

Titolo

Progetto particolareggiato di un prototipo di sistema integrato di caratterizzazione radiologica non distruttiva

Descrittori

Tipologia del documento: **Rapporto Tecnico**
 Collocazione contrattuale: **Accordo di Programma ENEA-MSE**
 Argomenti trattati: **Trattamento e stoccaggio dei rifiuti nucleari**

Sommario

Il documento descrive le funzioni e le tecniche di misura implementate in un Sistema Integrato prototipale progettato per la caratterizzazione radiologica non distruttiva di manufatti contenenti rifiuti radioattivi e per la loro corretta discriminazione fra II e III Categoria secondo la G.T. 26.

Note

Autori: N. Cherubini, A. Compagno, A. Dodaro, L. Silvi (ENEA)


Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP4 Task B dell'AdP ENEA-MSE.

Tema: B.4. "Progetto particolareggiato di un prototipo di sistema integrato di caratterizzazione radiologica non distruttiva"

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	23.9.2010	NOME	A. DODARO	A. LUCE	S. MONNI
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NFISS – LP4 – 013	0	L	2	13

<i>PREMESSA</i>	3
<i>1. Generalità sul prototipo</i>	4
<i>2. Sistema Tomografico</i>	5
2.1. Principi del metodo	5
2.2. Ricostruzione delle immagini.....	7
2.3. Scelta dei rivelatori.....	7
<i>3. Sistema Neutronico</i>	9
3.1. Principi del metodo	9
3.2. Elementi di progetto	9
3.3. Tecnica Add-a-Source.....	9
<i>4. Limiti di rivelazione</i>	10
<i>5. Procedura di misura</i>	10
<i>6. Movimentazioni e lay-out del sistema</i>	11
<i>7. Budget necessario e tempistica prevista</i>	12
<i>Ringraziamenti</i>	13
<i>Bibliografia</i>	13

PREMESSA

La Caratterizzazione dei Rifiuti Radioattivi è uno degli elementi fondamentali della gestione dei rifiuti stessi, sia per la determinazione dell'inventario radiologico sia per le relative valutazioni di sicurezza durante le fasi di trasporto ed immagazzinamento, nonché per la determinazione di metodi di trattamento e condizionamento e per il miglioramento della qualità dei controlli durante le suddette operazioni.

Non bisogna dimenticare, inoltre, che la caratterizzazione risulta fondamentale nella corretta attribuzione di un rifiuto ad una delle categorie previste dalla Guida Tecnica 26, che con tecniche non distruttive può risultare molto complicato per diverse tipologie di rifiuti (in particolare quelli debolmente alfa contaminati).

Per quanto riguarda le tecniche di misura gamma, quasi tutti gli strumenti presenti nel panorama europeo hanno limiti di attività di pochi kBq, quindi, assumendo matrici di contenimento di massa superiore ad 1 kg e fatte salve alcune considerazioni relative alla "reliability" delle misure gamma, tali limiti di rivelazione permetterebbero anche il rilascio incondizionato.

Discorso diverso per le tecniche neutroniche, dove i limiti di rivelazione sono molto più alti rispetto alle tecniche gamma: da 2 a 20 mg di $^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ per le tecniche neutroniche passive, e da 0.5 a 5 mg di $^{239}\text{Pu}_{\text{eff}}$ per le tecniche neutroniche attive.

In Tabella 1 sono riportati i range di Minima Concentrazione di Attività Rivelabile (MDAC) raggiungibili dai sistemi di misura commerciali, relative ai singoli isotopi del plutonio ed all'uranio, considerati come se ciascun isotopo fosse l'unico presente in un rifiuto. Gli estremi dei range sono stati calcolati a partire dai dati assoluti dichiarati dai produttori ed assumendo matrici omogenee con un range di massa pari a 25 (Low Density) e 400 kg (High Density).

Tabella 1: Concentrazione di Minima Attività Rivelabile effettiva

Isotopo	MDAC (Bq/g)	
	LD (25 kg)	HD (400 kg)
^{238}Pu	$1.3 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^5$
^{239}Pu	$5.5 \cdot 10^2$	$8.6 \cdot 10^1$
^{240}Pu	$4.4 \cdot 10^2$	$4.2 \cdot 10^3$
^{242}Pu	4.5	$4.3 \cdot 10^1$
^{235}U	$3.2 \cdot 10^{-2}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$

I valori si riferiscono al singolo radioisotopo ma, in realtà, all'interno di un manufatto sono presenti tutti gli isotopi del plutonio, e considerando le composizioni isotopiche più comuni utilizzate dai laboratori afferenti al ciclo del combustibile, le Minime Concentrazioni di Attività Rivelabili relative al plutonio totale risultano oscillare nell'intervallo 1500-15000 Bq/g, cioè ben al di sopra di quanto richiesto per la

distinzione fra rifiuto di II e III categoria della GT26: ciò avrebbe come conseguenza il fatto che tutti gli esercenti che hanno rifiuti potenzialmente contaminati da plutonio, sarebbero impossibilitati a inviare tali rifiuti al deposito superficiale non potendo dimostrare la loro appartenenza alla II Categoria.

I valori di Tabella 1, inoltre, mostrano che, mentre l'interrogazione neutronica attiva (determinazione del quantitativo di materiale fissile) consente limiti di rivelazione sufficientemente bassi, ciò non è sempre vero per le tecniche neutroniche passive (determinazione del quantitativo di materiale fertile) che quindi costituiscono l'anello debole di una corretta caratterizzazione.

In tali casi è necessario, quindi, ricorrere a tecniche distruttive, eventualmente integrate da metodologie di correlazione isotopica, con gli ovvi svantaggi (tempi di analisi molto lunghi, produzione di rifiuti secondari, necessità di ricondizionamento, maggiori dosi e rischi per gli operatori, maggiori costi, etc.).

Risulta quindi indispensabile avviare dei robusti programmi di ricerca e sviluppo per la realizzazione di macchine che facciano uso di tecniche non distruttive e che abbiano valori di MDAC molto più bassi.

L'obiettivo del presente lavoro è la progettazione di un sistema di misura prototipale, che abbia limiti di rivelazione sufficientemente bassi e che permetta la quantificazione della massa di fissile, della massa di fertile nonché il contenuto totale di attinidi in contenitori di rifiuti radioattivi da 200 e 400 litri, per la caratterizzazione completa del manufatto con tecniche non distruttive e per la corretta discriminazione dei rifiuti di II e III Categoria.

1. GENERALITÀ SUL PROTOTIPO

Per raggiungere le minime attività rivelabili necessarie per discriminare i rifiuti fra II e III categoria, il sistema dovrà integrare tre tecniche di misura all'avanguardia (interrogazione neutronica attiva tramite fissione indotta, interrogazione gamma attiva tramite fotofissione, tomografia gamma) in modo da ottenere la completa caratterizzazione radiologica dei manufatti.

I risultati di ciascuna tecnica di caratterizzazione vengono raccolti e combinati per fornire una corretta e completa caratterizzazione del manufatto.

Il sistema è stato progettato per lavorare in continuo con un sistema di nastri trasportatori che possano spostare agevolmente il campione per l'analisi con l'una o con l'altra tecnica in sequenza per un tempo di misura stabilito a priori che, data la concezione del sistema, risulterà relativamente breve (si prevede da un minimo di circa un'ora a un massimo di 3 ore per fusto).

Il sistema integrato di caratterizzazione è stato concepito per essere trasportabile o mobile: il sistema di misura, con tutti i suoi accessori, potrà essere alloggiato su un "camion" al fine di spostarsi agevolmente per rispondere alle esigenze di qualsivoglia committente e con l'obiettivo di eseguire le misure "in loco", evitando, così, i numerosi problemi relativi al trasporto di materiali nucleari.

2. SISTEMA TOMOGRAFICO

2.1. PRINCIPI DEL METODO

La tomografia in trasmissione, che sfrutta l'assorbimento della radiazione che attraversa un corpo, serve per capire la morfologia all'interno dello stesso corpo.

La tomografia in emissione utilizza l'osservazione di un evento o di eventi che avvengono all'interno di un corpo, per capire cosa succede all'interno (es P.E.T) o delle caratteristiche intrinseche attive del corpo (es. determinazione dell'attività contenuta). È chiaro che la misura di questi eventi è sensibile alla morfologia del corpo stesso, perciò spesso la tomografia in emissione è preceduta dalla tomografia in trasmissione.

La ricostruzione di immagini avviene tramite l'elaborazione di misure (proiezioni) di una grandezza fisica di riferimento. In questo caso la grandezza di riferimento è il coefficiente lineare di attenuazione per i raggi γ stimato tramite l'attenuazione del flusso di fotoni che attraversano un corpo:

$$\Phi_1 = \Phi_0 e^{-\mu x}$$

dove Φ_0 è il flusso fotoni iniziale, non attenuato, Φ_1 è il flusso di fotoni attenuato dopo aver attraversato uno spessore x di un materiale incognito e μ è il coefficiente lineare di attenuazione generalmente espresso in cm^{-1} .

Il μ dipende dal materiale e dall'energia dei fotoni, perciò utilizzando un fascio di fotoni monocromatico, conoscendo lo spessore x e misurando l'attenuazione Φ_1/Φ_0 , si determina il μ del materiale attraversato dal fascio di fotoni con la seguente relazione:

$$\mu = -\log_e (\Phi_1 / \Phi_0) / x$$

Chiaramente la stima del μ dipende anche dalla buona geometria del sistema (collimazione) e dall'entità monocromatica del fascio (spread energetico).

Per proiezioni si intendono delle misure (o viste) a strisce parallele o a ventaglio fatte per diversi angoli di una sezione (figura 1).

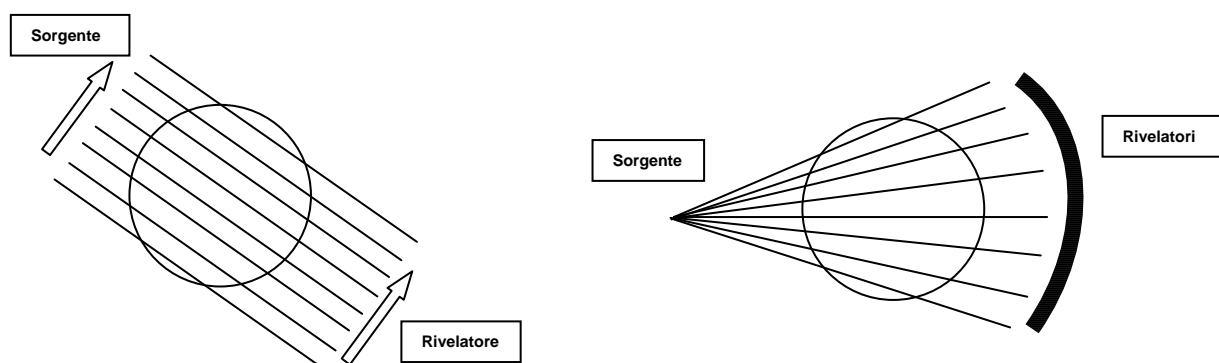


Figura 1 - Tecniche tomografiche single pencil beam e cone beam

Nella tecnica “single pencil beam” si utilizza una sorgente ed un rivelatore e si effettuano un certo numero di traslazioni assiali (\mathbf{a}) e verticali (\mathbf{v}), al termine delle quali il fusto ruota di un angolo β (quindi ci sono $360/\beta$ rotazioni): in totale si hanno \mathbf{n} ($\mathbf{n} = \mathbf{a} \times \mathbf{v} \times \beta$) misure in trasmissione ed altrettante in emissione; generalmente è opportuno avere almeno 10 traslazioni assiali e verticali e 20 rotazioni per un totale di 4000 misure fra trasmissione ed emissione. Il numero di misure può essere ridotto sensibilmente utilizzando una schiera di sorgenti ed una schiera di rivelatori (opportunamente collimati, in modo da rivelare ciascuno solo la radiazione incollisa proveniente dalla sorgente corrispondente) in modo da evitare le traslazioni assiali, (nell'esempio di prima, quindi, le misure diventerebbero 400).

Nella tecnica “cone beam”, si usa una sola sorgente ed una scacchiera di rivelatori: tale configurazione permette di eliminare completamente le traslazioni assiali e verticali, limitando il numero di misure alle sole rotazioni.

Data la necessità di effettuare misure nel minor tempo possibile, e la possibilità di utilizzare come sorgente di trasmissione il linac (**linear accelerator**) necessario per il sistema neutronico, per il prototipo è stato selezionato il sistema tomografico “cone beam”.

Lo schema della procedura tomografica per determinare la quantità di radioattività in un fusto è riportato in figura 2.

Si possono distinguere tre fasi, la prima è la misura in trasmissione e l'elaborazione dei dati per determinare la distribuzione dei coefficienti di attenuazione lineare. La seconda fase è la costruzione della matrice delle efficienze, che combinando i dati della matrice delle efficienze in aria con la distribuzione dei coefficienti lineari nel fusto, riesce a determinare la matrice delle efficienze nel fusto. La terza fase è la tomografia in emissione che come risultato finale darà la distribuzione dell'attività nel fusto e di conseguenza una stima dell'attività totale.

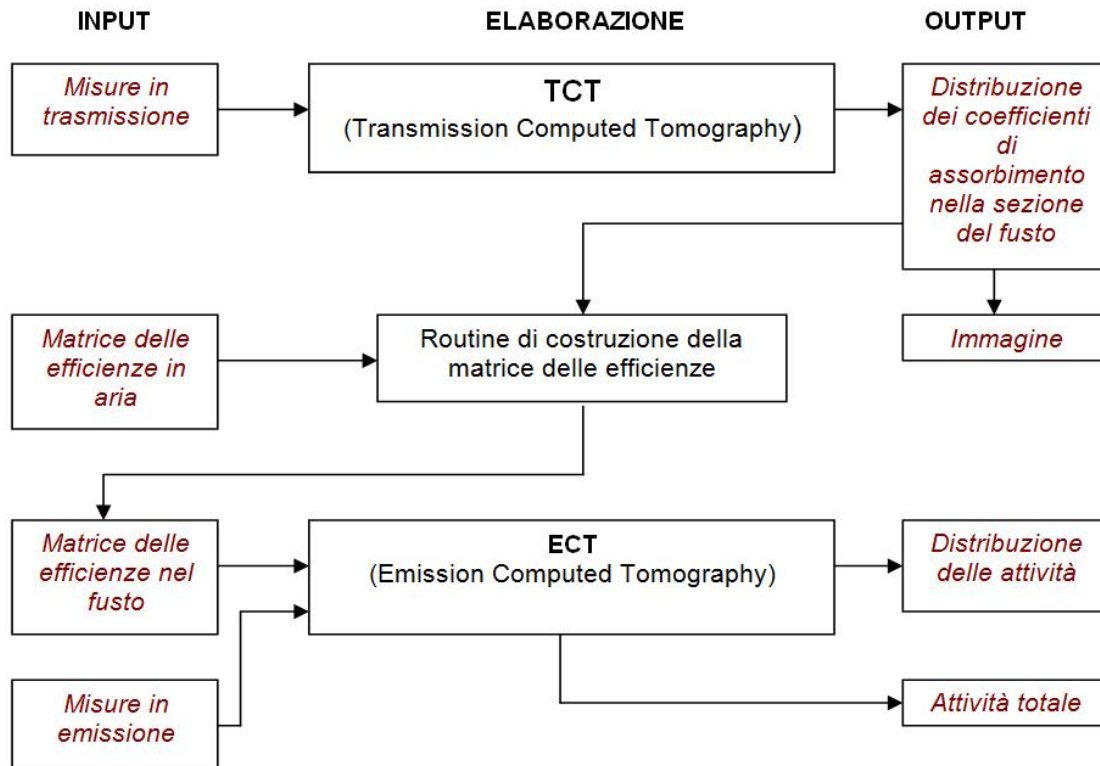


Figura 2 - Schema della procedura tomografica

2.2. RICOSTRUZIONE DELLE IMMAGINI

La tomografia in trasmissione (TCT) fonda il proprio funzionamento su risultati matematici che assicurano la possibilità di ricostruire un'immagine a partire dalle sue proiezioni su una superficie.

La tecnica delle backprojections, basata sul Teorema di Radon, filtrata tramite algoritmi di convoluzione, garantisce l'ottenimento di una mappatura priva di artifacts, cioè immagini relative ad oggetti non effettivamente presenti nel volume da ricostruire. Per verificare l'affidabilità degli algoritmi sono state effettuate alcune simulazioni Montecarlo che riproducevano situazioni reali, dimostrando che il metodo, inizialmente pensato ed utilizzato per la tecnica single pencil beam, ben si adatta alla variante cone beam.

Per quanto riguarda la tomografia in emissione (ECT) gli algoritmi ipotizzati sono quelli della Best Likelihood Maximisation (o Massima Verosimiglianza), anche qui filtrata con algoritmi di convoluzione. In questo caso le simulazioni sono state mirate non solo alla verifica dell'affidabilità della ricostruzione, ma anche ai tempi di misura ottimali per avere basse Minime Attività Rivelabili.

2.3. SCELTA DEI RIVELATORI

La scelta di utilizzare la tecnica cone beam, impone la progettazione di una matrice di rivelatori necessariamente di piccole dimensioni e che possano lavorare a temperatura ambiente.

Sono state studiate le caratteristiche di varie tipologie di cristalli: Bromuro di Lantanio (LaBr_3), Ioduro di Sodio (NaI), Ortoalluminato di Ittrio e Lutezio (Lu(Y)AP) e Germanato di Bismuto (BGO), per verificare quale possa essere il miglior compromesso costi/benefici.

Dal punto di vista dell'efficienza di rivelazione, i migliori risultano essere gli scintillatori NaI , ma rapportando l'efficienza alla risoluzione energetica (fondamentale per le misure in emissione) risulta che il miglior compromesso è costituito dai LaBr_3 .

Fermo restando che saranno necessarie delle prove in laboratorio, per il momento la scelta per il prototipo ricade su questi ultimi, in particolare su cristalli da 1' di spessore.

Riguardo alla matrice di rivelatori, le simulazioni preliminari hanno mostrato che una configurazione con 12 file da 11 rivelatori ciascuna garantisce un buon compromesso fra la durata della misura e la minima attività rivelabile. La matrice ipotizzata ha forma di settore di guscio cilindrico concentrico al fusto da caratterizzare.

È in corso di studio la possibilità di ridurre il numero di rivelatori modificando la collimazione degli stessi.

3. SISTEMA NEUTRONICO

Per la descrizione dettagliata della parte neutronica del sistema, si rimanda al documento NFISS-LP4-011 (codice di archiviazione ENEA del documento CIRTEN: "CERSE-UNIROMA1 RL 1158/2010", cfr. rif. bibliografico. 7), mentre in questa sede ci si limita a pochi cenni.

3.1. PRINCIPI DEL METODO

La Tecnica di Interrogazione Neutronica può essere utilizzata per determinare la quantità di materiale fissile presente entro un contenitore di rifiuti radioattivi. I componenti fondamentali di un sistema di interrogazione neutronica sono:

- acceleratore lineare di elettroni (linac);
- target per la produzione di fotoni da bremsstrahlung;
- target per la produzione di fotoneutroni;
- moderatore per la termalizzazione dei neutroni;
- rivelatori ad ^3He per la rivelazione dei neutroni veloci dovuti a reazioni di fissione indotta su isotopi fissili, presenti nel waste, quali ^{235}U o ^{239}Pu .

La sorgente di neutroni, quindi, è realizzata mediante un fascio di elettroni accelerati da un linac che investe un bersaglio ad alto numero atomico producendo fotoni di bremsstrahlung i quali, a loro volta, producono neutroni interagendo con i nuclei di un target appropriato. Il set "acceleratore di elettroni + target di bremsstrahlung + target (γ, n)" genera un flusso di neutroni veloci.

La Tecnica di Interrogazione Gamma consiste nell'irraggiare materiale radioattivo con fasci fotonici di alta energia in modo da produrre reazioni di fotofissione sugli elementi transuranici presenti nel suddetto materiale.

La misura è basata sulla rivelazione di neutroni di fotofissione pronti o ritardati per stabilire la quantità di materiale "fotofissile" presente.

3.2. ELEMENTI DI PROGETTO

Di seguito vengono riportate le caratteristiche principali del sistema proposto dal CIRTEN e ritenuto ottimale ai fini del progetto:

- cavità di rivelazione: blocchi di polietilene ad alta densità appositamente forati per alloggiare i rivelatori di neutroni e disposti a formare un decagono;
- rivelatori di neutroni: tubi He^3 da 2.54 cm di diametro e 104 cm di lunghezza, con pressione interna pari a 4 bar;
- acceleratore: linac da 15 MeV, corrente 140 mA, frequenza 50 Hz, lunghezza impulso 2.5 ms;
- target per la produzione delle particelle "interroganti" il fusto: tungsteno (raggi X) accoppiato a berillio (fotoneutroni).

3.3. TECNICA ADD-A-SOURCE

Una frazione dei neutroni emessi spontaneamente o a seguito di fissioni e fotofissioni indotte nell'interrogazione neutronica e gamma, viene assorbita dalla matrice di

contenimento, con conseguente perdita delle informazioni necessarie per una corretta determinazione del contenuto di materiale fissile e fertile presente nel fusto da caratterizzare.

Per recuperare in parte tale informazione, cioè stimare l'autoassorbimento del fusto, si ricorre ad una misura preventiva con una sorgente di neutroni di intensità nota: il rapporto fra il rateo di neutroni rivelati con e senza fusto, permette infatti di ricavare l'autoassorbimento e di correggere i risultati delle misure effettive di interrogazione.

I risultati delle simulazioni Montecarlo effettuate hanno mostrato che è sufficiente una sorgente (α,n), del tipo Am-Be, caratterizzata da una intensità di emissione neutronica pari a 10^5 n/s.

4. LIMITI DI RIVELAZIONE

Come premesso, è noto che, per quanto riguarda la tomografia, i limiti di rivelazione dei sistemi attualmente reperibili in commercio sono soddisfacenti per la caratterizzazione radiologica dei rifiuti radioattivi e per la loro corretta attribuzione alle tre categorie della G.T. 26. Anche nel caso della parte tomografica del prototipo qui descritto, i limiti di rivelazione risulteranno inferiori al Bq/g anche con matrici pesanti come i fusti contenenti rifiuti cementati, con una incertezza di misura che, nei casi peggiori, raggiunge il 20%. All'affidabilità dei risultati si affianca la ragionevolezza dei tempi di misura: la scelta del cone beam permette, infatti, tempi decisamente ridotti rispetto ai tomografi "classici"; a titolo di esempio, una tomografia completa fatta con il tomografo presente presso il C.R. Casaccia, con lo stesso grado di accuratezza ed affidabilità di quella qui descritta (che richiede al massimo poco più di un'ora e mezza), richiede circa 24 ore.

Per quanto riguarda i limiti di rivelazione dei materiali fissili e fertili, lo studio proposto dal CIRTEN mostra che il prototipo sarebbe caratterizzato da valori di minima concentrazione di attività leggermente inferiori ai sistemi commerciali relativamente al materiale fissile (interrogazione neutronica), mentre sul materiale fertile il limite verrebbe abbassato di circa un ordine di grandezza rispetto alle tecniche neutroniche passive.

Tornando all'esempio della premessa, ciò significa passare dai 1500-15000 Bq/g dei sistemi commerciali a 200-2000 Bq/g, cioè un range di valori che soddisfano i requisiti della seconda categoria della G.T. 26 anche nei casi più complicati.

5. PROCEDURA DI MISURA

La procedura di misura ipotizzata prevede la seguente sequenza di operazioni:

- a. inserimento della sorgente (α,n) nell'apposito alloggiamento davanti al target e misura del rateo di neutroni rivelati con cavità vuota;
- b. estrazione della sorgente (α,n);
- c. misura neutronica passiva;
- d. inserimento della matrice di rivelatori gamma nella cavità di rivelazione;
- e. misura del fondo gamma;

- f. inserimento del fusto nella cavità di rivelazione;
- g. accensione dell'acceleratore con accoppiato il solo target di tungsteno ed effettuazione delle misure di trasmissione con step angolare fisso (ad es. 20 gradi) ed acquisizione degli **n** spettri gamma da 5 secondi l'uno (più che sufficienti vista l'intensità della sorgente);
- h. esclusione dell'acceleratore ed effettuazione delle misure in emissione con step angolare fisso (uguale a quello scelto per la trasmissione) ed acquisizione degli **m** spettri gamma da un minimo di 100 a un massimo di 300 secondi l'uno (la scelta deve essere effettuata in base alla densità della matrice e all'attività che si suppone sia presente);
- i. estrazione della matrice di rivelatori gamma dalla cavità di rivelazione;
- j. accensione dell'acceleratore con accoppiato il solo target di tungsteno ed effettuazione della misura di interrogazione gamma (da 20 a 40 minuti a seconda della densità della matrice), con il fusto in rotazione continua, per la determinazione del materiale fertile;
- k. aggiunta del target di berillio ed effettuazione della misura di interrogazione neutronica, con il fusto in rotazione continua (da 20 a 40 minuti a seconda della densità della matrice), per la determinazione del materiale fissile.

La durata complessiva della caratterizzazione di un fusto standard può variare da un minimo di 1 h e 30 minuti a un massimo di 3 h e 30 minuti a seconda della densità della matrice in cui è dispersa l'attività ed ai livelli di attività contenuta nel fusto.

6. MOVIMENTAZIONI E LAY-OUT DEL SISTEMA.

Il prototipo è stato ideato con l'obiettivo della massima compattezza, per permetterne la trasportabilità, pur cercando di mantenere alta l'efficienza di rivelazione, per ottenere limiti di rivelazione adeguati e tempi di misura ragionevoli. Per questi motivi sono stati ipotizzate le seguenti caratteristiche:

- la cavità di rivelazione è stata progettata a forma di decagono (con i due lati anteriori mancanti) con cerniere in ogni spigolo e motori asserviti ai singoli lati per permettere l'alloggiamento di fusti da 200 e 400 litri (potendo aumentare l'angolo fra lati consecutivi nel caso di fusti da 400 litri o ridurlo nel caso di fusti da 200);
- per evitare la movimentazione dell'acceleratore, si è pensato di inserire la matrice dei rivelatori alle spalle del fusto, permettendone però l'estrazione quando si effettuano le misure neutroniche, di qui la necessità di rendere scorrevole la parte superiore della cavità (cfr. fig. 3; questa operazione può essere evitata poggiando la matrice di rivelatori su una guida circolare che, al termine delle misure gamma, la porti nella zona di apertura della cavità e quindi permetta la sua estrazione laterale, cfr. fig. 4);
- il fusto poggia su una tavola rotante dotata di motori passo passo che permettano sia rotazioni continue che a step angolari, e di celle di carico per la pesata del campione;
- sia la sorgente (α, n) che i target vengono movimentati per mezzo di un sistema pneumatico che al termine dell'uso li riporta nella posizione di riposo

- (opportunamente schermata) sotto il piano di appoggio;
- per quanto riguarda l'inserimento del fusto, si può scegliere fra la soluzione dall'alto o laterale.

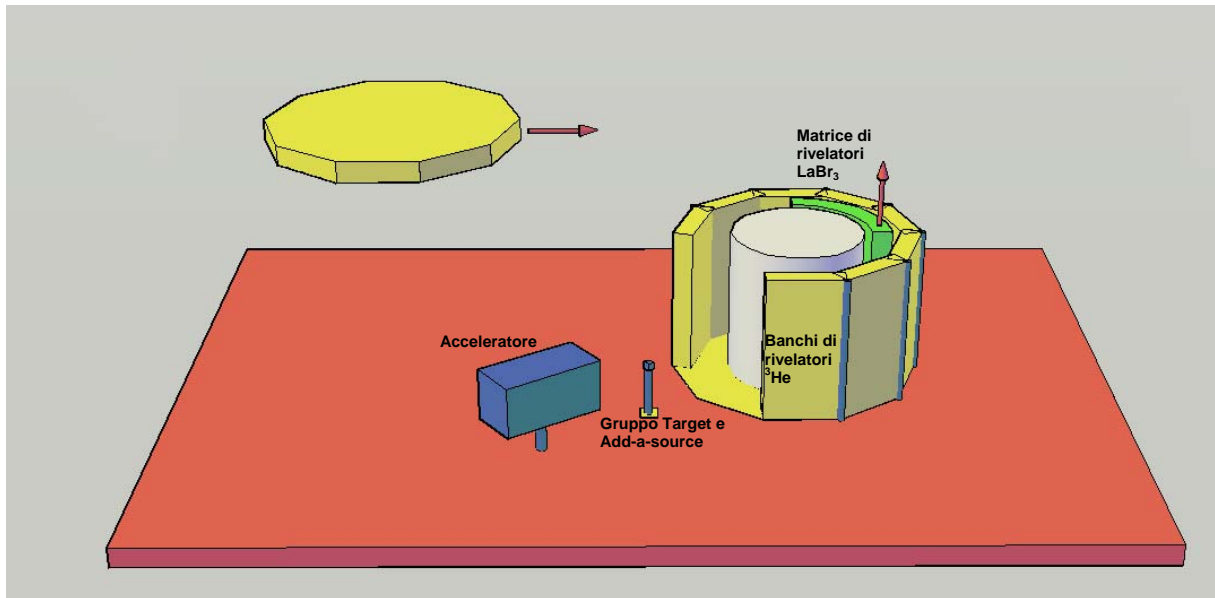


Figura 3 - Lay-out del sistema con carico/scarico dall'alto

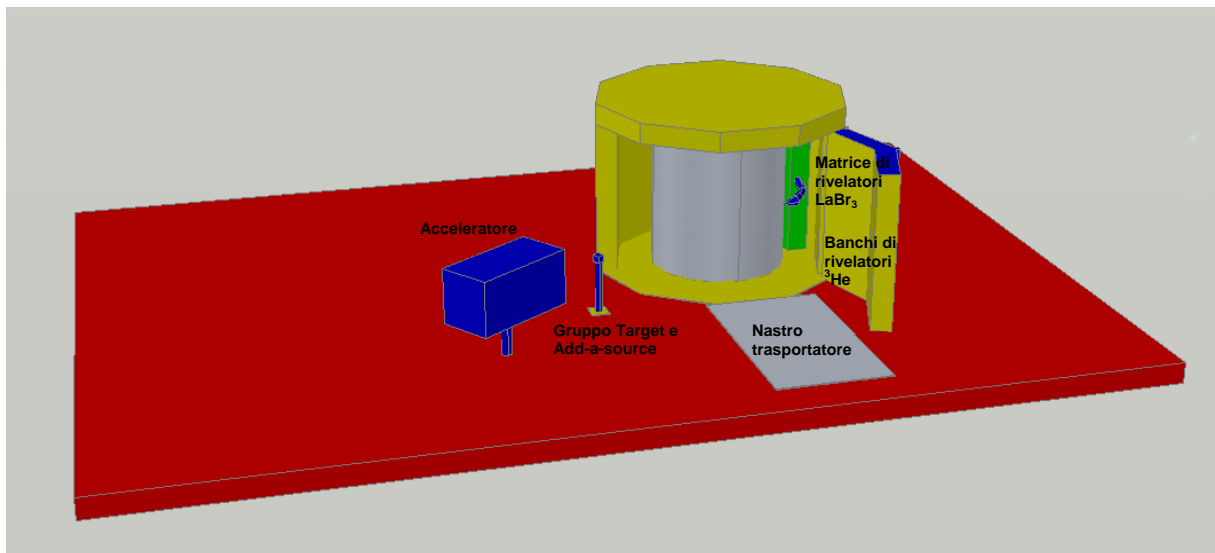


Figura 4 - Lay-out del sistema con carico/scarico laterale

7. BUDGET NECESSARIO E TEMPISTICA PREVISTA

Nella fase attuale non è possibile definire con sufficiente accuratezza il budget e i tempi necessari per la realizzazione del prototipo. Una valutazione di massima, tra iter autorizzativo dell'acceleratore, ulteriori studi in laboratorio e dotazioni strumentali, prevede una spesa di circa 2.5 milioni Euro ed una tempistica di 2 anni.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NFISS – LP4 – 013	0	L	13	13

RINGRAZIAMENTI

Ringraziamenti sono rivolti ai colleghi del CIRTEN e del Gruppo di Lavoro dell'Accordo di Programma ENEA – MSE, LP4, e in particolare al Responsabile Ing. Alfredo Luce, per la disponibilità alla discussione e al confronto.

BIBLIOGRAFIA

1. Guida Tecnica 26 ENEA – DISP
2. FPN-LP4-003 “Attività relative alla Caratterizzazione dei Rifiuti Radioattivi da Conferire al Sito di Smaltimento e di Deposito” ENEA, 2008
3. L. A. Feldkamp, L. C. Davis, and J. W. Kress: “Practical cone-beam algorithm”, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 1, Iss. 6 — Jun. 1, 1984
4. H. O. Menlove, et al.: "WDAS Operation Manual Including the Add-A-Source Function", Los Alamos National Laboratory Report, LA-12292-M - April 1992
5. IAEA, SAFETY STANDARD SERIES, Draft Safety Guide No. DS 390, “Classification of Radioactive Waste”, Vienna, Novembre 2006
6. IAEA-TECDOC-1537, “Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization”, Vienna, Marzo 2007
7. R. Remetti, F. Manni, “CERSE-UNIROMA1 RL 1158/2010”, Pisa, Giugno 2010 (numero di archivio ENEA: NFISS-LP4-011)