OUT



**Analisi FMEA per il Nodo "Stoccaggio" della fase di Esercizio del Deposito Temporaneo**

**Fase operativa: Esercizio**

**Nodo EM: Stoccaggio**

I.D.	Evento	Cause	N	Eventuali conseguenze	Accettabilità	Salvaguardie	Conseguenze attese	Azioni correttive	Fattori mitigativi	Commenti	Danno radiolog.	Tipo
		Guasto di un rilevatore (radiazione gamma o di contaminazione).	2	Entrata operatori in zona controllata.	Si.	Impiego di strumentazione carrellata.	Dose per gli operatori.				Da valutare.	S II-2
4.7	Perdita / malfunzionamento del sistema drenaggi potenzialmente contaminati.	Guasti meccanici o perdita dell'alimentazione elettrica.	1	Rilascio di radioattività in forma liquida nella biosfera.	No	Sistema completamente passivo costituito da canalette di raccolta a pavimento nell'area di stoccaggio e nell'area operativa che colluttano i liquidi sversati in una vasca di accumulo rivestita internamente con liner in acciaio inox. Vasca di raccolta verificata sismicamente. Trasferimento dei liquidi dalla vasca effettuato mediante skid carrellato.	Nessuna.				Nessuno.	OUT

PROG.	TIPO EVENTO	EVENTO			CAUSA	CONSEGUENZE	NOTE
		ID	Sub Case	Descrizione			
M III-1	Eventi interni d'area	2.1	01	Incendio area di stoccaggio	Rottura carrello elevatore	Rilascio di radioattività nella biosfera associato alla combustione di materiale combustibile sfuso	Da valutare
M III-2	Eventi interni d'area	2.1	02	Incendio area operativa	Impatto mezzo di trasporto su collo lasciato nell'area operativa	Rilascio di radioattività nella biosfera associato alla combustione di materiale combustibile sfuso	Da valutare
M III-3	Eventi interni d'area	2.1	04	Incendio filtro HEPA	Gusto all'alimentazione elettrica dei motori dei ventilatori	Rilascio nella biosfera della radioattività eventualmente accumulata sui filtri	Conseguenze involuptate dagli altri eventi incendio considerati.
M III-4	Eventi interni d'area	2.4	01	Rottura filtro HEPA	Missile generato dalla rottura del ventilatore	Rilascio nella biosfera della radioattività eventualmente accumulata sui filtri	Conseguenze involuptate dal caso III-3, perché lo stesso inventario è rilasciato dopo incendio a quota zero.
M III-5	Eventi funzionali e di processo	3.3	03	Incendio area di stoccaggio	Danno al carrello elevatore	Rilascio di radioattività nella biosfera	Conseguenze involuptate dagli altri eventi incendio considerati.
M III-6	Eventi funzionali e di processo	3.3	05	Incendio area di stoccaggio	Errore umano durante movimentazione colli con carrello elevatore nell'area di stoccaggio	Rilascio di radioattività nella biosfera	Conseguenze involuptate dagli altri eventi incendio considerati.
M III-7	Perdita sistemi d'Impianto	4.1	06	Perdita sistema di ventilazione per rottura filtri HEPA	Sfondamento per sovrappressione	Rilascio nella biosfera della radioattività eventualmente accumulata sui filtri	Vedi M III-4
M III-8	Perdita sistemi d'Impianto	4.2	01	Perdita totale sistema antincendio			Tale evento è presupposto alla base di tutte le valutazioni di impatto associate ai casi di incendio di

PROG.	TIPO EVENTO	EVENTO			CAUSA	CONSEGUENZE	NOTE
		ID	Sub Case	Descrizione			
							cui ai punti precedenti della presente tabella

**Tabella A4 - Eventi di Categoria III per il Nodo “Movimentazione Manufatti”**

## APPENDICE 2 - LISTA IAEA (ISAM) DEI FEP Features Events and Processes

<b>CONTESTO DI VALUTAZIONE</b>		<b>0</b>
<i>Fattori da prendere in considerazione per la determinazione dello scopo delle analisi (quali feps includere, risultati dei calcoli, requisiti legislativi, identificazione di gruppi di critici). Il contesto di valutazione rappresenta una categoria che al suo interno racchiude più FEPs</i>		
<b>PUNTI FINALI DELLO STUDIO</b>		<b>0.01</b>
<i>La salute umana a breve e lungo termine e i rischi per l'ambiente dovuti alla presenza del deposito; questa Fep può essere espressa tramite indicatori numerici.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Dose annuale per individuo</i>	<i>Concentrazione di radionuclidi</i>	<i>Crescita del livello di radiazioni nell'ambiente</i>
<i>Concentrazione di radionuclidi</i>	<i>Flusso attraverso le barriere ingegneristiche</i>	<i>Rischio collettivo</i>
<i>Rischio annuale per individuo</i>	<i>Flusso dalla geosfera alla biosfera</i>	<i>Dosi per altri esseri viventi</i>
<i>Dose collettiva</i>		<i>Rilascio di contaminanti tossici di origine non radiologica</i>
<i>Dose effettiva collettiva</i>		
<b>TEMPI</b>		<b>0.02</b>
<i>Periodo durante il quale il deposito e le scorie ivi contenute possono essere causa di rischio per l'uomo o per l'ambiente (compreso tra 300 e 500 anni)</i>		
<b>DOMINIO SPAZIALE DI STUDIO</b>		<b>0.03</b>
<i>Si necessita di una descrizione dello spazio da studiare. Spazio riguardo il quale è studiato il livello di rischio causato dal deposito. Spazio da modellare a causa della presenza del deposito.</i>		
<b>IPOTESI SUL DEPOSITO</b>		<b>0.04</b>
<i>Ipotesi riguardanti la costruzione, il periodo di vita, la chiusura e la post chiusura del deposito-</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Descrizione della costruzione, operatività e chiusura</i>	<i>Chiusura effettuata con successo</i>	<i>Cambiamenti nel progetto del deposito. Cambiamenti del volume dei rifiuti</i>
<b>IPOTESI SULLE AZIONI UMANE FUTURE</b>		<b>0.05</b>
<i>Ipotesi sui possibili cambiamenti dello stile di vita dell'umanità nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Descrizione della società Tecnologie attuali</i>	<i>Sono considerate solo tecnologie predette nel passato</i>	<i>Descrizione dello sviluppo della società. Futuro visto come un riflesso del passato.</i>

<b>COMPORAMENTO UMANO FUTURO (GRUPPO TARGET)</b>		<b>0.06</b>
<i>Definizioni di gruppi di popolazione future simili nel comportamento e particolarmente esposti al rischio Descrizione di un gruppo critico attuale. Ipotesi riguardo gruppi critici futuri</i>		
<b>IPOTESI SUGLI EFFETTI DA RADIAZIONI</b>		<b>0.07</b>
<i>Relazione tra effetti/rischio ed esposizione alle radiazioni negli esseri umani o nell'ambiente</i>		
<b>SCOPI DELLO STUDIO</b>		<b>0.08</b>
<i>Gli scopi dello studio dipendono da quale fase della vita del deposito è oggetto dello studio stesso</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Selezione del sito. Progetto Dimostrare il rispetto delle norme</i>	<i>Riabilitazione di un sito contaminato</i>	<i>Ottimizzazione della fiducia pubblica</i>
<b>REQUISITI LEGISLATIVI</b>		<b>0.09</b>
<i>Norme che possono influenzare la sicurezza del deposito anche nel periodo post chiusura</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Indipendenza della sicurezza dai controlli. Ottimizzazione. Effetti futuri</i>	<i>Controlli di qualità Standard di protezione ambientale</i>	<i>Casi di sicurezza a più fattori Standard di protezione radiologica</i>
<b>MODELLI DI STUDIO E DATI</b>		<b>0.10</b>
<i>Creazione di modelli di calcolo, estrapolazione di dati utili e trattamento di quest'ultimi</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Trattamento delle incertezze. Uso dei dati del sito. Filosofia di studio</i>	<i>Modelli di studio Semplificazione di dati e modelli</i>	<i>Applicazione delle ipotesi conservative. Reperibilità dei dati</i>

<b>FATTORI ESTERNI</b>		<b>1</b>
<i>Fattori da prendere in considerazione per la determinazione dello scopo delle analisi (quali feps includere, risultati dei calcoli, requisiti legislativi, identificazione di gruppi di critici).</i>		
<i>Il contesto di valutazione rappresenta una categoria che al suo interno racchiude più FEPs</i>		
<b>SITO DI LOCALIZZAZIONE</b>		<b>1.1</b>
<i>Riguarda tutte le caratteristiche del sito di localizzazione.</i>		
<b>INDAGINI SUL SITO</b>		<b>1.1.01</b>
<i>Informazioni riguardo il sito sia in fase di progetto, che durante la vita del deposito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Geografia</i>	<i>Caratteristiche geochimiche</i>	<i>Caratteristiche ecologiche</i>
<i>Demografia</i>	<i>Caratteristiche delle falde</i>	<i>Programma di monitoraggio preoperativo</i>
<i>Meteo e clima</i>	<i>Risorse naturale</i>	<i>Caratteristiche idrologiche</i>
<i>Idrologia</i>	<i>Caratteristiche della biosfera</i>	<i>Caratteristiche geomorfologiche</i>
<i>Caratteristiche geotecniche</i>		<i>Caratteristiche geoidrologiche</i>
<b>PROGETTO DEL DEPOSITO</b>		<b>1.1.02</b>
<i>Feps relative al progetto del deposito sia per quanto riguarda la sicurezza, sia per tutti gli altri campi ingegneristici</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Caratteristiche di progetto</i>	<i>Condizioni nominali e non nominali</i>	
<b>COSTRUZIONE DEL DEPOSITO</b>		<b>1.1.03</b>
<i>Feps relative alla fase di costruzione del deposito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Perforazioni</i>	<i>Specifiche di costruzione, pianificazione del sito</i>	<i>Controllo dell' acqua</i>
<i>Scavi</i>		<i>Preparazione del sito</i>
<i>Strumenti per la costruzione</i>		
<b>POSIZIONAMENTO DEI RIFIUTI E DEI BACKFILLING</b>		<b>1.1.04</b>
<i>Posizionamento dei rifiuti <u>normali</u> e <u>non</u> all'interno del deposito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Configurazione.</i>	<i>Spazi vuoti tra i contenitori</i>	<i>Copertura dei rifiuti</i>
<b>CHIUSURA DEL DEPOSITO</b>		<b>1.1.05</b>
<i>Feps relative alle operazioni di riempimento e alla chiusura e copertura dell' impianto</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Costruzione della copertura</i>	<i>Rimozione delle strutture di superficie</i>	<i>Decontaminazione e decommissioning</i>
<i>Stabilizzazione del sito</i>	<i>Procedure di chiusura</i>	<i>Monitoraggio post chiusura</i>
		<i>Chiusura dei compartimenti</i>

<b>DOCUMENTAZIONE E SEGNALAZIONE DEL DEPOSITO</b>		<b>1.1.06</b>
<i>Feps relative a tutta la documentazione riguardante il deposito e alle sue segnalazioni</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Documenti sul contenuto del deposito</i>	<i>Segnali Archivi</i>	<i>Segnalazione del sito</i>
<b>STANZIAMENTO DEI RIFIUTI</b>		<b>1.1.07</b>
<i>FEPs relativi allo stanziamento dei rifiuti, compresa la tipologia e la quantità</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Rifiuti futuri. Descrizione dello stanziamento dei rifiuti.</i>	<i>Strategia di stanziamento futuro.</i>	<i>Criteri per l'accettabilità dei rifiuti.</i>
<b>CONTROLLI DI QUALITA'</b>		<b>1.1.08</b>
<i>Procedure di controllo durante tutte le fasi della vita del deposito. I dati ricavati possono esser riutilizzati nello studio</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Difetti nel deposito. Difetti nei contenitori.</i>	<i>Posizionamento improprio.</i>	<i>Difetti nella costruzione dei coperchi. Difetti durante il condizionamento dei rifiuti.</i>
<b>PIANIFICAZIONE</b>		<b>1.1.09</b>
<i>Eventi e attività durante tutte le fasi della vita dell'impianto</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Costruzione di unità. Pianificazione delle attività di monitoraggio.</i>	<i>Pianificazione del posizionamento dei rifiuti, delle coperture e delle chiusure.</i>	
<b>CONTROLLI AMMINISTRATIVI</b>		<b>1.1.10</b>
<i>Controlli sia durante il periodo di vita che durante la post chiusura</i>		
<b>MONITORAGGIO DEL DEPOSITO</b>		<b>1.1.11</b>
<i>Operazioni di monitoraggio varie</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Monitoraggio pre-operativo. Monitoraggio post-operativo.</i>	<i>Programma di monitoraggio.</i>	

<b>INCIDENTI E EVENTI ANOMALI</b>		<b>1.1.12</b>
<i>Incidenti o eventi che possono avere un impatto sulle performance a lungo termine dell' impianto e sulla sicurezza</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti delle operazioni. Copertura anticipata.</i>	<i>Eventi geologici inaspettati. Deviazioni volute.</i>	<i>Copertura anticipata. Incremento dei rifiuti spediti.</i>
<b>RECUPERABILITA'</b>		<b>1.1.13</b>
<i>Misure da adottare per l' eventuale recupero dei rifiuti</i>		
<b>PROCESSI E EFFETTI GEOLOGICI</b>		<b>1.2</b>
<b>OROGENESI E PROCESSI TETTONICI AI BORDI DELLE PLACCHE</b>		<b>1.2.01</b>
<i>I suddetti processi possono essere origine di importanti conseguenze per l'impianto</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Collisione tra placche.</i>	<i>Metamorfosi della litosfera.</i>	<i>Orogenesi. Tettonica.</i>
<b>PROCESSI GEOLOGICI NON OROGENETICI</b>		<b>1.2.02</b>
<i>Deformazione fisiologica delle strutture geologiche come compressione e rottura e loro implicazioni per l'impianto</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Fratture. Vulcanismo. Neotettonica.</i>	<i>Fratture. Compressione.</i>	<i>Estrusioni. Difetti.</i>
<b>SISMICITA'</b>		<b>1.2.03</b>
<i>FEPs relativi alla sismicità e ai suoi effetti sull' ambiente e sull' impianto</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti fisici nelle rocce. Cambiamenti idrogeologici.</i>	<i>Terremoti. Tsunami.</i>	<i>Liquefazione della crosta terrestre. Sciame sismico.</i>
<b>ATTIVITA' VULCANICA E MAGMATICA</b>		<b>1.2.04</b>
<i>FEPs relativi alle suddette attività e ai loro effetti sull' ambiente e sull' impianto</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Crescita di T e P. Cambiamenti nelle rocce.</i>	<i>Attività magmatica intrusiva. Attività magmatica estrusiva.</i>	<i>Colate/esplosioni piroclastiche. Fumarole. Alterazioni idrotermiche.</i>



<b>METAMORFOSI</b>		<b>1.2.05</b>
<i>Cambiamenti nelle rocce dovuti al calore proveniente dal centro della terra</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Storia metamorfica delle rocce.</i>		
<b>ATTIVITA' IDROTERMICA</b>		<b>1.2.06</b>
<i>FEPs associati alla suddetta attività e ai cambiamenti imposti da questa sull' ambiente e agli effetti possibili per l'impianto</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Sintesi idrotermica.</i>	<i>Metamorfosi idrotermica.</i>	
<b>EROSIONE E SEDIMENTAZIONE</b>		<b>1.2.07</b>
<i>Durante i tempi di interesse i suddetti fenomeni nn dovrebbero portare effetti tangibili per il deposito e le sue caratteristiche</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti topografici Erosione.</i>	<i>Sedimentazione.</i>	<i>Cambiamenti idrogeologici Erosione.</i>
<b>PROCESSI DI FORMAZIONE DELLE ROCCE DAI SEDIMENTI</b>		<b>1.2.08</b>
<i>Tali processi non dovrebbero avere effetti nei tempi di interesse</i>		
<b>DIAPIRISMO, EVOLUZIONE E DISSOLUZIONE DI FORMAZIONI SALINE</b>		<b>1.2.09</b>
<i>Suddetti cambiamenti dovuti a cambiamenti geologici su larga scala</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Dapirismo</i>		
<b>EFFETTI ( IDRO)GEOLOGICI DERIVANTI DA CAMBIAMENTI GEOLOGICI</b>		<b>1.2.10</b>
<i>Suddetti cambiamenti dovuti a cambiamenti geologici su larga scala</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti geochimici.</i>	<i>Cambiamenti nelle proprietà idrauliche.</i>	<i>Cambiamenti nelle condizioni limite idrologiche.</i>
<b>EFFETTI E PROCESSI CLIMATICI</b>		<b>1.3</b>
<i>Effetti dovuti a cambiamenti climatici su larga scala.</i>		
<b>CAMBIAMENTI CLIMATICI GLOBALI</b>		<b>1.3.01</b>
<i>Tali cambiamenti possono causare importanti effetti</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Descrizione dei cambiamenti. Cambiamenti atmosferici.</i>	<i>Cambiamenti nei ghiacci e nella vegetazione.</i>	<i>Movimenti isostatici. Glaciazioni.</i>

<b>CAMBIAMENTI CLIMATICI LOCALI</b>		<b>1.3.02</b>
<i>Influenzano il comportamento del deposito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Fluttuazioni climatiche. Cambiamenti della precipitazione.</i>	<i>Descrizione del range climatico globale e locale.</i>	<i>Crescita/diminuzione di T.</i>
<b>CAMBIAMENTI DEL LIVELLO DEL MARE</b>		<b>1.3.03</b>
<i>Può derivare da 1.3.01 o 1.3.02</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Flooding.</i>	<i>Intrusione salina nel deposito.</i>	<i>Cambiamenti nel regime idrogeologico.</i>
<b>EFFETTI CAUSATI DA FORMAZIONI DEI GHIACCIAI</b>		<b>1.3.04</b>
<i>Movimenti di grosse masse d' acqua, dovuti ai cambiamenti climatici stagionali, possono influenzare il deposito.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Movimento delle acque. Erosione.</i>	<i>Influenza stagionale</i>	<i>Saturazione dei materiali di superficie.</i>
<b>EFFETTI LOCALI DERIVANTI DA FORMAZIONI DI GHIACCIO</b>		<b>1.3.05</b>
<i>Possibili erosioni, e cambiamenti idrogeologici</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Erosione. cambiamenti idrogeologici.</i>		<i>Cambiamenti morfologici.</i>
<b>EFFETTI DOVUTI AI CLIMI CALDI (ZONE TROPICALI E DESERTICHE)</b>		<b>1.3.06</b>
<i>Alta temperatura e umidità unite a possibili eventi come uragani e monsoni.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Tempeste. Monsoni. Uragani.</i>		<i>Degrado biologico rapido. Cambiamenti nel regime idrologico. Erosione</i>
<b>RISPOSTA IDROLOGICA/IDROGEOLOGICA AI CAMBIAMENTI CLIMATICI</b>		<b>1.3.07</b>
<i>I cambiamenti ambientali sono strettamente legati al clima</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti nel ricambio dell' acqua sotterranea. Cambiamenti nell'equilibrio dell'acqua.</i>	<i>Cambiamenti nel ciclo dell' acqua. Cambiamenti nella formazione di ghiacciai.</i>	<i>Cambiamenti superficiali.</i>

<b>RISPOSTA ECOLOGICA AI CAMBIAMENTI CLIMATICI</b>		<b>1.3.08</b>
<i>Effetti ecologici dovuti ai cambiamenti climatici.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Formazione di deserti. Cambiamenti nella flora.</i>	<i>Cambiamenti nella vita della fauna.</i>	<i>Adattamento ecologico.</i>
<b>RISPOSTA UMANA AI CAMBIAMENTI CLIMATICI</b>		<b>1.3.09</b>
<i>Cambiamenti nel comportamento umano che possono influenzare l'impianto, l'ambiente o il rischio</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Abiti. Cibo. Attività agricole.</i>	<i>Dieta. Densità di popolazione Irrigazione.</i>	<i>Effetti sull'uso dell'acqua.</i>
<b>ALTRI CAMBIAMENTI GEOMORFOLOGICI</b>		<b>1.3.10</b>
<i>Cambiamenti non visibili riguardo, per esempio, la superficie terrestre.</i>		
<b>AZIONI UMANE FUTURE</b>		<b>1.4</b>
<i>Azioni umane future nel periodo di post chiusura che possono influenzare l'impianto, il rischio o l'ambiente</i>		
<b>INFLUENZA UMANA SUL CLIMA</b>		<b>1.4.01</b>
<i>Le azioni umane possono influenzare, direttamente o indirettamente, il clima.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Deforestazione. Emissione di gas come CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.</i>		
<b>SCAVI (INTRUSIONE UMANA)</b>		<b>1.4.02</b>
<i>Possono essere eseguiti sapendo o meno dell'esistenza del deposito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Esplorazione del sottosuolo. Esplorazione per ricerca di siti. Per pozzi d'acqua. Per estrarre i rifiuti.</i>		
<b>CONOSCENZA E MOTIVAZIONI</b>		<b>1.4.03</b>
<i>Conoscenza del deposito e motivazioni per eventuali azioni che possono interferire con esso, siano inavvertite o deliberate</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Intrusione umana. Azioni deliberate. Azioni inavvertite.</i>		

<b>ATTIVITÀ MINERARIE E ALTRO (INTRUSIONE UMANA)</b>		<b>1.4.04</b>
<i>Gli scavi possono essere eseguiti essendo a conoscenza o meno dell'esistenza deposito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Risorse minerarie. Scavi industriali. Produzione energia geotermica. Presenza di gallerie.</i>	<i>Iniezione di fluidi. Intrusione volontaria. Guerra. Sabotaggio.</i>	
<b>RICERCHE NON INTRUSIVE DEL SITO</b>		<b>1.4.05</b>
<i>Tali ricerche possono essere eseguite per esempio per recuperare informazioni sul sito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Ricerche di risorse geologiche e di archivi storici.</i>		
<b>SCAVI DI SUPERFICIE</b>		<b>1.4.06</b>
<i>Possono influenzare le performance del deposito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Scavi militari. Dighe.</i>		
<b>INQUINAMENTO</b>		<b>1.4.07</b>
<i>Attività umane che lo causano. L'inquinamento può esser causa di effetti sulle performance del deposito</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Piogge acide. Fertilizzanti. Inquinamento.</i>		
<b>ATTIVITA' ARCHEOLOGICHE</b>		<b>1.4.08</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Ritrovamento di materiale archeologico</i>	<i>Intrusione inavvertita.</i>	
<b>SVILUPPO DEL SITO</b>		<b>1.4.09</b>
<i>Attività umane di superficie che possono influire sulle performance del sito, sia durante il periodo di attività, sia qualora si perdesse la memoria dell'esistenza dell'impianto</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Occupazione del sito. Livellazione di colline.</i>	<i>Costruzioni varie. Modifiche del sistema di drenaggio.</i>	<i>Costruzioni varie. Estensione di terreni.</i>

<b>GESTIONE DELL' ACQUA</b>		<b>1.4.10</b>
<i>La gestione delle acque è importante sia per quanto riguarda l'impatto diretto sul deposito, sia perché l'acqua può essere un potenziale mezzo di trasmissione/contatto tra radionuclidi e ambiente</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Sistemi di drenaggio. Rifiuti chimici. Usi industriali. Costruzioni idriche.</i>	<i>Desalinizzazione. Creazione di bacini artificiali.</i>	<i>Estrazione di acqua contaminata. Uso dell' acqua. Produzione salina.</i>
<b>SVILUPPO SOCIALE E ISTITUZIONALE</b>		<b>1.4.11</b>
<i>Lo sviluppo umano può influenzare fortemente il sistema di smaltimento</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Perdita degli archivi. Cambiamenti normativi. Cambiamenti demografici.</i>	<i>Cambiamenti nei controlli. Perdita di memoria.</i>	
<b>SVILUPPO TECNOLOGICO</b>		<b>1.4.12</b>
<i>Molto importanti sono quelle tecnologie che possono permettere l'intrusione volontaria o meno all'interno del deposito o eventuali inviluppi tecnologici</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Inviluppo tecnologico.</i>	<i>Perdita della capacità di miglioramento.</i>	
<b>AZIONI DI RIMEDIO E AGGIUSTAMENTO</b>		<b>1.4.13</b>
<i>FEPs relativi a eventuali azioni post chiusura</i>		
<b>ESPLOSIONI E IMPATTI</b>		<b>1.4.14</b>
<i>Esplosioni o incidenti che possono avere effetti sul deposito e sulle sue performance di isolamento</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Intrusioni</i>	<i>Test nucleari sotterranei</i>	<i>Impatto di aereo</i>

<b>STUDIO DEL SISTEMA DI SMALTIMENTO : FATTORI AMBIENTALI</b>		<b>2</b>
<i>Determinazione dei fattori ambientali che possono influenzare il comportamento del deposito</i>		
<b>RIFIUTI E CARATTERISTICHE INGEGNERISTICHE</b>		<b>2.1</b>
<b>INVENTARIO DEI RADIONUCLIDI E ALTRI MATERIALI</b>		<b>2.1.01</b>
<i>In questo elenco, oltre ai rifiuti radio tossici, possono esserci anche altri materiali.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Radionuclidi contenuti.</i>	<i>Materiale organico.</i>	<i>Metalli.</i>
<b>CARATTERISTICHE E PROCESSI DI DEGRADAZIONE DEI MODULI DI RIFIUTO</b>		<b>2.1.02</b>
<i>Le suddette caratteristiche devono esser conosciute per poter prevedere le prestazioni dell' impianto nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Degradazione fisica, chimica.</i>	<i>Residui evaporati.</i>	<i>Cementi e resine.</i>
<i>Metalli attivati.</i>	<i>Matrici solide.</i>	
<b>CARATTERISTICHE E PROCESSI DI DEGRADAZIONE DEI MATERIALI DI CONTENIMENTO</b>		<b>2.1.03</b>
<i>Le suddette caratteristiche devono esser conosciute per poter prevedere le prestazioni dell' impianto nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Degradazione di metalli.</i>		
<i>Degradazione di cementi.</i>		
<b>CARATTERISTICHE, E PROCESSI DI DEGRADAZIONE DEI MATERIALI DI RIEMPIMENTO</b>		<b>2.1.04</b>
<i>Le suddette caratteristiche devono esser conosciute per poter prevedere le prestazioni dell' impianto nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Processi di degradazione.</i>		
<i>Cemento.</i>		
<i>Sabbia.</i>		
<i>Terra.</i>		
<b>CARATTERISTICHE E PROCESSI DI DEGRADAZIONE DELLE BARRIERE INGEGNERISTICHE</b>		<b>2.1.05</b>
<i>Le suddette caratteristiche devono esser conosciute per poter prevedere le prestazioni dell' impianto nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Materiali.</i>		
<i>Processi di degradazione delle coperture.</i>		
<i>Resistenza all intrusione.</i>		

<b>CARATTERISTICHE E PROCESSI DI DEGRADAZIONE DI ALTRE BARRIERE INGEGNERISTICHE</b>		<b>2.1.06</b>
<i>Le suddette caratteristiche devono esser conosciute per poter prevedere le prestazioni dell' impianto nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Pozzi, trincee, gallerie, muri.</i>	<i>Riduzione del flusso di radionuclidi attraverso le barriere.</i>	<i>Processi di degradazione.</i>

<b>PROCESSI E CONDIZIONI MECCANICHE</b>		<b>2.1.07</b>
<i>Le suddette caratteristiche devono esser conosciute per poter prevedere le prestazioni dell' impianto nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Compressioni. Cambiamenti di volume. Movimenti.</i>	<i>Fratture. Collassi lineari.</i>	

<b>PROCESSI E CONDIZIONI IDRAULICHE/IDROGEOLOGICHE</b>		<b>2.1.08</b>
<i>Le suddette caratteristiche RIGUARDANTI I RIFIUTI, L IMPIANTO O I CONTENITORI devono esser conosciute per poter prevedere le prestazioni dell' impianto nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Non funzionamento dei sistemi di drenaggio, dei coperchi. Mancanza di una copertura. L'infiltrazione e la circolazione dei fluidi nell'ambiente del deposito. Effetti osmotici. Fratturazione dei componenti in calcestruzzo. Generazione di gas.</i>	<i>Cambiamenti di pressione. Cambiamenti di viscosità. Attacchi chimici.</i>	<i>Cambiamenti minerali. Contaminazione delle falde. Cambiamenti di ph.</i>

<b>CONDIZIONI/PROCESSI CHIMICI E GEOCHIMICI</b>		<b>2.1.09</b>
<i>Le suddette caratteristiche devono esser conosciute per poter prevedere le prestazioni dell' impianto nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti del ph. Attacco solforico. Effetto osmotico.</i>	<i>Corrosione. Attacco di cloro. Interazioni chimiche</i>	

<b>CONDIZIONI/PROCESSI BIOLOGICI E BIOCHIMICI</b>		<b>2.1.10</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Effetti sui materiali organici. Variazioni dovuti a cambi di T. Cambiamenti chimici e di ph.</i>		

<b>PROCESSI E CONDIZIONI TERMICHE</b>		<b>2.1.11</b>
<i>Effetti della temperatura (T) sull'impianto e ciò che vi è intorno</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Produzione di calore e variat. di T. Cambiamenti chimici. Pressione dei gas e dei liquidi. Cambiamenti microbiologici.</i>		
<b>SORGENTI DI GAS E EFFETTI</b>		<b>2.1.12</b>
<i>La nascita di specie in fase gassosa può influenzare le prestazioni dell'impianto.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Esplosione. Pressurizzazione. Pressioni anomale.</i>	<i>Degradazione meccanica. Decomposizioni. Generazione di gas.</i>	<i>Interazioni tra effetti precedenti.</i>
<b>EFFETTI DELLE RADIAZIONI SULL' IMPIANTO</b>		<b>2.1.13</b>
<i>Effetti delle radiazioni (provenienti dai rifiuti) sui moduli e sulle barriere presenti nell'impianto.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Effetti dell'irraggiamento sui materiali e sulle loro caratteristiche.</i>	<i>Degradazioni. Generazione di gas. Radiolisi</i>	
<b>CRITICITA' NUCLEARE</b>		<b>2.1.14</b>
<i>Cause e effetti di una possibile reaz. Nucleare spontanea</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Criticità radiologica da reazione nucleare spontanea.</i>		
<b>MATERIALI ESTRANEI</b>		<b>2.1.15</b>
<i>Possibile presenza di materiale estraneo.</i>		
<b>AMBIENTE GEOLOGICO</b>		<b>2.2</b>
<i>Processi e caratteristiche del ambiente geologico attorno al sito, che possono influenzare le caratteristiche e il comportamento del sito stesso</i>		
<b>PROPRIETÀ ZONA LITOLOGICA DISTURBATA</b>		<b>2.2.01</b>
<i>Possono avere caratteristiche diverse rispetto alla schiera litologica indisturbata</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Fratture dovute a costruzioni. Cambiamenti delle proprietà idrauliche.</i>		



<b>PROPRIETA' LITOLOGICHE</b>		<b>2.2.02</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Conduttività termica e idraulica.</i> <i>Porosità.</i> <i>Descrizione della litosfera.</i> <i>Forze applicate.</i>		
<b>EVOLUZIONI POSSIBILI DELLA LITOLOGIA</b>		<b>2.2.03</b>
<i>È molto importante prevedere le possibili evoluzioni della schiera litologica sia durante il periodo di operatività, che dopo la chiusura dell'impianto.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Stratificazione non uniforme.</i> <i>Eterogeneità.</i> <i>Descrizione della litosfera.</i>		
<b>DISCONTINUITÀ SU LARGA SCALA NELLA GEOSFERA</b>		<b>2.2.04</b>
<i>Feps relative alle discontinuità su larga scala presenti nella geosfera.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Interfacce, diversi tipi di rocce.</i> <i>Formazioni intrusive.</i>		
<b>POSSIBILI VIE DI CONTAMINAZIONE</b>		<b>2.2.05</b>
<i>Discontinuità tra zone sature e insature e come queste ultime possono evolversi nel tempo</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Frattura.</i> <i>Flusso poroso.</i> <i>Interazione tra fratture.</i>		
<b>PROCESSI E CONDIZIONI MECCANICHE NELLA GEOSFERA</b>		<b>2.2.06</b>
<i>Processi tra la zona satura e quella insatura</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Elevazioni.</i> <i>Cedimenti.</i>		
<b>PROCESSI E CONDIZIONI IDRAULICHE/IDROGEOLOGICHE NELLA GEOSFERA</b>		<b>2.2.07</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Gradiente di T.</i> <i>Introduzione salina.</i>	<i>Flusso attraverso le fratture.</i> <i>Condizioni sature/insature.</i> <i>Ricambio acquifero.</i>	

<b>CONDIZIONI E PROCESSI CHIMICI/GEOCHIMICI NELLA BIOSFERA</b>		<b>2.2.08</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti di potenziali chimici. Variazioni di ph. Acidità</i>	<i>Effetti delle soluzioni non radioattive.</i>	
<b>PROCESSI E CONDIZIONI BIOLOGICHE NELLA GEOSFERA</b>		<b>2.2.09</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti nella popolazione di microrganismi.</i>	<i>Influenze sul ph.</i>	
<b>CONDIZIONI E PROCESSI TERMICI NELLA GEOSFERA</b>		<b>2.2.10</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Calore biologico. Reazioni chimiche. Cambiamenti di T.</i>		
<b>SORGENTI DI GAS E EFFETTI NELLA GEOSFERA</b>		<b>2.2.11</b>
<i>Possibili sorgenti di gas e loro effetti</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Intrusione di gas.</i>		
<b>RISORSE GEOLOGICHE</b>		<b>2.2.12</b>
<i>La possibile presenza di risorse geologiche può essere causa di scavi o intrusioni.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Minerali. Acqua.</i>	<i>Gas. Petrolio.</i>	
<b>CARATTERISTICHE NON STUDIATE</b>		<b>2.2.13</b>
<i>Come gallerie, trincee, intrusioni di origine umana o meno</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Costruzioni sul sito</i>		
<b>AMBIENTE SUPERFICIALE</b>		<b>2.3</b>
<i>Descrizione dell' ambiente superficiale attorno all'impianto.</i>		

<b>TOPOGRAFIA E MORFOLOGIA</b>		<b>2.3.01</b>
<i>Topografia e morfologia della zona in cui è situato l'impianto.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Valli. Pianure.</i>	<i>Colline. Morfologia del territorio</i>	
<b>EVOLUZIONE E CARATTERISTICHE DEL SUOLO E DELLE SEDIMENTAZIONI</b>		<b>2.3.02</b>
<i>Caratteristiche e evoluzioni del suolo e delle sedimentazioni della zona attorno all'impianto.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Sviluppo del suolo e delle sedimentazioni. Conversione del suolo.</i>		
<b>CARATTERISTICHE IDROLOGICHE SUPERFICIALI</b>		<b>2.3.03</b>
<i>Caratteristiche idrogeologiche superficiali delle zone vicine all'impianto.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Falde fratture descrizione. Idrologica della regione.</i>		
<b>LAGHI, FIUMI , CORSI D ACQUA</b>		<b>2.3.04</b>
<i>La presenza di vari bacini idrici va studiata dettagliatamente, in quanto i suddetti bacini possono rivelarsi facili vie di contaminazione.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Descrizione. Posizione rispetto al deposito.</i>		
<b>CARATTERISTICHE COSTIERE</b>		<b>2.3.05</b>
<i>Caratteristiche costiere della zona dove è posto il sito.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Cambiamenti di T. Cambiamenti climatici. Maree. Erosione salina.</i>	<i>Tsunami. Tempeste. Eventi rari.</i>	<i>Intrusione salina. Intrusione. Erosione.</i>
<b>CARATTERISTICHE MARINE</b>		<b>2.3.06</b>
<i>Caratteristiche marine nelle vicinanze dell'impianto.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Correnti. Venti. Moti ondosi.</i>	<i>Erosione. Trasporto di sedimenti.</i>	

<b>ATMOSFERA</b>		<b>2.3.07</b>
<i>Feps relative alle caratteristiche atmosferiche e alla loro possibile evoluzione.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Caratteristiche. Trasporto di materiale volatile. Trasporto di aerosol . Reazioni chimiche.</i>		
<b>FLORA</b>		<b>2.3.08</b>
<i>Caratteristiche della vegetazione terrestre e acquatica.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Descrizione della flora. Cambiamenti chimici causati dalla flora.</i>		
<b>FAUNA</b>		<b>2.3.09</b>
<i>Caratteristiche della fauna terrestre e acquatica.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Dieta animale. Contaminanti esterni Popolazione.</i>		
<b>METEOROLOGIA</b>		<b>2.3.10</b>
<i>Feps relative alla meteorologia nelle vicinanze dell'impianto.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Precipitazioni. Temperatura. Ciclo dell'acqua.</i>	<i>Uragani. Fluttuazioni climatiche. Tempeste.</i>	
<b>REGIME E EQUILIBRIO IDROLOGICO</b>		<b>2.3.11</b>
<i>Feps relative al regime geologico.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Infiltrazioni. Evaporazione. Flussi mare/fiumi.</i>	<i>Cambiamenti nei corsi d'acqua. Flussi nei corsi d'acqua.</i>	
<b>EROSIONE</b>		<b>2.3.12</b>
<i>Feps relative alle possibili erosioni della zona tra il deposito e la superficie</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Erosione causata dal vento. Erosione causata dall'acqua. Depositi salini.</i>	<i>Erosione umana. Erosione della copertura del deposito.</i>	

<b>SISTEMA ECOLOGICO/BIOLOGICO/ MICROBIOLOGICO</b>		<b>2.3.13</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Caratteristiche.</i>		
<i>Cambiamenti chimici.</i>		
<b>INTRUSIONE DI ANIMALI O PIANTE</b>		<b>2.3.14</b>
<b>COMPORAMENTO UMANO</b>		<b>2.4</b>
<i>Caratteristiche e comportamento di gruppi critici non includendo azioni tali da influenzare la sicurezza del deposito</i>		
<b>CARATTERISTICHE UMANE METABOLICHE E FISILOGICHE</b>		<b>2.4.01</b>
<i>Le suddette caratteristiche devono essere conosciute per svolgere un "safety assessment" completo e dettagliato.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Descrizione</i>		
<b>VARIAZIONI D'ETÀ</b>		<b>2.4.02</b>
<i>Caratteristiche umane che variano con la crescita</i>		
<b>DIETA</b>		<b>2.4.03</b>
<i>Descrizione del regime alimentare.</i>		
<b>ALTRE ABITUDINI</b>		<b>2.4.04</b>
<i>Abitudini umane non legate all'alimentazione.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Uso dell'acqua.</i>	<i>Filtrazione dell'aria.</i>	
<i>Pesca caccia allevamento.</i>	<i>Ventilazione.</i>	
<b>CARATTERISTICHE DELLA COMUNITÀ</b>		<b>2.4.05</b>
<i>Stile di vita di gruppi critici.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Descrizione della società.</i>		
<i>Cambiamenti demografici.</i>		

<b>PREPARAZIONE DI CIBI E ACQUA</b>		<b>2.4.06</b>
<i>Feps relative ai vari processi che interessano il cibo.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Filtraggio dell'acqua.</i>		
<i>Processi alimentari.</i>		
<b>ABITAZIONI</b>		<b>2.4.07</b>
<i>Feps relative alle caratteristiche (sia di tipo ingegneristico che geologico) delle abitazioni.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Materiali usati.</i>	<i>Location.</i>	
<i>Caratteristiche meccaniche.</i>		
<b>USO DELLE ACQUE E DEGLI SPAZI NATURALI E SELVAGGI</b>		<b>2.4.08</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Ambiente naturale e seminaturale.</i>		
<b>ATTIVITÀ RURALI, DI PESCA E USO DEL TERRITORIO</b>		<b>2.4.09</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Uso del territorio.</i>		
<i>Pesca.</i>		
<i>Fertilizzanti.</i>		
<i>Sitologia.</i>		
<b>SPAZI URBANI E INDUSTRIALI E RELATIVO USO DELL' ACQUA</b>		<b>2.4.10</b>
<i>Sviluppo urbano, trasporti e effetti sul sistema idrologico e sulle possibili vie di contaminazione</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Lavori riguardanti le acque.</i>	<i>Ambiente.</i>	
<i>Estrazione.</i>	<i>Desalinizzazione.</i>	
<i>Costruzione.</i>	<i>Irrigazione.</i>	
<b>TEMPO LIBERO E ALTRI USI DELL AMBIENTE</b>		<b>2.4.11</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Varie attività ricreative.</i>		

<b>FATTORI CONTAMINANTI /RADIONUCLIDI</b>	<b>3</b>
<i>Feps che influenzano il rilascio, il flusso e la migrazione di radionuclidi dal deposito alla biosfera.</i>	
<b>CARATTERISTICHE DELLE SPECIE RADIOTOSSICHE E CHIMICOTOSSICHE</b>	<b>3.1</b>
<i>Caratteristiche che devono essere studiate in una valutazione di sicurezza.</i>	
<b>DECADIMENTO RADIOATTIVO</b>	<b>3.1.01</b>
<i>Uno dei punti cardine del "safety assessment" è sicuramente la conoscenza e la previsione dell' andamento delle attività dei prodotti radioattivi all'interno del deposito.</i>	
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>	
<i>Nei modelli di valutazione della sicurezza post-chiusura, le catene di decadimento radioattivo sono spesso semplificate, ad esempio, trascurando i radionuclidi a vita più breve nei calcoli di trasporto.</i>	
<b>STABILITA' CHIMICA DELLE SPECIE CHIMICO-TOSSICHE</b>	<b>3.1.02</b>
<b>SOLIDI/SOLUTI INORGANICI</b>	<b>3.1.03</b>
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>	
<i>Contenuto.</i>	
<b>SPECIE VOLATILI</b>	<b>3.1.04</b>
<i>Caratteristiche delle specie radiotossiche e chimicotossiche volatili o potenzialmente volatili</i>	
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>	
<i>Alcuni radionuclidi possono essere isotopi di elementi gassosi (ad esempio isotopi del Kr) oppure possono formare composti volatili</i>	<i>I radionuclidi di specie volatili o possono derivare da reazioni chimiche o biochimiche.</i>
	<i>Corrosione dei metalli che producono gas idrogeno e la degradazione microbica di materiale organico che produce metano e anidride carbonica.</i>
<b>POSSIBILI SPECIE ORGANICHE</b>	<b>3.1.05</b>
<i>Specie contenute nei rifiuti che possono formare composti organici</i>	
<b>GAS NOBILI</b>	<b>3.1.06</b>
<i>Possibile presenza di gas nobili. Radon and Th sono casi speciali vd. FEP 3.3.08.</i>	
<b>FATTORI DI RILASCIO/CONTAMINAZIONE</b>	<b>3.2</b>
<i>Processi chiave nel possibile rilascio in biosfera di radionuclidi</i>	

<b>DISSOLUZIONE, PRECIPITAZIONE E CRISTALLIZZAZIONE DI SPECIE RADIOTOSSICHE</b>		<b>3.2.01</b>
<p><i>La dissoluzione è il processo mediante il quale i costituenti di un solido si sciolgono in una soluzione. Precipitazione e cristallizzazione sono processi attraverso i quali si formano i solidi fuori dai liquidi. La precipitazione si verifica quando le specie chimiche in soluzione reagiscono per produrre un solido che non rimane in soluzione. La cristallizzazione è il processo di produzione di cristalli puri di un elemento, di molecole o di minerali da un liquido o da una soluzione a causa di un processo di raffreddamento.</i></p>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<p><i>Reazioni chimiche provocate dalla dissoluzione e precipitazione dei radionuclidi</i></p>	<p><i>Causate da interazioni chimica del materiale della copertura con acqua interstiziale. Causate da interazioni chimica con l'acqua di riempimento dei pori.</i></p>	<p><i>Causate da interazione chimica dei rifiuti non radioattivi con i rifiuti radioattivi. Causate da un cambiamento di temperatura.</i></p>

<b>SOLUBILITÀ E FORMAZIONE DI NUOVE SPECIE CHIMICHE</b>		<b>3.2.02</b>
<p><i>La solubilità di una sostanza in soluzione acquosa è l'espressione del grado in cui si dissolve. Fattori quali la temperatura e la pressione influenzano la solubilità, così come le condizioni di pH e redox. Questi fattori influenzano la forma chimica e la speciazione della sostanza. Così specie diverse di uno stesso elemento possono avere diverse solubilità in una soluzione particolare. La speciazione delle acque sotterranee e la solubilità sono fattori molto importanti che riguardano il comportamento e il trasporto di radionuclidi</i></p>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<p><i>Cambiamenti della solubilità con la T.</i></p>	<p><i>Cambiamenti degli equilibri delle specie a causa della P.</i></p>	<p><i>Cambiamento della solubilità causato da interazione chimica tra rifiuti e acqua interstiziale</i></p>

<b>ASSORBIMENTO/DESORBIMENTO DELLE SPECIE TOSSICHE CON UNA MATRICE SOLIDA</b>		<b>3.2.03</b>
<p><i>L'assorbimento descrive l'interazione fisico-chimica di una specie capace di sciogliersi in una fase solida. Il desorbimento è l'effetto opposto. I processi di assorbimento sono molto importanti per determinare il trasporto di radionuclidi nelle acque sotterranee. La capacità di assorbimento è spesso descritto da una semplice costante (Kd), che rappresenta il rapporto tra le concentrazioni dei radionuclidi e della fase solida in quella soluzione. Questo presuppone che il livello di assorbimento è reversibile, raggiunge l'equilibrio rapidamente, è indipendente dalle variazioni chimiche o mineralogiche dell'acqua lungo il percorso del flusso, il rapporto solido-acqua, o le concentrazioni delle altre specie. Approcci più sofisticati implicano l'uso delle isoterme di assorbimento</i></p>		

<b>INTERAZIONE E TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN FASE COLLOIDALE</b>		<b>3.2.04</b>
<p><i>I colloidi sono particelle di dimensioni nanometriche o di micrometri, che possono costituire sospensioni stabili in una fase liquida. Fasi metastabili in solido sono instabili termodinamicamente ma possono, a causa della cinetica molto lenta della loro alterazione, trasformarsi in prodotti più stabili. I colloidi sono presenti nelle acque sotterranee e possono essere prodotti anche durante la degradazione dei rifiuti o materiali artificiali. I colloidi possono influenzare il trasporto di radionuclidi in una varietà di modi: ritardando il trasporto per assorbimento di specie acquose di radionuclidi con successiva filtrazione, o migliorando il trasporto per assorbimento e trasporto con il flusso delle acque sotterranee</i></p>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<p><i>Formazioni colloidali dovute a interazioni tra i rifiuti e acqua.</i></p>	<p><i>Formazioni colloidali dovute a interazioni tra rifiuti non radioattivi e radioattivi.</i></p>	<p><i>Trasporto di colloidi.</i></p>



<b>EFFETTI SU TRASPORTO E FORMAZIONE DI CONTAMINANTI PER AGENTI CHIMICI/COMPLESSI</b>	<b>3.2.05</b>
---	---------------

*Questo FEP si riferisce ad agenti chimici che sono presenti nel sistema di contenimento e gli effetti che essi possono avere sul rilascio e sulla migrazione dei radionuclidi dall'ambiente del deposito. Gli agenti chimici possono essere presenti nei rifiuti o nei materiali introdotti nel deposito, ad esempio da spandimenti durante la sua costruzione e l'esercizio, ad esempio olio, fluidi idraulici, solventi organici. Gli agenti chimici possono essere utilizzati durante la costruzione e il funzionamento, ad esempio, nei fluidi di perforazione, come additivi di cementi e malte, ecc*

**CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI**

<i>Interazioni chimiche di vario genere.</i>	<i>Cause microbiologiche.</i>	
--	-------------------------------	--

<b>MODIFICHE DELLA SPECIAZIONE DOVUTE A CAUSE BIOLOGICHE, MICROBIOLOGICHE</b>	<b>3.2.06</b>
---	---------------

*FEP relativi alla modifica di speciazione o di cambiamento di fase a causa di microbiche/ biologiche. L'attività microbica può agevolare trasformazioni chimiche di vario genere.*

<b>TRASPORTO DI CONTAMINANTI MEDIANTE ACQUA</b>	<b>3.2.07</b>
---	---------------

*L' acqua è senza dubbio una delle più probabili vie di contaminazione e rilascio di radionuclidi nell'ambiente. Il trasporto acqua-mediato di radionuclidi include tutti i processi che portano al trasporto di radionuclidi in acqua. I Radionuclidi possono viaggiare in acqua come soluti (compresi i gas disciolti), associati a colloidali (v. FEP 3.2.04) o, se le condizioni di flusso lo consentono, con le più grandi particelle / sedimenti.*

**CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI**

<i>Porosità delle barriere ingegneristiche. Trasporto colloidale. Diffusione molecolare. Fratture. Solubilità.</i>	<i>Processi di trasporto multifase. Trasporto verso le acque di superficie. Infiltrazioni.</i>	
--	--	--

<b>TRASPORTO DI CONTAMINANTI TRAMITE SOLIDI</b>	<b>3.2.08</b>
---	---------------

*Feps relative al possibile trasporto di contaminanti per via solida.*

**CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI**

<i>Falle. Trasporto tramite movimento di solidi/fluidi.</i>	<i>Rilascio di materiale solido. Pioggia.</i>	<i>Movimenti su larga scala di sedimenti.</i>
---	---	---

<b>TRASPORTO DI CONTAMINANTI MEDIANTE GAS</b>	<b>3.2.09</b>
---	---------------

*Gas radioattivo può essere generato dai rifiuti, ad esempio, biossido di carbonio C14 o metano. Aerosol o particelle radioattive possono essere trasportati con gas non radioattivi, o gas possono espellere le acque sotterranee contaminate.*

**CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI**

<i>Fasi: gas, vapore, particolato. Rilascio di gas. Diffusione.</i>	<i>Trasporto di aerosol. Trasporto nei gas atmosferici. Sovrapressioni.</i>	
---	---	--

<b>TRASPORTO DEI CONTAMINANTI NELL'ATMOSFERA</b>	<b>3.2.10</b>
<i>Feps relative al possibile trasporto di contaminanti in atmosfera.</i>	
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>	
<i>Trasporto di aerosol dovuto al vento e alle onde.</i>	
<b>TRASPORTO DI CONTAMINANTI DOVUTO AD ANIMALI, PIANTE, MICROBI</b>	<b>3.2.11</b>
<i>Feps relative al trasporto di contaminanti causato da animali o piante.</i>	
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>	
<i>Intrusioni varie.</i>	
<i>Trasporto tramite flora/fauna.</i>	
<b>TRASPORTO DI CONTAMINANTI DOVUTO A AZIONI UMANE</b>	<b>3.2.12</b>
<i>L'azione umana del trasporto di contaminanti comprende i processi come la perforazione o lo scavo della zona interessata dal deposito, il dragaggio dei sedimenti contaminati provenienti da laghi, fiumi ed estuari e della loro immissione sul terreno. Lavori di sterro e la costruzione di dighe possono comportare la movimentazione del materiale solido da una parte della biosfera a un altro. I risultati di una aratura con la miscelazione dello strato superiore del terreno agricolo con quello inferiore vicino al deposito.</i>	
<b>POSSIBILE CONTAMINAZIONE DEGLI ALIMENTI</b>	<b>3.2.13</b>
<i>Le piante possono essere contaminate o come conseguenza di deposizione diretta di radionuclidi sulle loro superfici o indirettamente, a seguito di assorbimento di suolo o di acqua contaminati attraverso le radici. Gli animali possono essere contaminati da radionuclidi a seguito di ingestione di vegetali contaminati, o direttamente come risultato di ingestione di terreni contaminati, dei sedimenti e delle fonti di acqua, o attraverso l'inalazione di particelle contaminate (aerosol o gas).</i>	
<b>FATTORI ESPOSITIVI</b>	<b>3.3</b>
<b>CONCENTRAZIONI DI CONTAMINANTI NELL' ACQUA, NEI CIBI, E NELLE DROGHE</b>	<b>3.3.01</b>
<i>La concentrazione dei contaminanti nei suddetti generi di consumo va studiata per sapere il livello di rischio a cui è esposto l'uomo.</i>	
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>	
<i>Trasporto di radionuclidi nella flora.</i>	<i>Trasporto di radionuclidi nella fauna.</i>
<b>CONCENTRAZIONE DI CONTAMINANTI NELL' AMBIENTE</b>	<b>3.3.02</b>
<i>La comparazione tra concentrazioni di radionuclidi dovute a fattori artificiali e naturali può fornire nuovi criteri di studio meno dipendenti dal fattore umano.</i>	
<b>CONCENTRAZIONE DI CONTAMINANTI NEI PRODOTTI NON INGERIBILI</b>	<b>3.3.03</b>
<i>I contaminanti possono essere concentrati in prodotti non alimentari a cui gli esseri umani sono esposti. Per esempio, materiali da costruzione, fibre naturali o pelli di animali utilizzati in abbigliamento, e l'uso della torba come combustibile.</i>	

<b>MODI D'ESPOSIZIONE</b>		<b>3.3.04</b>
<i>Feps relative a tutte le possibili modalità d' esposizione ai radionuclidi.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Radiazioni dirette. Assorbimento cutaneo. Immersione in acque contaminate.</i>	<i>Inalazione e ingestione di materia contaminata. Esposizione tramite acqua e sedimenti.</i>	

<b>DOSIMETRIA</b>		<b>3.3.05</b>
<i>La dosimetria comporta la stima della dose di radiazioni su singoli organi, tessuti, o su tutto il corpo, a seguito di esposizione a radionuclidi. La dose di radiazioni. Dipende da: la forma di esposizione ( ingestione o inalazione di radionuclidi determinano l'esposizione interna o contiguità a concentrazioni di radionuclidi), il metabolismo dei radioelementi e la forma fisico-chimica se inalato o ingerito (determina la misura in cui il radionuclide può essere assunto e mantenuto nei tessuti del corpo) e l'energia e il tipo di emissioni radioattive dei radionuclidi che interesserà la distribuzione di energia all'interno dei tessuti o del corpo.</i>		

<b>EFFETTI DELLE RADIAZIONI</b>		<b>3.3.06</b>
<i>Gli effetti della radiazione sono classificati come somatici (si manifestano nei singoli esposti), genetici (si manifestano nella prole dell'individuo esposto), stocastici (la probabilità dell'effetto è una funzione della dose ricevuta), non-stocastici (la gravità delle conseguenze è una funzione della dose ricevuta e nessun effetto può essere osservato sotto una determinata soglia)</i>		

<b>EFFETTI DELLE SPECIE CHIMICO-TOSSICHE</b>		<b>3.3.07</b>
<i>Effetti che le specie chimico-tossiche possono avere sull'uomo e sull'ambiente.</i>		

<b>ESPOSIZIONI AL RADON E AI PRODOTTI DEL RADON</b>		<b>3.3.08</b>
<i>Il Radon e l'esposizione ai prodotti del Radon sono considerati separatamente dalle esposizioni di altri radionuclidi perché il comportamento del radon e dei suoi prodotti, e la modalità di esposizione, sono diversi rispetto ad altri radionuclidi.</i>		
<b>CONCETTI CHIAVE, ESEMPI, FEPs CORRELATI</b>		
<i>Il Radon Rn-222 è il prodotto diretto del Radio (Ra-226). E' un gas nobile con una emivita di circa 4 giorni e decade attraverso una serie radionuclidi, con emivite di 27 minuti o meno, fino ad un isotopo del Piombo (Pb-210) con una emivita di 21 anni.</i>	<i>La modalità principale di esposizione è l'inalazione dei prodotti del Radon che si attaccano alle particelle di polvere e che possono depositarsi nel sistema respiratorio.</i>	

PROG.	TIPO EVENTO	EVENTO			CAUSA	CONSEGUENZE	NOTE
		ID	Sub Case	Descrizione			
<b>S III-1</b>	Eventi interni d'area	2.1	01	Incendio area di stoccaggio	Incendio di materiale combustibile addizionale introdotto nel deposito	Rilascio di radioattività nella biosfera associato alla combustione di materiale combustibile confezionato all'interno di contenitori metallici	Da valutare
<b>S III-2</b>	Eventi interni d'area	2.1	03	Incendio filtro HEPA	Gusto all'alimentazione elettrica dei motori dei ventilatori	Rilascio nella biosfera della radioattività eventualmente accumulata sui filtri	Vedi M III-3
<b>S III-3</b>	Eventi interni d'area	2.4	01	Rottura filtro HEPA	Missile generato dalla rottura del ventilatore	Rilascio nella biosfera della radioattività eventualmente accumulata sui filtri	Vedi M III-4
<b>S III-4</b>	Eventi funzionali e di processo	3.3	03	Incendio area di stoccaggio	Danno al carrello elevatore	Rilascio di radioattività nella biosfera	Vedi M III-5
<b>S III-5</b>	Eventi funzionali e di processo	3.3	05	Caduta colli	Errore umano durante movimentazione colli con carrello elevatore nell'area di stoccaggio	Rilascio di radioattività nella biosfera	Da valutare
<b>S III-6</b>	Perdita sistemi d'Impianto	4.1	06	Perdita sistema di ventilazione per rottura filtri HEPA	Sfondamento per sovrappressione	Rilascio nella biosfera della radioattività eventualmente accumulata sui filtri	Vedi M III-4
<b>S III-7</b>	Perdita sistemi d'Impianto	4.2	01	Perdita totale sistema antincendio			Tale evento è presupposto alla base di tutte le valutazioni di impatto associate ai casi di incendio di cui ai punti precedenti della presente tabella

**Tabella A5 - Eventi di Categoria III per il Nodo “Stoccaggio Manufatti”**

