

**Titolo**

**Definizione di una prova sperimentale da effettuarsi sull'impianto  
SPES2 della SIET di Piacenza**

**Descrittori**

**Tipologia del documento:** Rapporto tecnico

**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

**Argomenti trattati:** Reattori nucleari ad acqua, Reattori nucleari evolutivi, Analisi di sicurezza

**Sommario**

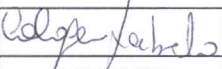


Il presente documento riferisce su attività svolte nel corso della terza annualità dell'AdP ENEA-MSE nell'ambito dell'obiettivo E (Sviluppo e validazione codici di calcolo) della Linea Progettuale 2. In particolare, l'attività di cui tratta il documento si colloca tra quelle propedeutiche al riutilizzo della facility integrale SPES-2 situata presso i laboratori SIET di Piacenza. Allo scopo di riproporre la facility nell'ambito di programmi internazionali per lo studio della sicurezza di reattori LWR evolutivi si intende effettuare una prova sperimentale su una tematica di interesse attuale. Il recupero del modello numerico della facility, la sua revisione ed il suo utilizzo per la simulazione di un transitorio incidentale di perdita di refrigerante di piccole dimensioni (SBLOCA) con lo scopo di investigare il fenomeno di "boron dilution" in condizioni di inventario di massa ridotto sono le varie fasi che hanno portato alla definizione della prova.

**Note**

Parte delle attività riportate nel presente rapporto è stata svolta dallo Studio Associato di Ingegneria BGS nell'ambito del contratto di servizio ENEA/2011/30169/UTFISSM

**Autori:** C. Lombardo\*, M. Polidori\*  
 (\*) Personale ENEA

**Copia n.**
**In carico a:**

|      |             |          |       |  |   |   |
|------|-------------|----------|-------|--|---|---|
| 2    |             |          | NOME  |  |   |   |
|      |             |          | FIRMA |  |   |   |
| 1    |             |          | NOME  |  |   |   |
|      |             |          | FIRMA |  |   |   |
| 0    | EMISSIONE   | 08/09/04 | NOME  | C. Lombardo  | P. Meloni   | P. Meloni   |
|      |             |          | FIRMA |  |  |  |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA     |       | REDAZIONE  | CONVALIDA   | APPROVAZIONE  |

## Indice

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduzione  | 3  |
| 2. Descrizione della facility SPES-2 in configurazione SPES-99 | 4  |
| 2.1 Sistema primario della facility SPES 99                    | 5  |
| 2.2 Sistema secondario della facility SPES 99                  | 13 |
| 2.3 Sistema di sicurezza della facility SPES 99                | 14 |
| 2.4 Sistema di misura della facility SPES 99                   | 15 |
| 3. Modello numerico della facility                             | 16 |
| 3.1 Codice di calcolo RELAP5/MOD3.3                            | 16 |
| 3.2 Nodalizzazione RELAP della facility SPES – 99              | 17 |
| 4. Presentazione dei risultati del transitorio simulato        | 21 |
| 5. Proposta di test sperimentale da condurre su SPES           | 26 |
| 6 Calcolo di pre-test eseguito sul test sperimentale proposto  | 30 |
| 6.1 Selezione delle condizioni iniziali e al contorno          | 30 |
| 6.2 Risultati del calcolo di pre-test                          | 35 |
| 7. Conclusioni   | 42 |
| 8.Riferimenti bibliografici                                    | 43 |

## 1. INTRODUZIONE

Nella gestione degli impianti nucleari gli aspetti di sicurezza sono stati oggetto di un crescente interesse in tutto il mondo, al fine di prevenire e mitigare le conseguenze di eventi indesiderati per gli impianti e di eventuali scenari incidentali. In particolare, l'importanza di predire il comportamento di un impianto nucleare ha fatto sì che, nell'ultimo quinquennio, molte delle attività di ricerca siano state finalizzate alla messa a punto di codici di sistema affidabili per le analisi di sicurezza degli impianti nucleari.

Tali codici di calcolo chiamati "best-estimate" necessitano di attività di validazione, queste ultime devono essere condotte sulla base del confronto con dati sperimentali provenienti da test effettuati su "facilities sperimentali".

Una di queste facilities sperimentali, denominata SPES-2, intorno alla fine degli anni 90 veniva annoverata tra quelle a rischio di chiusura e inserita come candidata per potenziali programmi di collaborazione internazionali [1]. Su tale facility, attualmente esistente in SIET, si è deciso di definire un programma di prove sperimentali i cui risultati potranno essere utilizzati per la validazione di codici termoidraulici.

In particolare, in vista della messa a punto di tale campagna, in ENEA si è deciso di riprendere gli studi condotti su SPES-2 verso la fine degli anni 90 raccogliendo quindi tutte le informazioni a disposizione che potessero essere utilizzati come punto di partenza per la nuova attività.

Il lavoro svolto in tale direzione ha permesso il recupero e la revisione di una vecchia nodalizzazione RELAP di SPES-2 che è stata utilizzata per la reinterpretazione di una prova di perdita di refrigerante di medie dimensioni (IBLOCA) condotta sulla facility nella configurazione denominata SPES-99.

Nel presente rapporto si riferisce quindi dell'attività svolta e si riportano i calcoli di pre-test che hanno consentito di definire un nuovo test sperimentale da condurre sulla facility per lanciare nell'ambito di un programma internazionale il suo futuro utilizzo.

Il test proposto, è un tipico incidente di perdita di refrigerante di piccole dimensioni (SBLOCA) con lo scopo di investigare il fenomeno di "boron dilution" in condizioni di inventario massa ridotto a causa della perdita dal circuito primario.

## 2. DESCRIZIONE DELLA FACILITY SPES-99

La facility SPES-99, il cui layout è presentato in Fig.1, deriva dall'impianto sperimentale SPES-2 [2] originariamente progettato e costruito per simulare nella maniera più accurata possibile il comportamento termoidraulico dell'AP600, isolandone i sistemi di sicurezza passiva. In particolare il sistema a due loop simula il sistema primario, il sistema secondario fino alle valvole d'isolamento delle linee del vapore ed il sistema di sicurezza passivo rappresentato dai soli accumulatori.

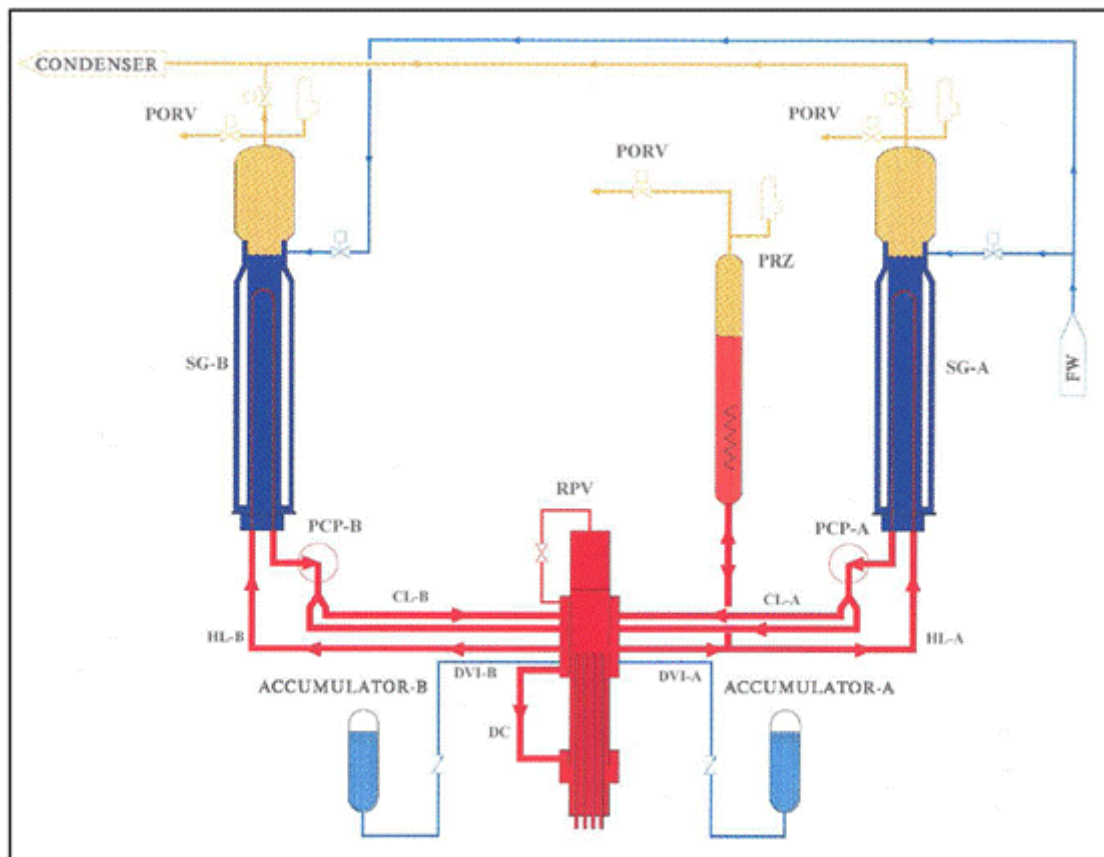


Fig. 1: Schema semplificato della facility SPES-99.

Ogni loop del circuito include una hot-leg e due cold-legs che si diramano da una singola pompa primaria di raffreddamento a mandata verticale. Il recipiente in pressione è composto dal lower plenum, dal riser, dove sono posizionate le barrette scaldanti, dall'upper head e dal downcomer. Quest'ultimo consiste di una sezione anulare, nella quale confluiscono le quattro cold-leg e le DVI, e da una tubazione esterna che connette la sezione anulare al lower plenum. Il canale di potenza consiste di un fascio di 97 barrette riscaldate elettricamente ed ha la stessa lunghezza scaldante e la stessa geometria (passo, diametro e lunghezza della barretta) dell'AP600. Il pressurizzatore consiste di un vessel cilindrico flangiato

equipaggiato con due riscaldatori interni e altri sei esterni. Esso è collegato alla hot-leg del loop A. La facility ha due generatori di vapore identici per trasferire la potenza termica dal circuito primario al secondario. Il lato primario del generatore di vapore consiste di un fascio tubiero formato da 13 tubi ad U di Inconel 600 assemblati in una matrice quadrata, saldati su una piastra tubiera ed equispaziati per mezzo di sette griglie. Sul lato secondario sono mantenute le elevazioni dell'AP600 fino alla sommità del separatore di vapore dove sono ubicati gli essiccatori.

Le caratteristiche principali dello SPES-99 sono riportate in Tab. 1.

|   |       |
|---|-------|
| Fluido di processo                          | acqua |
| Numero di loop                              | 2     |
| Numero di pompe                             | 2     |
| Pressione di progetto del primario [MPa]    | 20]   |
| Pressione di progetto del secondario [MPa]  | 20    |
| Temperatura di progetto del primario [°C]   | 365   |
| Temperatura di progetto del secondario [°C] | 310   |
| Potenza massima [MW]                        | 9     |
| Fattore di scala sull'altezza               | 1:1   |

Tab. 1: Principali caratteristiche della facility SPES-99.

## 2.1 Sistema primario della facility SPES 99

Il sistema primario è costituito dal vessel (pressure vessel PV) all'interno del quale si trovano le barrette riscaldate elettricamente (rod bundle), dal pressurizzatore, dalle pompe di circolazione, dai generatori di vapore a tubi a U e dalle tubazioni del circuito, A seguire forniamo una dettagliata descrizione dei componenti del sistema primario.

### Pressure Vessel

Il recipiente in pressione è diviso nelle seguenti parti:

- lower plenum: dalla quota più bassa del PV (-7.515 m) all'ingresso del downcomer (-6.168 m),
- riser (comprendente la zona attiva del fascio di barrette): dall'ingresso del downcomer (-6.168 m) alla estremità superiore delle barre, coincidente con la griglia di supporto delle barrette (-1.458 m),
- upper plenum (comprendente il downcomer anulare): dalla sommità della griglia di supporto delle barre di potenza (-1.458 m), alla estremità inferiore della griglia di supporto delle barre di controllo (0.925 m);

- upper head: dalla griglia di supporto delle barre di controllo (0.925 m) fino alla sommità del recipiente in pressione (2.779 m).

Il lower plenum contiene un dispositivo di chiusura per l'estremità inferiore del fascio di barrette che si prolungano all'esterno della parte bassa del recipiente in pressione.

Il riser è provvisto dell'ugello di uscita della portata di by-pass del core (non utilizzato in SPES-99) e dell'ugello di ingresso del tubo del downcomer tubolare. Il downcomer tubolare si innesta nel lower plenum attraverso una sezione di passaggio anulare al fine di approssimare al meglio le condizioni di ingresso reali nel riser dell'AP-600. La zona attiva del recipiente in pressione ha una sezione trasversale interna ottagonale ed è costruita assemblando undici sezioni flangiate; l'isolamento elettrico e la tenuta del fluido sono garantite da guarnizioni del tipo "klingerit 400". Le flange libere sono isolate termicamente per ridurre la perdita di calore dalle pareti del recipiente in pressione verso l'esterno.

Alla sommità della sezione del riser, fra le flange che connettono la zona attiva e l'upper plenum, si trova la griglia di supporto del fascio di barrette.

L'upper plenum contiene l'ugello di ingresso della portata di by-pass del canale di potenza (non usato nella configurazione SPES-99) e i due ugelli di uscita delle hot legs. Non è stata realizzata alcuna simulazione della guida o supporto delle barrette che si trova nell'upper plenum dell'AP-600.

Inoltre, è prevista la presenza di un downcomer anulare attorno alla regione esterna dell'upper plenum che si estende dalla quota di -0.823 m a 0.683 m e fornito di: quattro ugelli di ingresso per le cold legs (CL), due di uscita per le hot legs (HL), due di ingresso per le direct vessel injection DVI, uno di uscita della portata di by-pass DC-UH (downcomer upper-head) ed infine uno per la connessione al downcomer tubolare. Inoltre, nella sezione anulare sono state inserite otto alette geometriche per uguagliare la caduta di pressione circonferenziale dell'AP-600 e due deflettori divisionali al fine di simulare al meglio il percorso effettivo del fluido nel downcomer del reattore di riferimento.

Per finire, alle estremità superiori e inferiori dell'annulus, sono stati inseriti due anelli a forma di "C" per consentire l'espansione termica dell'annulus indipendente dal corpo del recipiente.

L'upper head si estende dalla parte inferiore della griglia forata fino alla estremità superiore del recipiente in pressione ed è dotato di un ugello di ingresso della portata di by-pass DC-UH.

### Rod Bundle

Il canale di potenza consiste in un fascio di 97 barrette riscaldate elettricamente ed ha la stessa lunghezza scaldata e la stessa geometria (passo, diametro e lunghezza della barretta) dell'AP-600. Il corretto posizionamento delle barrette è assicurato dalla presenza di griglie di stanziatrici equamente distribuite in direzione longitudinale, in particolare ne troviamo una nella parte superiore non riscaldata, sette sono distribuite lungo la parte attiva, e tre nella parte bassa non riscaldata. Il profilo di potenza assiale è uniforme per tutte le barrette, anche quello radiale è uniforme eccetto che per due elementi caldi simulati per mezzo di due barrette con un fattore di picco di 1.19. Novantasette barrette sono

strumentate con un totale di 52 termocoppie, collegate alla parete interna delle barrette, a differenti quote lungo la sua direzione longitudinale, tramite la tecnica di brasatura mediante riscaldamento ad induzione.

Le caratteristiche principali del core dell'impianto SPES-99 sono riassunte nella Tab . 2.

|  |                  |                  |
|--|------------------|------------------|
| NUMERO DI BARRE                              | Totale           | 97               |
|  | Standard         | 95               |
|  | Hot              | 2                |
| PRESSIONE E TEMPERATURA DI PROGETTO [MPa/°C] | Standard         | 20 / 450         |
|  |                  | 16 / 650         |
|  | Hot              | 20 / 500         |
|  |                  | 16 / 700         |
| DIAMETRO ESTERNO/INTERNO [mm]                | Standard         | 9.5 / 7.9        |
|  | Hot              | 9.5 / 7.9        |
| ALTEZZA [mm]                                 | Totale           | 6467             |
|  | Dentro al vessel | 6220             |
|  | Scaldato         | 3663             |
| POTENZA [kW]                                 | Nominale         | 4894             |
|  | Massima          | 9000             |
| MATERIALE BARRA                              | 0 - 130 mm       | Rame             |
|  | 130 - 2424 mm    | Acciaio AISI 316 |
|  | 2424 - 6087 mm   | INCONEL 600      |
|  | 6087 - 6467 mm   | NICHEL 200       |
| RETICOLO                                     | QUADRATO         |                  |
| PASSO  | 12 mm            |                  |
| GAP BARRA GUAINA                             | 2.8 mm           |                  |
| CORRENTE MASSIMA                             | 70 Ka            |                  |

Tab . 2: Caratteristiche principali del core dell'impianto SPES-99.

### Pressurizzatore

Il pressurizzatore ha il compito di mantenere, in condizioni di normale esercizio, la pressione del fluido primario ad un predeterminato valore; limitare le escursioni di pressione conseguenti all'espansione termica del fluido durante i transitori operazionali evitando che la pressione del fluido nel suddetto circuito superi previsti limiti di sicurezza. Esso è costituito da un recipiente cilindrico flangiato alle estremità, contenente delle resistenze elettriche, ognuna delle quali può sviluppare una potenza massima di 16 KW.

Le caratteristiche principali del pressurizzatore dell'impianto SPES-99 sono riassunte nella Tab .3.

|  |                            |       |
|--|----------------------------|-------|
| FLUIDO                                       | Acqua in condizioni sature |       |
| Volume occupato dal fluido [m <sup>3</sup> ] | 0.6                        |       |
| Livello nominale [m]                         | 3.78                       |       |
| PESO [kg]                                    | 800 kg                     |       |
| VOLUME [dm <sup>3</sup> ]                    | 95.4                       |       |
| ALTEZZA [m]                                  | 6.796                      |       |
| PRESSIONE[MPa]                               | Progetto                   | 20    |
|  | Nominale                   | 15.5  |
| TEMPERATURA[° C]                             | Progetto                   | 365   |
|  | Nominale                   | 354   |
| SET POINT PRESSIONE [MPa]                    | ADS 1                      | 16.2  |
|  | Safety valve               | 20    |
| SCALDATORI INTERNI                           | Numero                     | 3     |
|  | Massima potenza            | 16 kW |
|  | Switch off set             | 2 m   |
| SCALDATORI ESTERNI                           | Numero                     | 6     |
|  | Massima potenza            | 3.8kW |
|  | Efficienza                 | 77%   |
| DIAMETRI [mm]                                | Vessel                     | 134   |
|  | Bocchello surge line       | 33.98 |
|  | Linee connessione ADS 1-3  | 49.22 |
|  | Orifizio ADS 1             | 4.37  |

Tab . 3: Caratteristiche principali del pressurizzatore dell'impianto SPES-99.

Un tubo da 2" connette la parte alta del pressurizzatore con il primo dei tre stadi delle ADS. La surge line, costituita da tubi di 1 1/2", proveniente dalla hot leg del loop A si connette alla flangia inferiore del pressurizzatore. Le perdite di calore, subite dal fluido contenuto dentro al pressurizzatore, sono compensate per mezzo di sei riscaldatori esterni (ciascuno capace di sviluppare una potenza massima di 3.8 KW) installati sulla superficie esterna a diverse quote. Una valvola di sicurezza (settata per intervenire a 20 bar) ed una linea di scarico verso l'atmosfera sono installate alla sommità del recipiente.

### Pompe di circolazione del primario

Le pompe hanno lo scopo di garantire una circolazione del fluido primario che assicuri la refrigerazione del nocciolo nel rispetto delle condizioni e dei limiti previsti in sede di progetto. In ciascuno dei circuiti primari è collocata una pompa di circolazione, disposta sul ramo freddo, all'uscita dal generatore di vapore. Le pompe sono di tipo centrifugo a singolo stadio orizzontale. La linea di aspirazione è orizzontale mentre quella di mandata è diretta verso il basso, la portata elaborata dalla pompa è convogliata all'interno di un tubo da 3" attraverso il quale poi la stessa viene distribuita alle due cold legs. La velocità di rotazione può essere controllata in un intervallo di +/- 190% del valore nominale (con fluido in condizioni bifase) e la variazione di velocità può essere programmata.

Le pompe sono progettate per fornire valori corretti di prevalenza e portata in condizioni di normali operazioni e sono usate per stabilire le condizioni di piena potenza simili a quella dell'AP-600. Le caratteristiche principali delle pompe utilizzate nell'impianto SPES-99 sono riassunte nella Tab. 4.

|                     |                          |                         |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| PRESSIONE [MPa]     | Progetto                 | 20                      |
| TEMPERATURA [°C]    | Progetto                 | 365                     |
| CONDIZIONI NOMINALI | Pressione di aspirazione | 15.3 MPa                |
|                     | Temperatura              | 276 °C                  |
|                     | Portata elaborata        | 12.6 kg·s <sup>-1</sup> |
|                     | Potenza                  | 20 kW                   |
|                     | Efficienza               | 52 %                    |
|                     | NPSHR                    | 2.6 m                   |
| PESO<br>[kg]        | Totale                   | 620                     |
|                     | Motore                   | 280                     |
|                     | Corpo                    | 1150                    |

|   |                          |                          |
|---|--------------------------|--------------------------|
| SISTEMI DI TENUTA                         | Fluido                   | Acqua                    |
|   | Portata                  | 0.083 kg·s <sup>-1</sup> |
|   | Pressione di aspirazione | 16.3 MPa                 |
| DP TENUTA [MPa]                           | Interna                  | 0.5                      |
|   | Intermedia               | 14.3                     |
|   | esterna                  | 1.5                      |
| INTERVALLO CONTROLLO<br>VELOCITA' [rad/s] | -628 / 628               |                          |
| POTENZA MASSIMA [kW]                      | 50                       |                          |
| VOLUME FLUIDO [dm <sup>3</sup> ]          | 4.3                      |                          |
| INERZIA TOTALE [kgm <sup>2</sup> ]        | 3.5                      |                          |

Tab .4: caratteristiche principali delle pompe del primario dell'impianto SPES-99.

### Generatore di vapore

Il generatore di vapore nel reattore rappresenta l'elemento di interfaccia tra l'isola nucleare e la parte convenzionale dell'impianto. Similmente all'AP600 l'impianto SPES-99 ha due generatori di vapore con tubi ad U identici che permettono il trasferimento della potenza termica dal circuito primario al secondario. I dati caratteristici dei generatori di vapore sono riportati nella Tab. 5.

Il lato primario del generatore di vapore consiste di un fascio tubiero formato da 13 tubi ad U di Inconel 600 assemblati in una matrice quadrata, saldati su una piastra tubiera ed equispaziati per mezzo di sette griglie in modo da formare un pezzo unico, che mantiene il fascio centrato all'interno del recipiente e riduce l'area di passaggio del refrigerante secondario. Il materiale dei tubi e il diametro interno/esterno sono simili a quelli dell'AP-600 ma il numero e la lunghezza media dei tubi sono inferiori rispetto a quelle ideali con la conseguenza che la superficie di scambio di calore è più piccola rispetto a quella dell'AP-600 ( $S_{ideale} = 17.7 \text{ m}^2$ ,  $S_{SPES} = 11 \text{ m}^2$ ).

I dati caratteristici del fascio tubiero sono riportati nella Tab.6 .

|  |  |                |
|--|--|----------------|
| PRESSIONE DI PROGETTO [MPa]                  | 20                                     |                |
| TEMPERATURA DI PROGETTO [°C ]                | 365                                    |                |
| NUMERO TUBI AD U                             | 13                                     |                |
| LUNGHEZZA MEDIA TUBI AD U [m]                | 16.7                                   |                |
| SUPERFICIE SCAMBIO TERMICO [m <sup>2</sup> ] | 11.8                                   |                |
| ALTEZZA TOTALE [m]                           | 15.59                                  |                |
| VOLUME FLUIDO SECONDARIO [m <sup>3</sup> ]   | 388                                    |                |
| CONDIZIONI NOMINALI                          | PRESSIONE [MPa]                        | 4.9            |
|  | PORTATA DELLA FW [kg·s <sup>-1</sup> ] | 1.35           |
|  | TEMPERATURA DELLA FW [°C ]             | 226            |
|  | LIVELLO [m]                            | 12.8           |
|  | SET POINT RV [MPa]                     | 7.0            |
|  | SET POINT RV [MPa]                     | 10             |
|  | ORIFIZIO PORV                          | 5.2            |
| BOCCELLO DI [mm]                             | FW                                     | 38.1           |
|  | SL                                     | 73.7           |
|  | INLET-<br>OUTLET<br>PLENA              | 66.6           |
| MATERIALI                                    | TUBI                                   | ASTM-SA182F304 |
|  | LV                                     | ASTM-SA106GrB  |
|  | IV                                     | ASTM-SA204GrC  |
|  | UV                                     | ASTM-SAGrB     |

Tab . 5: Caratteristiche principali dei generatori di vapore dell'impianto SPES-99.

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| PRESSIONE DI PROGETTO [MPa]                                 | 20                                  |
| TEMPERATURA DI PROGETTO [°C]                                | 365                                 |
| NUMERO  | 13                                  |
| RETICOLO  | QUADRATO                            |
| PASSO [mm]  | 24.89                               |
| DIAMETRO INTERNO [mm]                                       | 15.44                               |
| DIAMETRO ESTERNO [mm]                                       | 17.46                               |
| ALTEZZA MEDIA [mm]  | 16742                               |
| ALTEZZA MEDIA ATTIVA[mm]                                    | 16564                               |
| LUNGHEZZA MEDIA RETTIFICATA [m]                             | 8210                                |
| *QUOTA MASSIMA DEL TUBO PIU' LUNGO [mm]                     | 8323                                |
| *QUOTA MASSIMA DEL TUBO PIU' CORTO [mm]                     | 8153                                |
| *ELEVAZIONE DELLE GRIGLIE [mm]                              | 1115, 2230,3345,4460,5575,6690,7805 |
| VOLUME PLENUM [dm <sup>3</sup> ]                            | 7.43                                |
| SUPERFICIE SCAMBIO TERMICO RIFERITA AL DI [m <sup>2</sup> ] | 10.43                               |
| SUPERFICIE SCAMBIO TERMICO RIFERITA AL DE [m <sup>2</sup> ] | 11.81                               |
| AREA PASSAGGIO DEL FLUIDO PRIMARIO [mm <sup>2</sup> ]       | 2428                                |
| AREA PASSAGGIO DEL FLUIDO SECONDARIO[mm <sup>2</sup> ]      | 12127                               |
| MATERIALE   | ASTM SB 163 Inconel 600             |

Tab . 6: Caratteristiche principali dei tubi dei generatori di vapore dell'impianto SPES-99.

Il fascio tubiero ha la seguente strumentazione:

- uno dei tubi è equipaggiato con tre prese di pressione necessarie per misurare la pressione del refrigerante primario e la caduta di pressione lungo il tubo a U;
- uno dei tubi è equipaggiato con cinque termocoppie annegate al suo interno, per effettuare misure di temperatura del fluido primario, e con cinque termocoppie brasate sulla parete esterna del tubo per misurare la temperatura del lato secondario.

### Tubazioni del circuito primario

Lo SPES-99 è un impianto a due loop così come il reattore AP-600. Ognuno dei due circuiti include le seguenti linee:

- hot leg: costituita da un tubo di 3" sch 80, che collega l'uscita del canale di potenza all'ingresso del generatore di vapore (Fig C1/C2);
- cold leg: costituita da un tubo comune verticale di 3" sch 160, che collega l'uscita della pompa di circolazione del fluido primario alle due linee da 2 ½" sch 160 che entrano nel downcomer- anulare del canale di potenza ;
- linea di aspirazione della pompa: questa linea è costituita da un tubo da 3" sch 160 in uscita del generatore di vapore e all'ingresso della pompa, nel tratto intermedio è costituito da un tubo di 8" sch 160;
- surge line: costituita da un tubo di 1 ½" sch 160 che connette il pressurizzatore con la hot leg A.

Le tubazioni del circuito primario sono in acciaio inox, mentre la componentistica dell'impianto che non è in contatto con il refrigerante primario è costruita in acciaio al carbonio.

## 2.2 Sistema secondario della facility SPES 99

Il sistema secondario dello SPES è stato messo a punto per simulare le caratteristiche fondamentali della rimozione di potenza nell'AP-600 e consiste dei seguenti componenti:

### Generatore di vapore

L'impianto SPES-2 ha due generatori identici che permettono il trasferimento della potenza termica dal circuito primario verso il secondario.

Il generatore di vapore consiste delle seguenti parti:

- Recipiente in pressione (pressure vessel);
- Fascio tubiero;
- Separatore di vapore;
- Essiccatori;
- Altri componenti interni.

Il recipiente o vessel è composto da:

- una sezione inferiore (lato primario): alla base di questa sezione sono alloggiati i bocchelli di ingresso e di uscita del fluido ;
- una sezione intermedia: di forma cilindrica contenente il fascio tubiero e due downcomer esterni. Il fascio tubiero, all'interno del quale fluisce il fluido primario, è stato descritto nel paragrafo precedente (lato primario). I due downcomer esterni, all'interno dei quali fluisce il fluido secondario proveniente dalle feed water (FW), connettono la shell superiore del

generatore di vapore con la parte inferiore del fascio di tubi; i downcomers sono costituiti da tubi consistono di tubi di 2" sch 160.

- una sezione superiore: di geometria cilindrica contenente i bocchelli di ingresso delle FW e quelli di uscita delle main steam line (MSL). Al suo interno sono alloggiati il separatore e l'essiccatore.

### Tubazioni del circuito secondario

Il sistema di tubazione secondario di SPES 99 è costruito in acciaio al carbonio ed è costituito da:

- due linee del vapore principali (MSL A,B): ciascuno di tali linee è equipaggiato con un tubo di Venturi, necessario per misurare la portata di vapore, una valvola di sicurezza del generatore, una valvola di relief del generatore di vapore (Power Operated Relief Valve e una valvola di isolamento della MSL;
- linea principale del vapore: equipaggiata con una valvola di controllo della pressione e una di isolamento che convoglia il vapore proveniente dalle MSL A e B e lo scarica verso il condensatore;
- due linee principali di alimentazione dell'acqua (MFW A-B). ciascuna equipaggiata con una valvola di controllo del flusso ed una valvola di isolamento;
- start-up feed water line (SFW A-B): equipaggiata con una valvola di isolamento, una valvola di controllo, una valvola di controllo del livello.

### 2.3 Sistema di sicurezza della facility SPES 99

La configurazione della facility è tale da essere caratterizzata dalla presenza di due accumulatori di geometria cilindrica e non sferica, come previsto nell'AP-600. Essi sono stati scalati preservando il volume di questi ultimi, considerando cioè un'altezza del cilindro con due calotte emisferiche. Il valore esatto del volume occupato dal gas e dal liquido è stato stabilito in modo da coincidere con gli stessi valori degli accumulatori dell'AP-600.

L'Azoto utilizzato nell'AP-600 per mettere in pressione gli accumulatori è stato sostituito con aria compressa.

Inoltre una barretta scaldante è stata posta all'interno del serbatoio per mantenere l'acqua ad una temperatura pari a quella nominale.

I dati riguardanti gli accumulatori sono mostrati in Tab. 7.

|                               |                   |     |
|-------------------------------|-------------------|-----|
| FLUIDO                        | NITROGENO - ACQUA |     |
| NUMERO                        | 2                 |     |
| PRESSIONE [MPa]               | PROGETTO          | 116 |
|                               | NOMINALE          | 4.3 |
| TEMPERATURA DI PROGETTO [°C ] | 350               |     |
| VOLUME [%]                    | 87                |     |
| ALTEZZA NOMINALE [m]          | 2.6               |     |
| DIAMETRO INTERNO [mm]         | 248               |     |
| ALTEZZA [mm]                  | 3043              |     |
| VOLUME [dm <sup>3</sup> ]     | 143               |     |
| MASSA [kg]                    | 330               |     |
| MATERIALI                     | ASTM a 312 TP 321 |     |

Tab .7: Caratteristiche principali degli accumulatori dell'impianto SPES-99.

## 2.4 Sistema di misura della facility SPES 99

Le grandezze termodinamiche misurate nell'impianto sperimentale SPES-99 sono del tipo dirette ( pressioni differenziali e assolute, temperature, corrente elettrica ....) e del tipo derivato ( densità, portata).

Al fine di misurare le quantità sopra menzionate sono state utilizzate diverse metodologie, in Tab. 8 vengono riportate nella prima colonna le grandezze misurate e nella seconda i tipi di strumenti utilizzati per effettuare tali misure.

| Quantità misurata       | Metodo utilizzato                        |
|-------------------------|--|
| Pressione               | Trasmittitori di pressione               |
| Pressione differenziale | Trasmittitori di pressione differenziali |
| Temperatura             | Termocoppie o termo-resistenze           |
| Livello collassato      | Trasmittitori di pressione differenziali |
| Densità                 | $\gamma$ densitometri                    |
| Portata                 | Tubo di venturi, orifizi                 |

Tab. 8: Tipologia di strumenti impiegati per le misure delle grandezze caratteristiche della facility SPES-99.

### 3. Modello numerico della facility

In tale capitolo viene presentato il modello numerico della facility SPES 99 ottenuto tramite l'impiego del codice di sistema termoidraulico RELAP5/MOD3.3 ed utilizzato per simulare un transitorio di perdita di refrigerante (IBLOCA).

#### 3.1 Codice di calcolo RELAP5/MOD3.3

Il RELAP5/MOD3 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) [3] è un codice di calcolo termoidraulico sviluppato per analisi di transitori nei reattori ad acqua leggera ed utilizzato per studi di licensing, per regolamentare l'esercizio di tali impianti e per la stesura delle linee guide che devono essere seguite dagli operatori d'impianto. Nello specifico tale codice viene applicato per la simulazione di transitori del tipo LOCA, ATWS (Anticipated Transient Without Scram) e operazionali (come ad esempio gli incidenti di perdita di alimentazione dei secondari dei generatori di vapore, trip delle turbine etc.) in impianti della filiera LWR. Il Relap è un codice che a parte a simulare il comportamento del reattore durante un transitorio, consente di descrivere il comportamento termoidraulico di una grande varietà di sistemi nucleari e non.

In particolare, questo codice è stato sviluppato da NRC in collaborazione con un consorzio di vari paesi membri dell'ICAP (International Code Assessment and Applications Program) prima e successivamente con i paesi che hanno preso parte all'accordo CAMP (Code Applications and Maintenance Program). Lo scopo del continuo sviluppo di tale codice è quello di ottenerne una versione affidabile da applicare per lo studio di un gran numero di transitori incidentali, tra cui sia large che small break LOCA, e operazionali. In RELAP i componenti idraulici grazie ai quali si può schematizzare un impianto, complesso quanto si vuole, comprendono PIPEs, ANNULUSs, PRIZERs, BRANCHs, PUMPs, ACCs, TURBs, VALVEs...

Lo scambio termico tra il fluido e le parete dei contenitori viene invece simulato tramite l'introduzione delle strutture termiche.

Il RELAP5/MOD3 usa un modello idrodinamico del tipo monodimensionale bifase monocomponente con la possibilità di tenere conto della eventuale presenza di n componenti gassosi non condensabili nella fase vapore o di un soluto non volatile nella fase liquida. Una ipotesi base del RELAP è quella di disequilibrio meccanico e termodinamico tra le fasi, ma esso permette anche di utilizzare modelli più semplici come quello omogeneo, dell'equilibrio termico e del moto senza attrito.

### 3.2 Nodalizzazione RELAP della facility SPES – 99

Come già accennato, il punto di partenza della seguente attività di ricerca è stato rappresentato da un input RELAP5/MOD3.2.2 $\beta$  della facility SPES-2.

Tale impianto sperimentale originariamente era stato progettato e costruito per simulare nella maniera più accurata possibile il comportamento termoidraulico dell'AP600, quindi nella nodalizzazione iniziale erano rappresentati tutti i sistemi di emergenza dell'AP 600 ed inoltre, proprio per tenere conto degli specifici fenomeni che venivano ad instaurarsi nella parte alta del canale scaldante, il down comer anulare era stato schematizzato con una serie di sottovolumi collegati tra loro da giunzioni multiple.

Per tenere conto del fatto che la facility di cui ci stiamo occupando è SPES – 99 (che deriva dalla SPES dopo averne intercettato tutti i sistemi di emergenza tranne gli accumulatori) si è deciso di eliminare nella nodalizzazione tutti questi sistemi e di sostituire la schematizzazione del down comer anulare con un unico elemento costituito da un annulus. Inoltre l'input di partenza è stato opportunamente modificato per potere essere processato con la versione più recente del codice: RELAP5/MOD3. La nodalizzazione così ottenuta utilizza 108 componenti idraulici di cui:

- 2 accumulatori,
- 1 annulus;
- 10 branch;
- 34 pipe;
- 2 pompe;
- 6 single volume;
- 2 separatori;
- 30 single junctions;
- 10 time dependent volumes;
- 2 time dependent junctions;
- 9 valves.

Inoltre all'interno dell'input sono presenti le strutture termiche, in numero pari ad 89, che permettono di simulare l'accoppiamento tra il primario ed il secondario dentro ai generatori di vapore, le perdite verso l'ambiente etc....

In Fig. 2 viene presentata la nodalizzazione Relap del circuito primario . In essa distinguiamo:

- Pipe 150 che rappresenta il canale di potenza;
- Annulus 126 che rappresenta il DownComer Anulare;
- Pipe 130 che rappresenta il DownComer Tubolare;
- Pipe 145 che rappresenta il Lower PLEnum
- Singol volume 160 che rappresenta il ByPass dell'upper head.
- Pipe 200 che rappresenta la hot leg A;
- Pipe 210 che rappresenta il plenum e i tubi ad U del generatore di vapore del loop A;

- Pipe 215 che rappresenta la cold leg in uscita dal generatore di vapore del loop A;
- Pompa 220 che rappresenta la Main Coolant Pump del loop A;
- Branch 225 che rappresenta lo sdoppiamento della cold leg del loop A;
- Pipe 230 che rappresenta la cold leg CLA1;
- Pipe 240 che rappresenta la cold leg CLA2;
- Pipe 350 che rappresenta la diramazione che dalla hot leg A si collega al PRZ;
- Pipe 360, branch 365 che rappresentano il PRZ;
- Pipe 370, valvola 390 e tmdpvol 399 che regolano la pressione nel PRZ durante lo stazionario.

In ingresso al downcomer anulare troviamo le giunzioni che provengono dalle 4 cold leg, due per ogni loop, e quelle che provengono dalle DVI, le linee di iniezione attraverso le quali gli accumulatori scaricano acqua in condizioni sotto raffreddate nel circuito primario.

In uscita dal canale di potenza, ritroviamo le due hot leg, una per ogni loop, e sulla hot leg del loop A si trova inserita la linea del pressurizzatore.

La Fig.3 rappresenta la nodalizzazione del secondario del generatore di vapore del loop A.

In essa troviamo rappresentati:

- Pipe 420 e 430 che rappresentano i due lati del setto del riser del lato secondario del generatore di vapore del loop A;
- Branch 4350 che rappresenta il raccordo tra il riser ed il pipe superiore;
- Pipe 440 che rappresenta l'elemento superiore al setto del riser;
- Pipe 450 che rappresenta il volume precedente al separatore di vapore del generatore di vapore;
- Elemento 460 che rappresenta il separatore del generatore di vapore;
- Branch 470 che rappresenta il raccordo tra il separatore e i due pipe che rappresentano i riser;
- Tmdpvol 400 che rappresenta l'alimentazione della feed water;
- Pipe 4920iche insieme alla valvola 493 e al sngvol 494 rappresenta la steam line;
- La valvola 495 che insieme al tmdpvol 496 rappresenta le valvole di PORV;
- La valvola 497 che insieme al tmdpvol 498 rappresenta le valvole di safety.

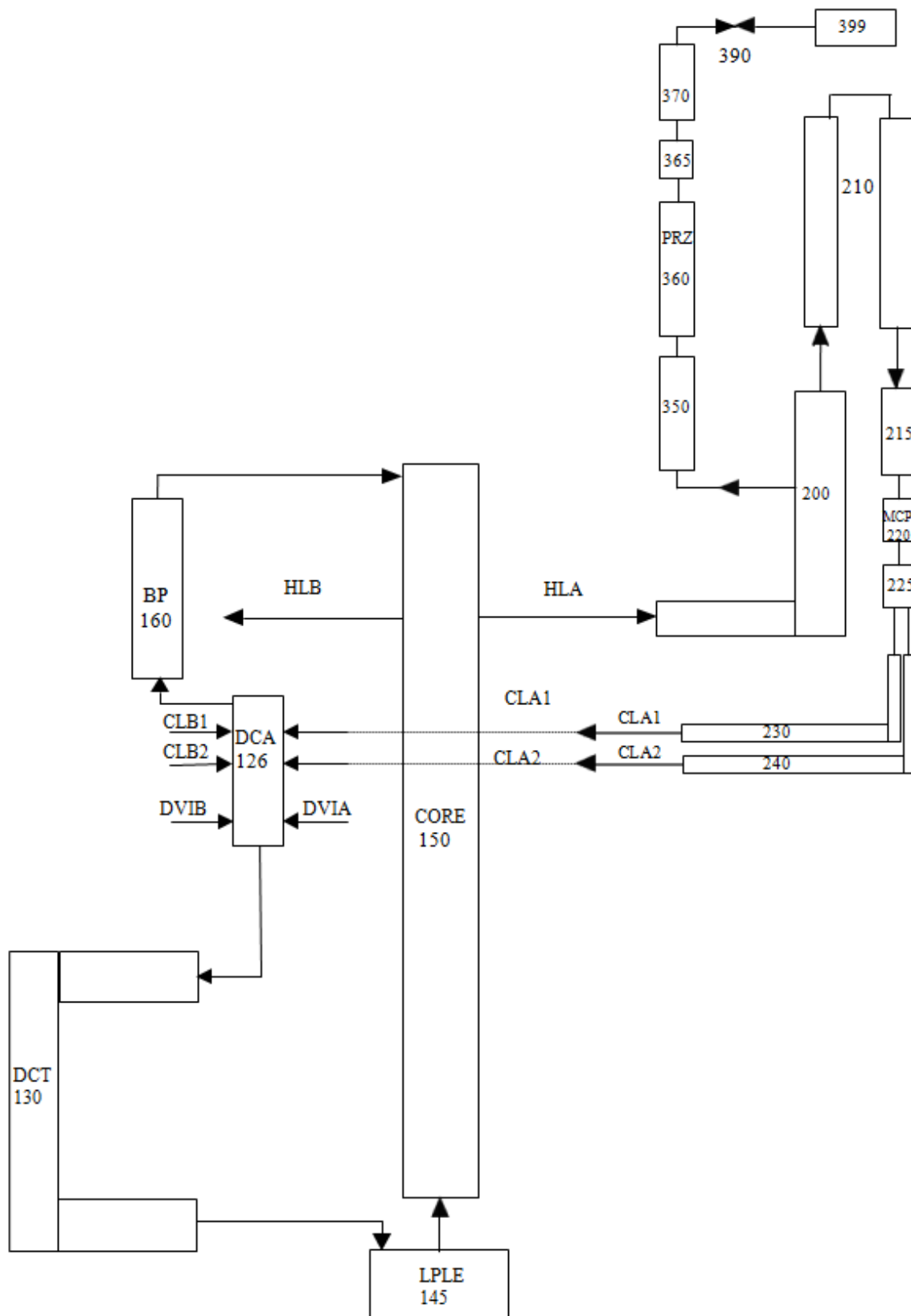


Fig. 2: Nodalizzazione Relap del circuito primario di SPES – 99.

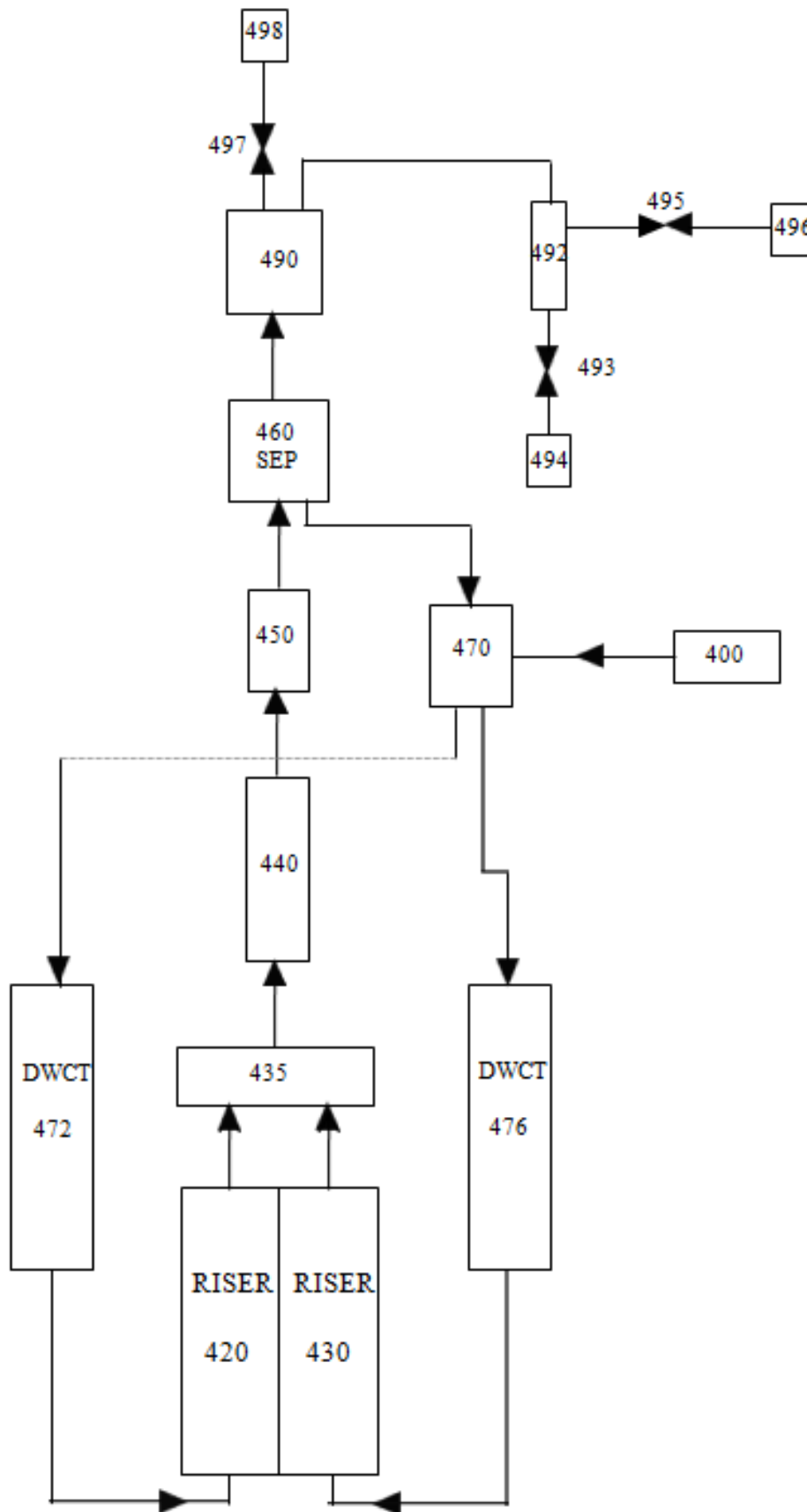


Fig. 3: Nodalizzazione Relap del secondario del generatore di vapore del loop A di SPES – 99.

#### 4. Presentazione dei risultati del transitorio simulato

Il modello numerico della facility che si basa sulla nuova versione del codice RELAP5 (Mod3.3) e sulla nodalizzazione rivista per tenere conto della configurazione SPES-99 è stato verificato a fronte di dati sperimentali. Il transitorio utilizzato a questo scopo, la cui prova sperimentale è stata eseguita sul finire degli anni 90 in SIET [4], è un tipico incidente di perdita di refrigerante IBLOCA di 10" equivalente che ha interessato la cold-leg 2 del loop B della facility SPES-99. Il transitorio, condotto a partire da condizioni di piena potenza e pressione e con il pressurizzatore collegato sulla hot-leg del loop A, è stato simulato utilizzando l'input RELAP descritto nel paragrafo precedente. La sequenza temporale del transitorio analizzato è riportata in Tab. 9.

| <b>Evento</b>                            | <b>Set Point</b>                        | <b>Tempo [s]</b> |
|--|---|------------------|
| Apertura break                           | 0                                       | 0                |
| Chiusura linea vapore loop A             | P (PRZ) < 12.41 MPa<br>+ 2s ritardo     | 5.2              |
| Chiusura linea vapore loop B             | P (PRZ) < 12.41 MPa<br>+ 2s ritardo     | 5.2              |
| Segnale scram                            | P (PRZ) < 12.41 MPa<br>+ 3.5 s ritardo  | 6.7              |
| Chiusura alimentazione secondario loop A | P (PRZ) < 11.72 MPa<br>+ 2 s ritardo    | 6.5              |
| Chiusura alimentazione secondario loop B | P (PRZ) < 11.72 MPa<br>+ 2 s ritardo    | 6.5              |
| Trip pompe loop A/B                      | P (PRZ) < 11.72 MPa<br>+ 16.2 s ritardo | 20.7             |
| Intervento accumulatori loop A/B         | P (DVI) < 4.8 MPa<br>+ 16.2 s ritardo   | 72               |
| Stop accumulatori loop A/B               | -                                       | 529              |
| Primo dry out a differenti elevazioni    | -                                       | 48/148           |
| Secondo dry out                          | -                                       | 1170             |

Tab. 9: Sequenza temporale del transitorio simulato.

Nelle Fig. 4 – 9 viene presentato un confronto tra i parametri sperimentali più rilevanti ed i risultati della simulazione numerica, ottenuta con il modello di SPES-99 sviluppato tramite l'impiego del codice RELAP5/MOD3.3 sopra dettagliatamente descritto.

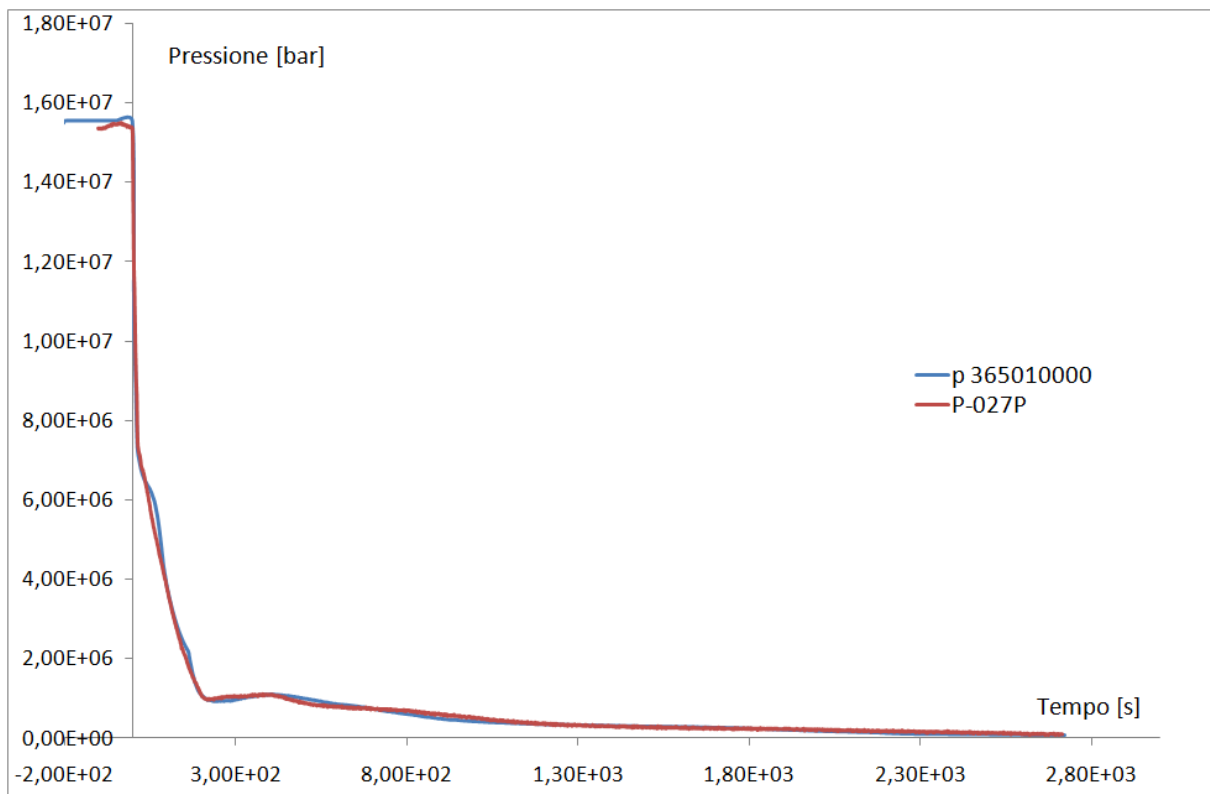


Fig. 4: Andamento della pressione nel pressurizzatore.

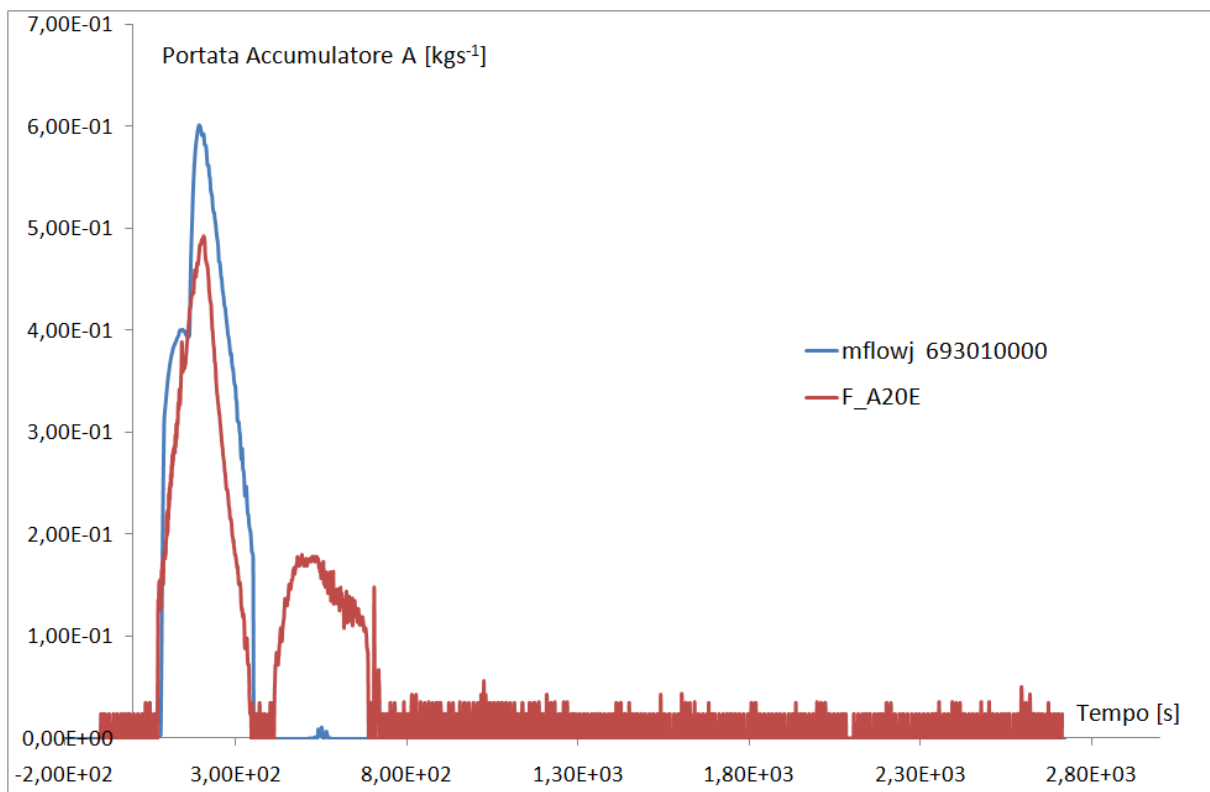


Fig.5: Portata di liquido iniettata nel circuito primario dall'accumulatore A.

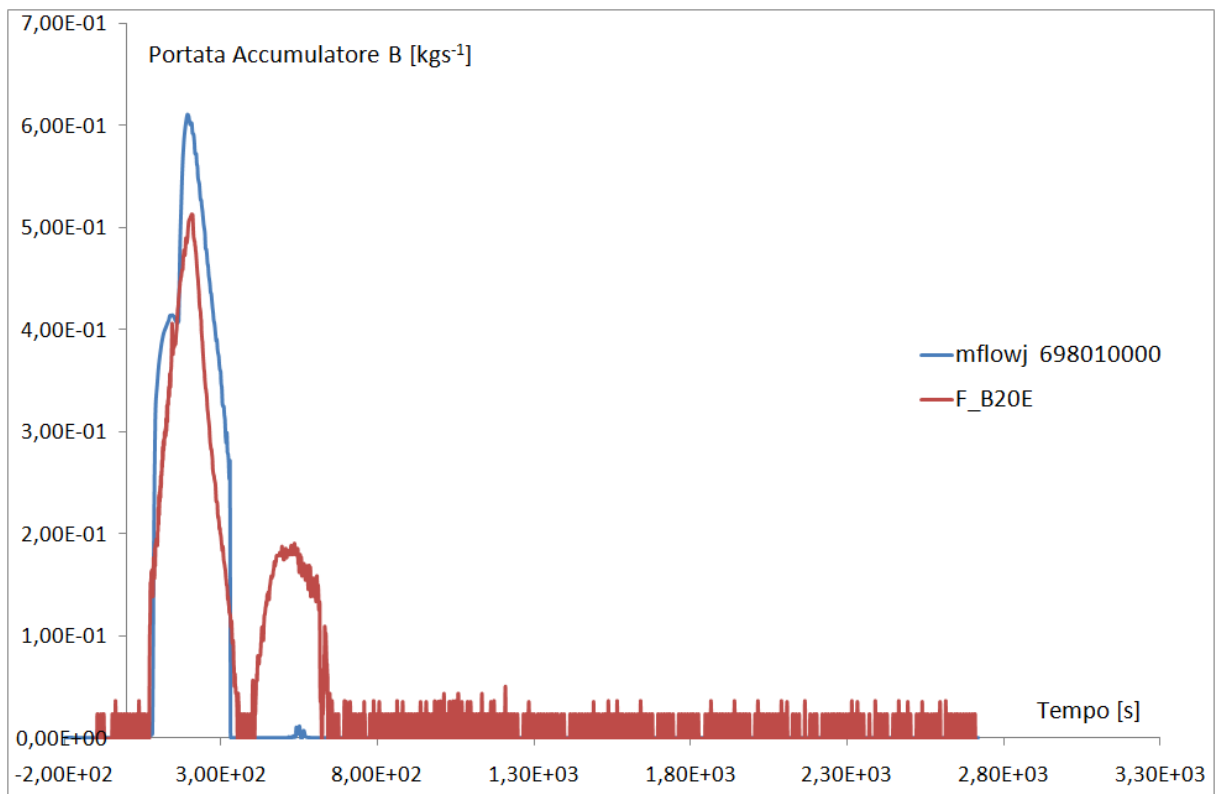


Fig.6: Portata di liquido iniettata nel circuito primario dall'accumulatore A.

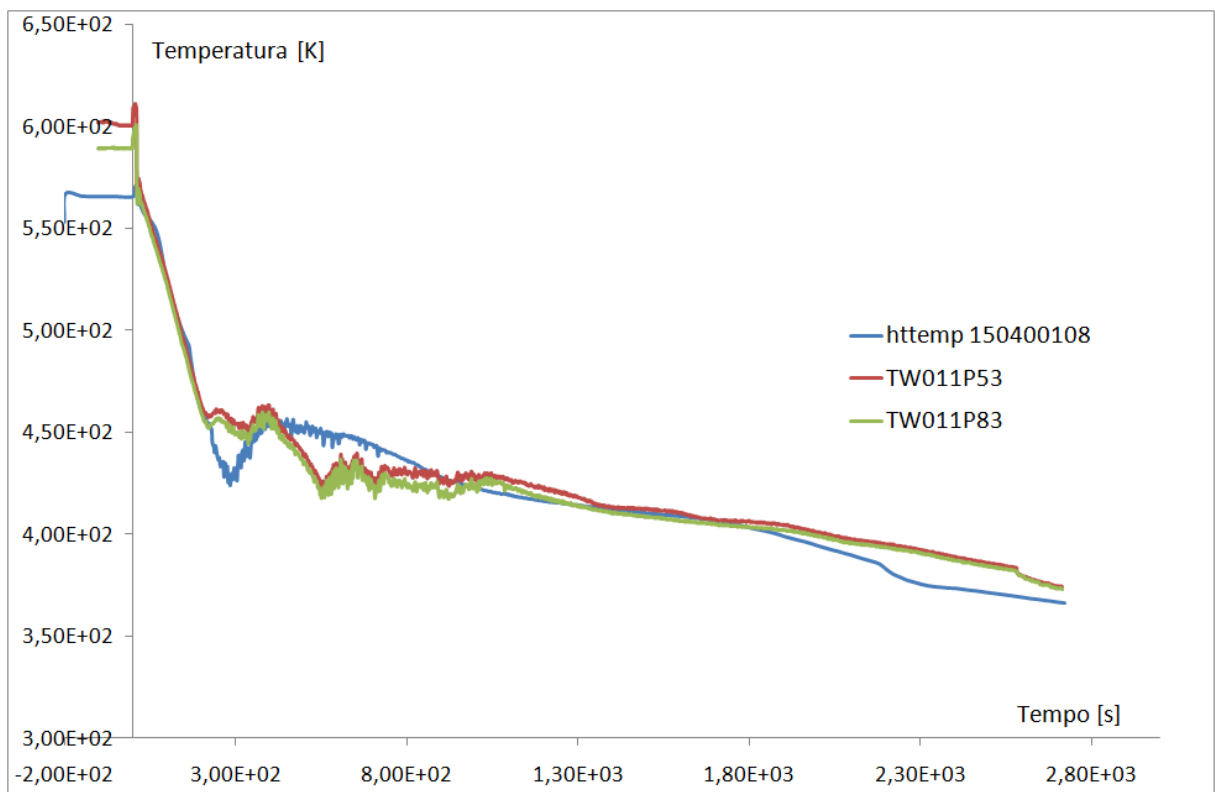


Fig.7: Andamento della temperatura di parete nella parte bassa del canale scaldante.

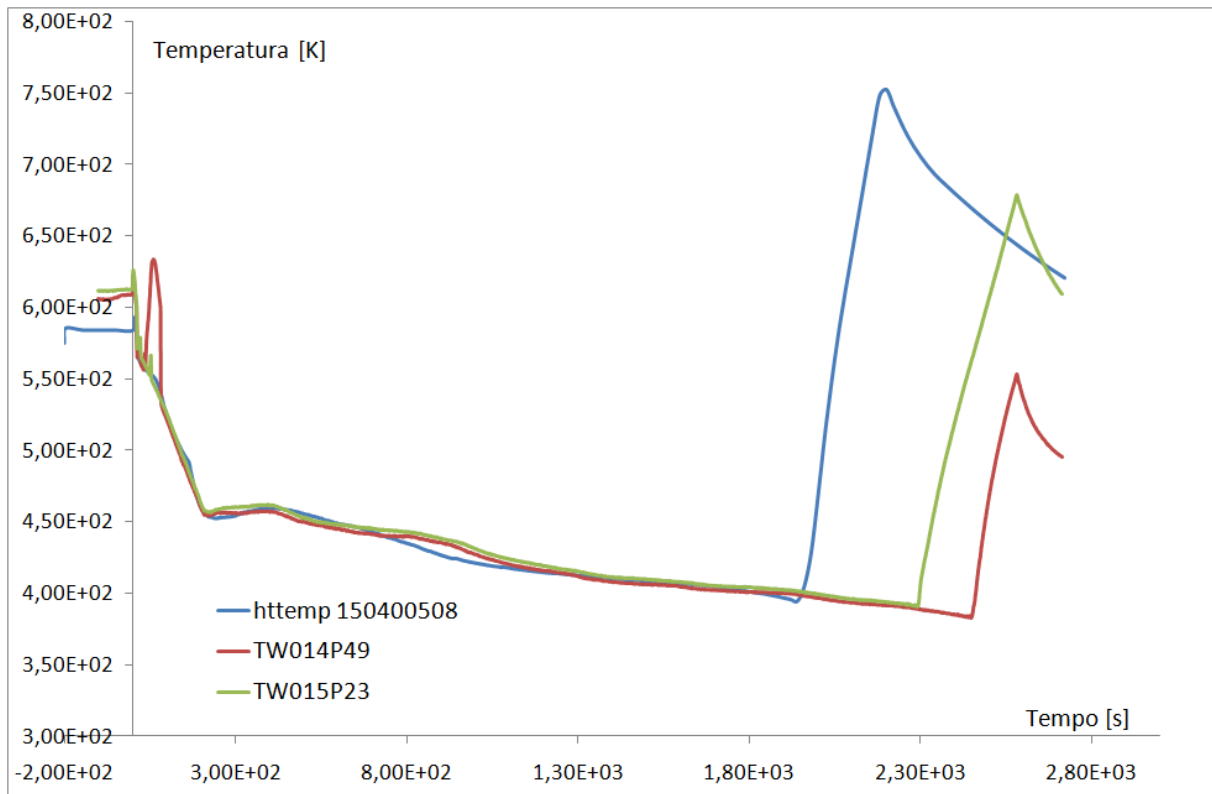


Fig.8: Andamento della temperatura di parete nella parte media del canale scaldante.

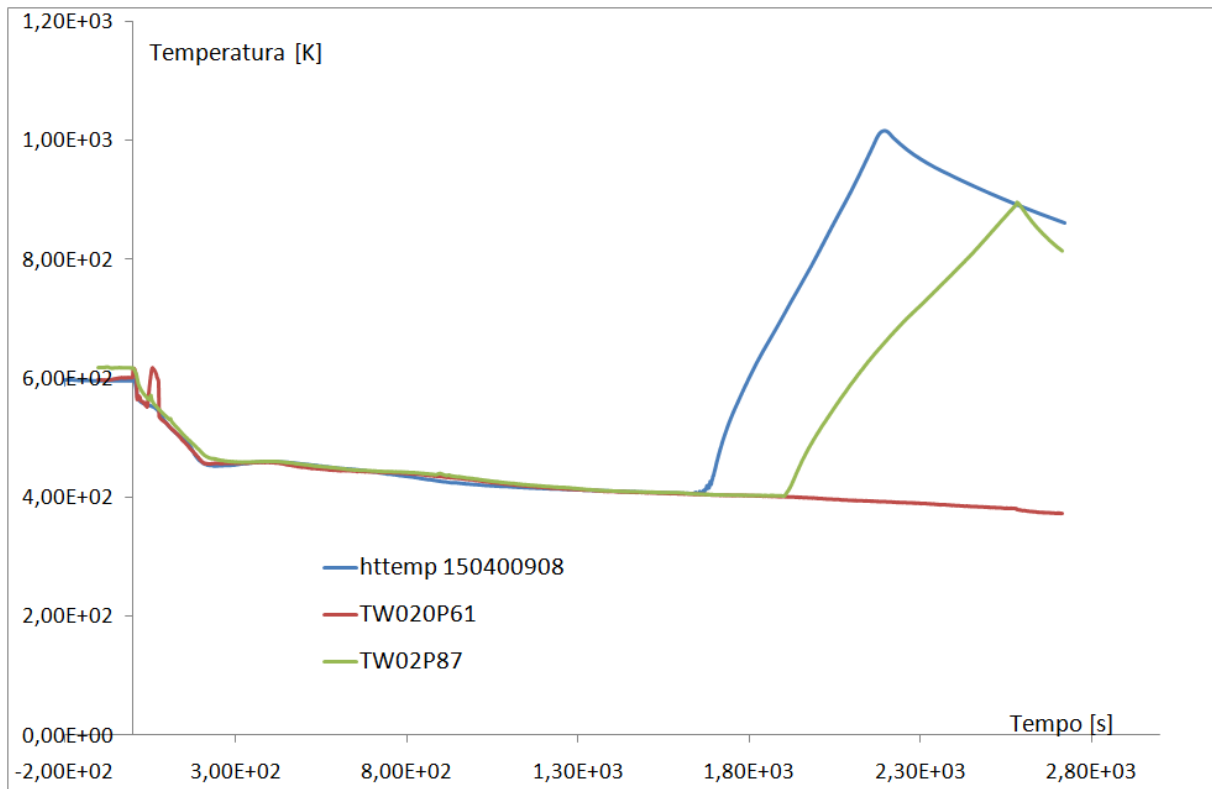


Fig.9: Andamento della temperatura di parete nella parte alta del canale scaldante.

Dall'esame della Fig. 4 si può notare come la depressurizzazione del sistema avvenga velocemente e nei primi istanti di transitorio. Il confronto tra i dati sperimentali (P-027P linea in rosso) e i valori di pressione nel pressurizzatore calcolati dal codice (linea in blu) mostra una buona capacità dello stesso nel descrivere il fenomeno all'esame.

La buona descrizione della fase di depressurizzazione del sistema si ripercuote sull'esatta previsione, da parte del codice, di attuazione degli accumulatori come si evince dalle Fig. 5-6.

L'esame delle Fig. 7-9 ci permette di mettere in evidenza la capacità del codice di predire il fenomeno del DNB che si presenta negli istanti immediatamente successivi all'apertura della rottura quando l'intervento degli accumulatori consente di tenere sotto controllo l'andamento della temperatura nel canale scaldante. Il transitorio procede poi per un tempo di circa 2200 s in corrispondenza al quale sperimentalmente si nota il forte aumento della temperatura nella parte alta del canale che preannuncia il verificarsi del fenomeno di dry out (Fig. 8). A tal riguardo, sia nella parte media che in quella alta del canale scaldante si può notare l'anticipo di circa 200 s con il quale il codice mette in evidenza tale fenomeno.

Ancora in buon accordo con il test sperimentale il fenomeno non viene predetto nella parte bassa del canale (Fig. 7).

Vale la pena di mettere in evidenza il fatto che tra i dati sperimentali non compare la portata di liquido persa attraverso la rottura: ciò si ripercuote sulla non esatta conoscenza dell'andamento, in funzione del tempo, dell'inventario di massa del circuito primario. Tenendo conto di tale incertezza e nonostante la predizione del fenomeno di dry out in anticipo si può concludere che il codice riproduce tutte quante le fenomenologie importanti del transitorio all'esame.

## 5. Proposta di test sperimentali da condurre su SPES.

Il test proposto, da eseguire sull'impianto SPES, è un tipico incidente di perdita di refrigerante di piccole dimensioni (SBLOCA) con lo scopo di investigare il fenomeno di "boron dilution" in condizioni di inventario massa ridotto a causa della perdita dal circuito primario. Il transitorio proposto è simile al F1.2 già eseguito sulla facility PKL [5]. La particolare rilevanza di questo test deriva dalla possibilità di eseguire un confronto tra i risultati ottenuti sulle due diverse facility.

Il fenomeno di "boron dilution" assume un ruolo di fondamentale importanza quando all'interno della facility viene ad instaurarsi il fenomeno di "reflux-condenser". Quest'ultimo si verifica all'interno dei tubi ad U dei generatori di vapore quando a causa del basso valore dell'inventario di massa del primario si blocca la circolazione naturale. Ciò comporta la creazione di parti di acqua con concentrazioni di boro minime sia nel circuito primario che all'uscita del generatore di vapore che nel "loop seals". Queste parti di liquido potrebbero mettersi in movimento lungo il loop e raggiungere il core causando, a partire da un aumento locale della reattività, una potenziale ed indesiderata escursione di potenza. Lo scopo del test proposto è quello di comprendere la relazione esistente tra l'inventario di massa del circuito primario (che influenza fortemente le modalità di circolazione del primario) e la concentrazione di boro del condensato all'uscita dal generatore di vapore.

Essendo la circolazione naturale, l'aspetto più importante di cui tenere conto nel fenomeno di "boron dilution" saranno necessarie delle prove sperimentali che evidenzino il comportamento della facility in tali condizioni. I risultati ottenuti dal comportamento di SPES2 in circolazione naturale potranno essere confrontati con quelli ottenuti da altre facilities (Fig. 10). Tra queste è compresa la facility SPES1, quindi i risultati ottenuti dalle nuove prove potranno essere confrontati con questi ultimi.

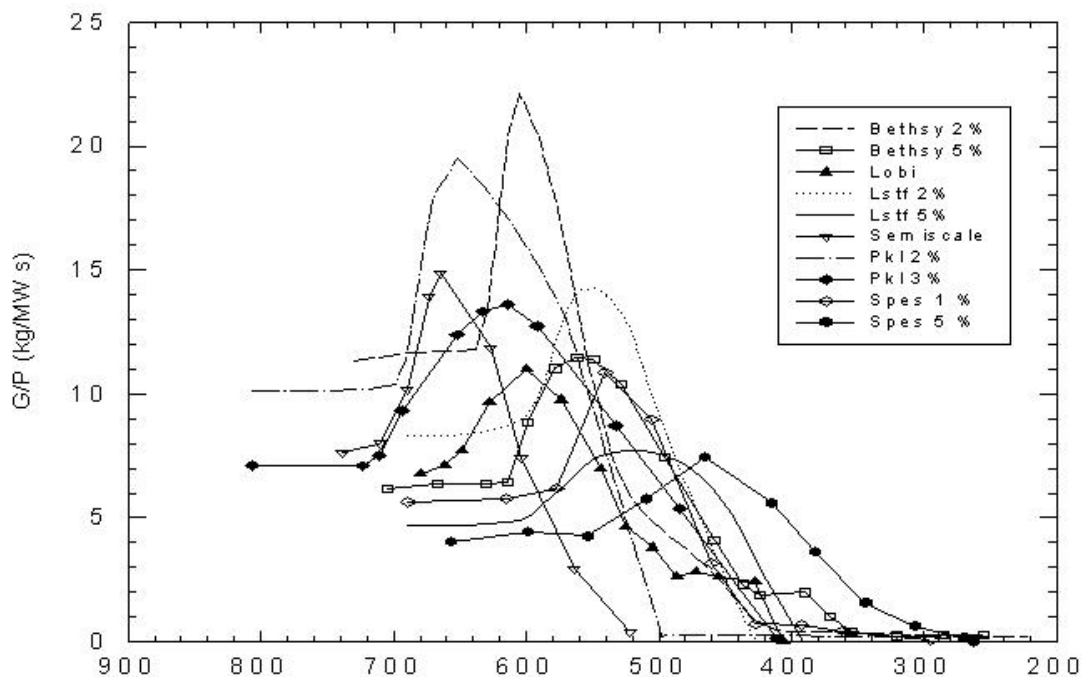


Fig. 10 - Data base da cui ottenere la flow map della circolazione naturale.

Quindi con l'utilizzo dei dati riportati in Fig. 10 si potrà ottenere la validazione di SPES2 riguardo al suo comportamento in condizioni di circolazione naturale.

Il test proposto inizia con l'impianto in condizioni di circolazione naturale monofase, a partire da tali condizioni si procede con la progressiva riduzione dell'inventario di massa: ciò è ottenuto riducendo in step successivi la quantità di refrigerante presente nel circuito primario. In quest'ultima parte del transitorio, a partire dall'istante in cui il core è scoperto e si assiste ad un aumento del calore presente, si procede con il suo successivo riempimento. Le Fig. 11 e 12 riportano qualitativamente ed in funzione del tempo, rispettivamente gli andamenti attesi della portata e dell'inventario di massa del fluido refrigerante primario e la concentrazione di boro all'uscita dei generatori di vapore per l'impianto SPES2.

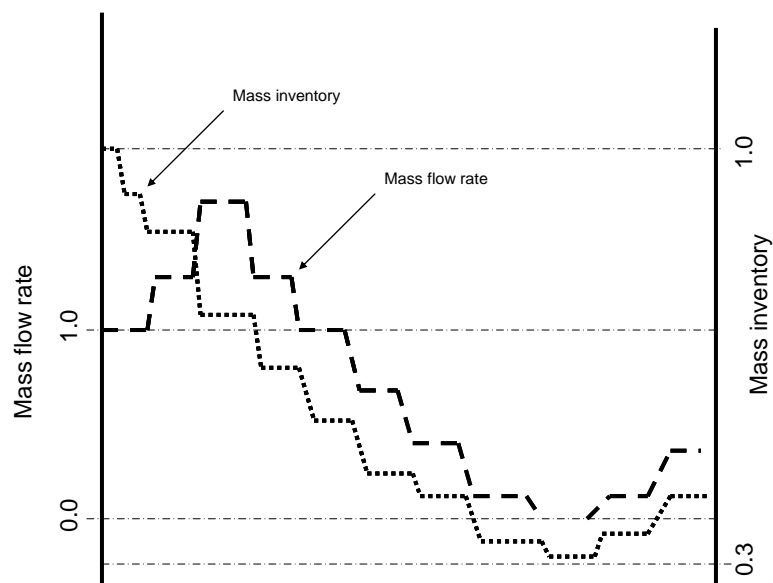


Fig. 11: Andamento qualitativo atteso della portata e dell'inventario di massa per gli esperimenti da condurre su SPES2.

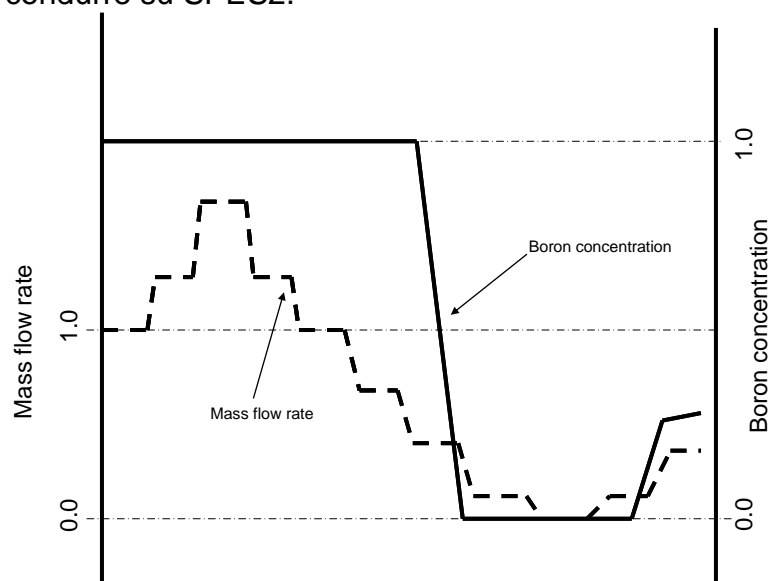


Fig. 12: Andamento qualitativo atteso della concentrazione di boro e della portata di massa media nel loop per gli esperimenti da condurre su SPES2.

Per dare maggiore rilevanza all'esperimento da eseguire su SPES2, esso è stato progettato assumendo (in scala) le stesse condizioni al contorno impiegate in tutte le altre facilities. In prima approssimazione si è deciso di adottare le stesse condizioni al contorno utilizzate sulla facility PKL per l'esecuzione del test F1.2. Queste condizioni sono riportate nella Tabella. 10.

| #   | Conditions                                  | Value   | Note  |
|-----|---|---|---|
| 1.  | U-Tubes filled with liquid water            | Full of water                                   | Sub-cooled 1 phase natural conditions               |
| 2.  | Coolant inventory                           | Nominal Value (Full of water)                   | Normal level in PRZ                                 |
| 3.  | Core power (decay heat)                     | 1%- 2%  |   |
| 4.  | Primary side pressure                       | Nominal value                                   |   |
| 5.  | Coolant temperature at core outlet          | 184 °C  | Tentatively derived from PKL test.<br>To be defined |
| 6.  | Sub-cooling at core inlet                   | 4. °C   | Tentatively derived from PKL test.<br>To be defined |
| 7.  | Pressurizer fluid temperature               | 189 °C  | Tentatively derived from PKL test.<br>To be defined |
| 8.  | Pressurizer level                           | Nominal level in PRZ                            |   |
| 9.  | Flow rate in loops                          | Sub-cooled natural circulation in all the loops | RCP stopped   |
| 10. | Initial boron concentration                 | 2000 ppm<br>homogeneous concentration           | Tentatively derived from PKL test.<br>To be defined |
| 11. | Main steam pressure in SG secondary side    | 5.9 bar   | Tentatively derived from PKL test.<br>To be defined |
| 12. | Main steam temperature in SG secondary side | 158 °C  | Tentatively derived from PKL test.<br>To be defined |
| 13. | Collapsed level in SG secondary side        | Nominal value                                   |   |
| 14. | Feedwater temperature                       | 115-120 °C                                      | Tentatively derived from PKL test.<br>To be defined |

Tab. 10: Condizioni iniziali per l'esperimento progettato per la facility SPES2.

Il test dovrebbe essere caratterizzato dalla presenza di diverse condizioni di circolazione del liquido refrigerante. Il test può essere suddiviso in fasi principali attese elencate nella Tab. 11 .

| #  | Phase              | Sub-Phase  | Note                                     |
|----|--------------------|--|--|
| 1  | Conditioning Phase | Reaching of saturated conditions in the facility |  |
| 2  | Drainage           | Single Phase natural circulation                 |  |
| 3  |                    | Two phase natural circulation                    | Achievement of the peak mass flow rate   |
| 4  |                    | Instability and siphon condensation              |  |
| 5  |                    | Reflux-condenser conditions                      |  |
| 6  |                    | Core uncovered                                   | Core dry-out and minimal mass occurrence |
| 7  | Filling up         | Reflux-condenser conditions                      |  |
| 8  |                    | Instability and siphon condensation              |  |
| 9  |                    | Two phase natural circulation                    |  |
| 10 | Test end           | Pressure increase and                            |  |

Tab. 11: Sequenza delle fenomenologie attese durante l'esperimento su SPES2.

## 6. Risultati del calcolo di pre-test eseguito sul test sperimentale proposto

Nel presente paragrafo vengono riportati i principali risultati del calcolo di pre-test per il transitorio F1.2 da eseguire sulla facility sperimentale SPES2. Tali calcoli [6] sono stati effettuati utilizzando la nodalizzazione Relap precedentemente descritta.

### 6.1 Selezione delle condizioni iniziali e al contorno

Le condizioni iniziali e al contorno utilizzate per l'esecuzione dei calcoli sono state scelte in modo da risultare simili a quelle adottate nell'esecuzione del test F1.2 condotto sulla facility PKL. Per quest'ultimo sono state adottate valori di potenza veramente bassa (circa pari al 2% della potenza nominale dell'impianto) e di pressione del primario prossimo a quello di saturazione. Inoltre la pressione dell'impianto lato secondario è stata controllata dall'operatore al fine di mantenere un certo grado di sottoraffreddamento al lato primario.

Per i calcoli di pre-test condotti sulla facility SPES2 sono stati fissati un valore di potenza pari al 4% della nominale e un valore di pressione lato primario molto prossima al valore selezionato nel test effettuato sulla facility PKL pari a 1.7 MPa.

Le condizioni iniziali scelte per l'esecuzione del calcolo di pre-test vengono riportate in Tab. 12.

| No. | Parameter                 | Value                                 | Note   |
|-----|---------------------------|---------------------------------------|--|
| 1   | Primary side pressure     | 1.7 MPa                               |  |
| 2   | Power                     | 4% nominal power                      | The selected rods power is 4%, including 1% to compensate heat losses. |
| 3   | Heat losses               | 1% nominal power                      | The heat losses are compensated in the rods power                      |
| 4   | Secondary side pressure   | 1.5 MPa                               |  |
| 5   | Pressurizer level         | Nominal level                         | Pressurizer is isolated before the the beginning of the drainage phase |
| 6   | Steam generators level    | Nominal level                         |  |
| 7   | Feed water mass flow rate | To maintain the steam generator level |  |
| 8   | Seam line mass flow rate  | To maintain the steam generator level |  |

Tab. 12: Valori delle condizioni iniziali e al contorno selezionati per il test su SPES2.

Per ottenere le condizioni iniziali utilizzate durante l'esecuzione del calcolo è stato impiegato un tempo pari a 1800 s distinto in due fasi separate:

- la prima fase "conditioning phase" (0 s -1500 s) necessaria all'inizializzazione dei parametri termoidraulici dell'input;
- la seconda fase (1500 s – 1800 s).coincidente con il vero e proprio calcolo di stazionario.

La "conditioning phase" corrisponde al tempo necessario a imporre, ai vari componenti dell'input, i valori dei parametri termoidraulici selezionati per l'esecuzione del test. Ciò si è reso necessario dal momento che la nodalizzazione dell'impianto fornita da ENEA risultava inizializzata con i valori dei parametri termoidraulici corrispondenti alle condizioni di piena potenza dello stesso impianto.

Durante il "conditioning period":

- la potenza elettrica fornita alle rods è stata imposta pari al 4% del valore nominale della potenza (tenendo conto delle perdite di calore verso l'ambiente esterno) (Fig. 13);
- il valore della pressione imposta al primario viene fatto variare tra 16.3 MPa e 1.7 MPa (Fig. 14);
- il valore della pressione imposta al secondario viene fatto variare tra 4.9 MPa e 1.5 MPa (Fig. 14);
- il livello di liquido nel pressurizzatore viene controllato al fine di garantire che esso risulti pieno durante le fasi di variazione della pressione del primario,
- l'alimentazione del secondario dei generatori di vapore viene controllata per garantire il giusto livello di liquido negli stessi; le pompe di circolazione del fluido primario vengono bloccate;
- una concentrazione di boro pari a 2000 ppm è stata aggiunta all'acqua del circuito primario.

In questa fase del calcolo, quindi, sono stati imposti i valori della pressione del primario e del livello nel pressurizzatore. In tale modo si è innescato il fenomeno della circolazione naturale in condizione monofase (Fig. 15 e Fig. 16).

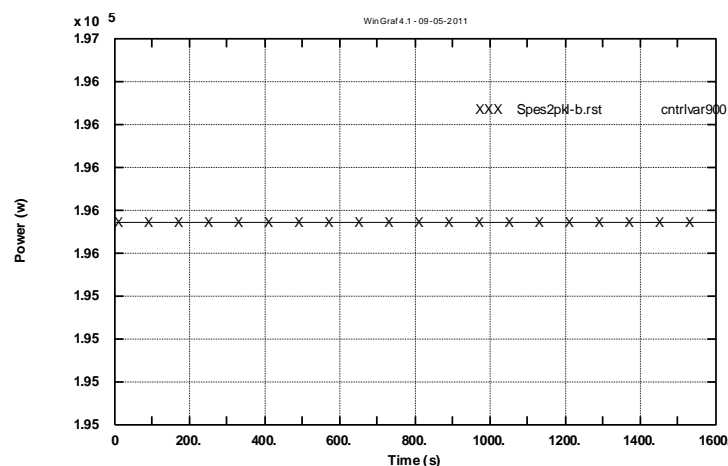


Fig. 13: Andamento della potenza durante la "Conditioning phase".

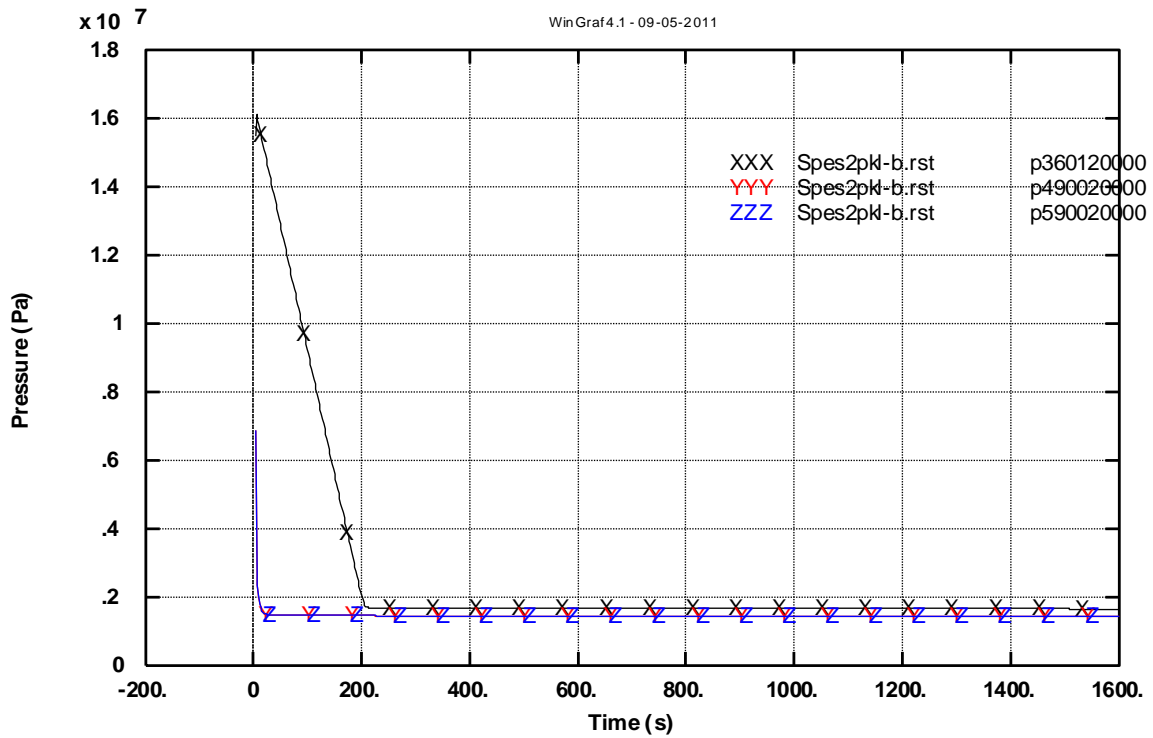


Fig. 14: Andamenti della pressione del primario (“XXX”) e dei secondari (“YYY” and “ZZZ”) durante la “Conditioning phase” dell’esperimento su SPES2.

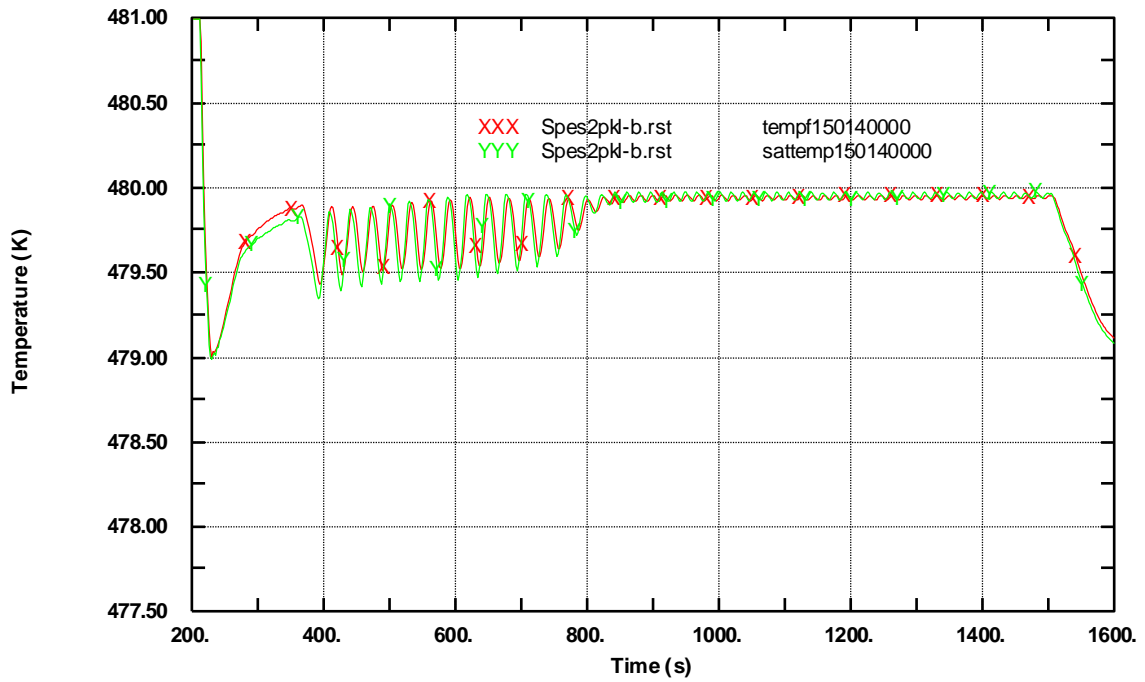


Fig. 15: Andamenti della temperatura all’uscita del core e della temperatura di saturazione durante la “Conditioning phase”.

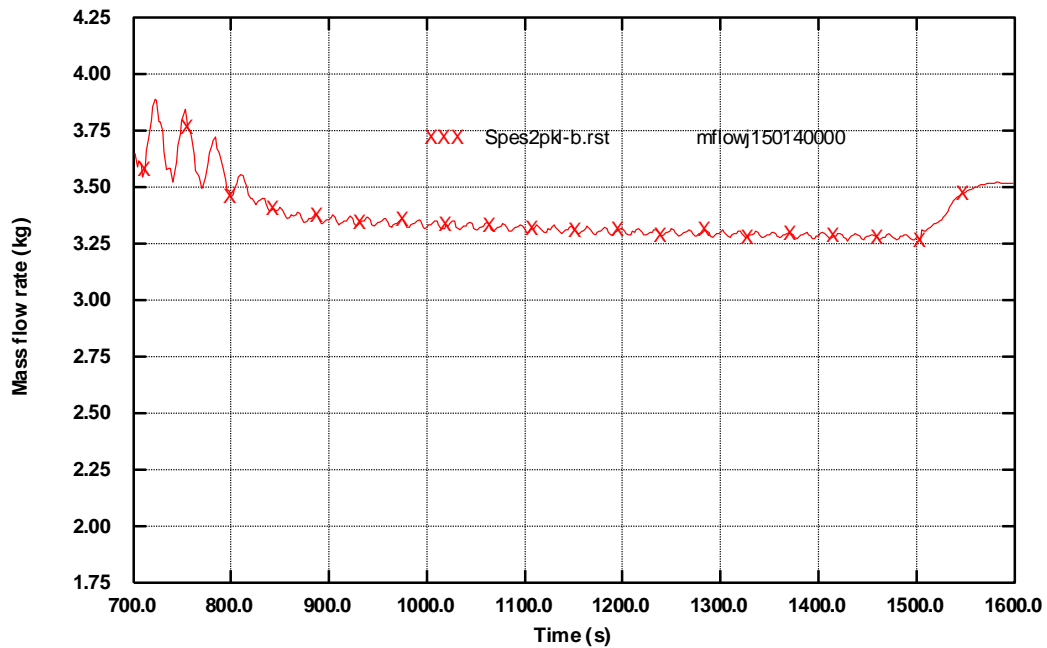


Fig. 16: Andamento della portata attraverso il canale di potenza durante la “Conditioning phase”.

Il periodo di calcolo dello stazionario è compreso tra 1500 s e 1800 s del transitorio, in tale periodo i valori della pressione del primario e del livello nel pressurizzatore non vengono controllati ma si mantengono stabilmente le condizioni di circolazione naturale (Fig. 1) e il fluido refrigerante all’uscita del core si trova in condizioni di saturazione (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). La pressione del circuito primario si mantiene stabile mentre quella del secondario è imposta (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

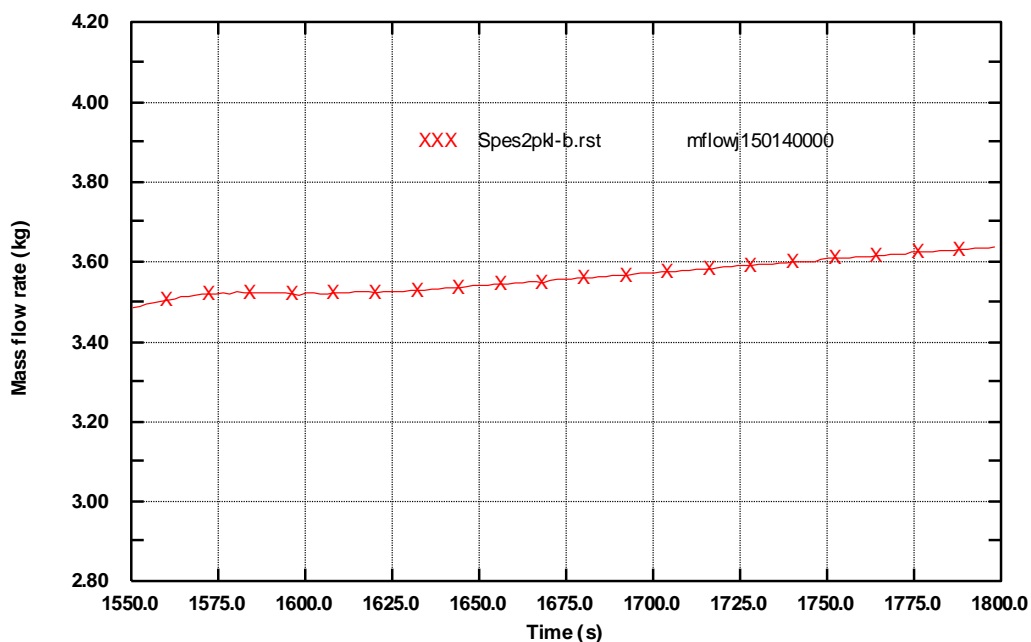


Fig. 1: Andamento della portata attraverso il canale di potenza durante la “steady state phase”.

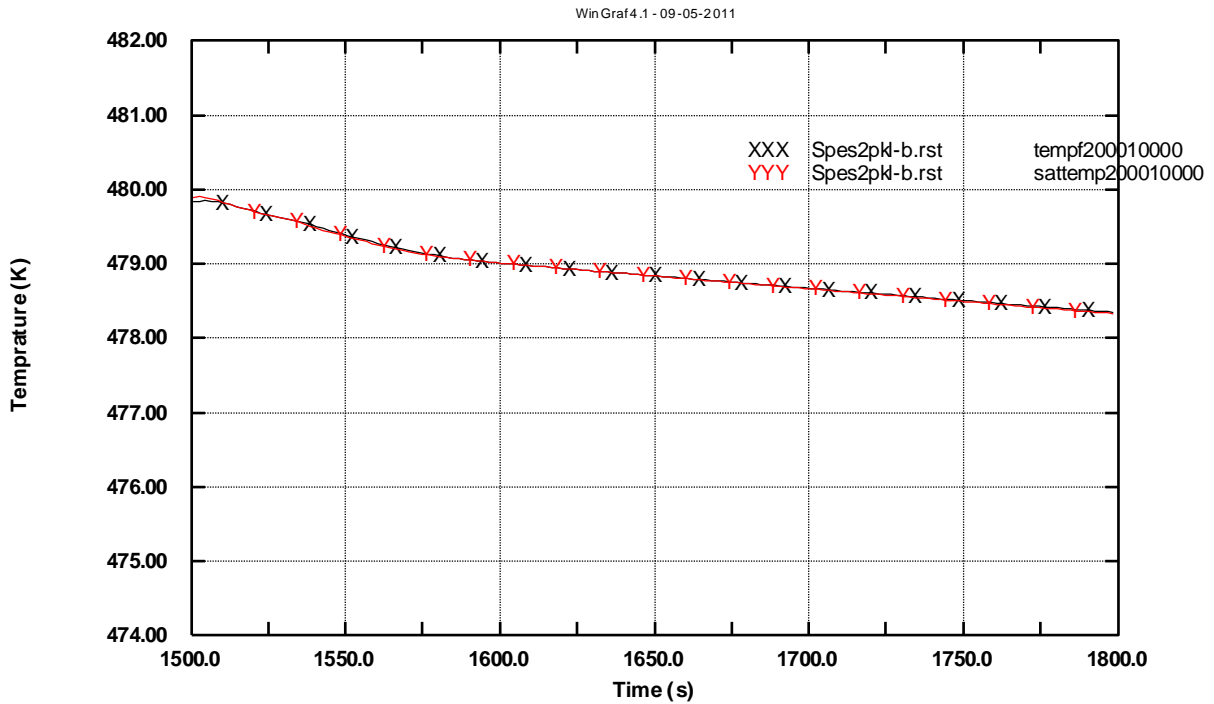


Fig. 18: Andamenti della temperatura del fluido all’uscita dal core.

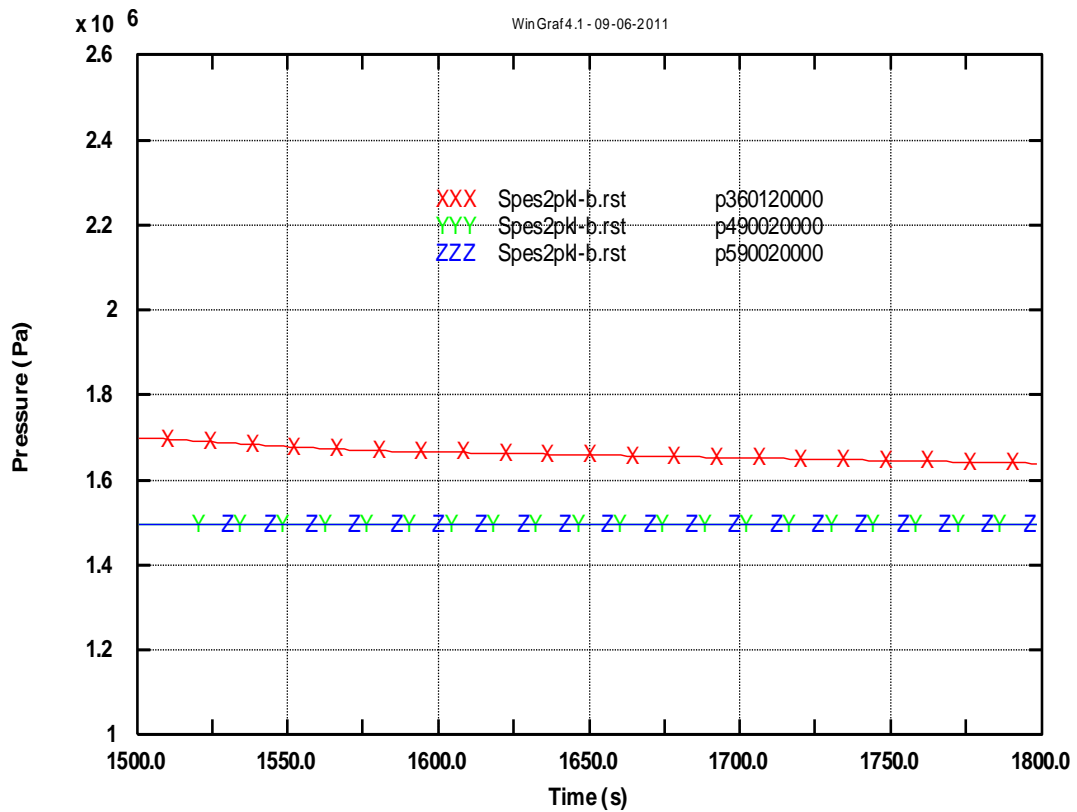


Fig. 19: Andamenti della pressione del primario (“XXX”) e dei secondari (“YYY” and “ZZZ”) durante la “steady state phase”.

Come commento generale sul periodo di “steady state”, è necessario notare che durante l'esperimento effettuato sul PKL gli operatori regolavano la pressione del secondario per mantenere in condizioni adatte il circuito primario. In questo calcolo, a causa dell'impossibilità di una regolazione continua della pressione lato secondario, è stato selezionato per essa un valore costante che consentisse di ottenere un buon stato stazionario. Inoltre vale la pena di rilevare che le perdite di calore verso l'esterno, sia del primario sia del secondario, influiscono in modo rilevante sull'andamento dei parametri del primario e sulla scelta del valore di pressione da adottare nel secondario.

### 6.2 Risultati del calcolo di pre-test

L'esecuzione del test è consistita in una sequenza di fasi di drenaggio del fluido primario dal lower plenum del canale di potenza, al fine di avere un valore minimo di inventario di massa che consentisse il riscaldamento delle barre, seguite da fasi di iniezione di liquido borato. Prima dell'inizio della sequenza di drenaggio il pressurizzatore è stato isolato dal loop (1800.0s). Il calcolo di pre-test è iniziato quindi all'istante  $t = 1800$  s ed è terminato al tempo pari a 6000 s dopo l'aumento della portata di fluido refrigerante nel core. La sequenza delle fasi di drenaggio e iniezioni è riportata nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

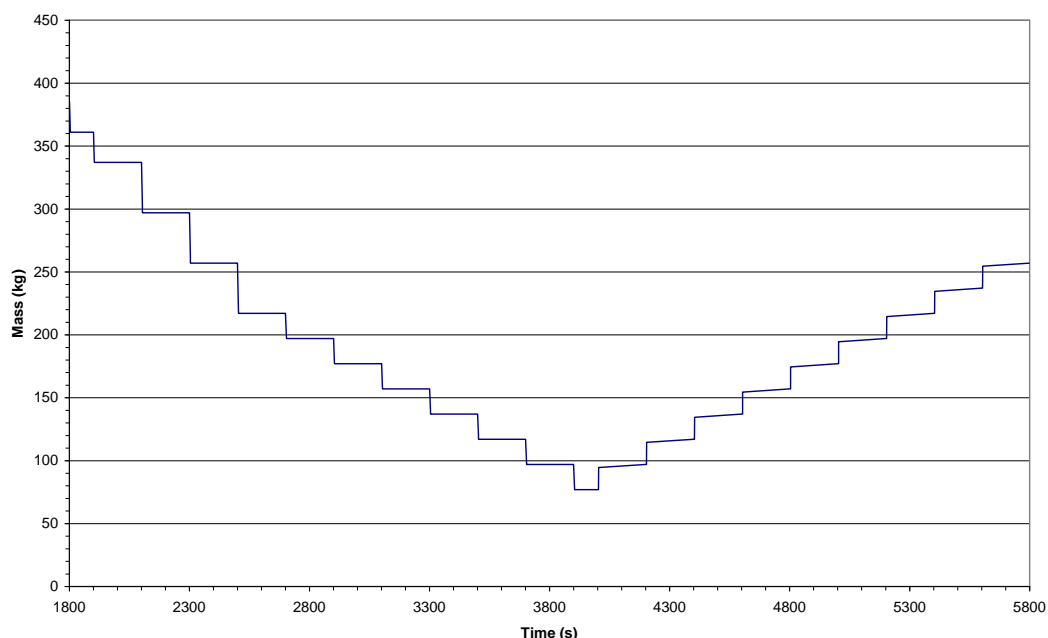


Fig. 20: Massa residua nel primario durante le fasi di drenaggio e di iniezione durante l'esperimento su SPES2.

L'andamento della portata nel core, calcolata per il test all'esame, viene riportata nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, vengono riportati i differenti regimi individuati durante l'esecuzione del test.

Acqua deborata è prodotta nella parte discendente nei tubi ad U dei generatori di vapore per mezzo del fenomeno della condensazione del vapore. Quest'ultima dall'uscita dei generatori di vapore arriva direttamente nel down comer del canale di potenza (Fig. 22). La Fig. 23 riporta la concentrazione di boro nel downcomer del canale di potenza e sovrapposti i differenti regimi individuati durante l'esecuzione del test.

In essa possono distinguersi i seguenti principali regimi:

- Circolazione naturale in regime bifase durante la fase di drenaggio (1800 s - 2100.0s - Fig. ). Tale regime fa aumentare la portata nel canale di potenza fino ad un valore massimo di circa 4.4 kg/s. In tale fase non si presenta il fenomeno di "boron dilution" (Fig. ).
- Effetto "Siphon" accompagnato da condensazione e fenomeno di instabilità durante la fase di drenaggio (2100 – 3300 s - Fig. ). Tale fase è caratterizzata da oscillazioni nell'andamento della portata attraverso il canale di potenza a causa del fatto che la portata di fluido nei tubi ad U si presenta in modo intermittente. Nell'ultima parte di questo periodo si presenta il fenomeno di "boron dilution" (Fig. ).
- "Reflux condenser" durante la fase di drenaggio (2100 s – 3900 s - Fig. ). In questo periodo la riduzione della portata attraverso il canale di potenza è imputabile alla condensazione del vapore nei tubi ad U dei generatori. L'acqua condensata nel tratto discendente dei tubi ad U si presenta deborata ed essa si accumula nel downcomer del canale di potenza (Fig. ).
- Fine della fase di drenaggio (3900 s – 4100 s - **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). In tale periodo la portata attraverso il canale di potenza è minima e ogni successivo drenaggio di liquido porta all'aumento della temperatura nel canale di potenza. A partire da questo istante, prende avvio la fase di iniezione di liquido nel lower plenum del canale di potenza. L'andamento della temperatura di guaina nella parte alta del canale di potenza e della concentrazione di boro nel downcomer sono riportati nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Essa ci mostra un veloce aumento della temperatura di guaina e un valore veramente basso della concentrazione di boro nel downcomer.
- "Reflux condenser" durante la fase di iniezione (4200 s – 4800 s - **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). In questo periodo si nota un aumento della portata di liquido attraverso il canale di potenza. Inoltre l'iniezione di acqua borata nel lower plenum del canale di potenza conduce ad un aumento della concentrazione di boro dell'acqua contenuta nel downcomer.
- Effetto "Siphon" accompagnato da condensazione e fenomeno di instabilità durante la fase di iniezione (4800 – 6000 s - Fig. ). In questa fase la portata attraverso il canale di potenza e la concentrazione di boro nel downcomer aumentano.

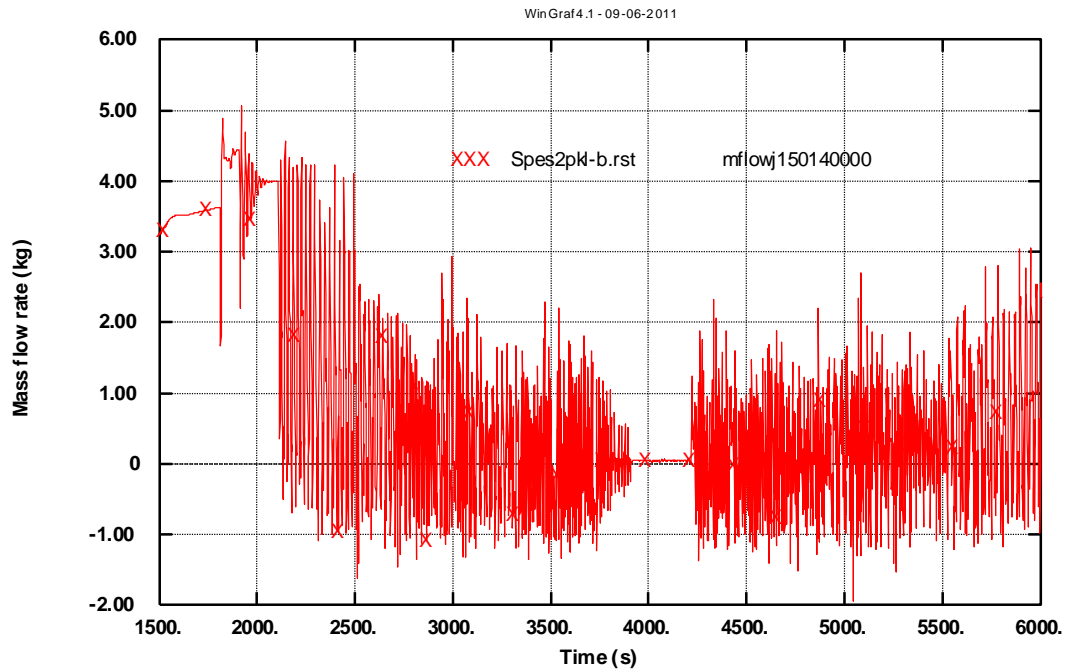


Fig. 21: Portata attraverso il canale di potenza per l'esperimento su SPES2.

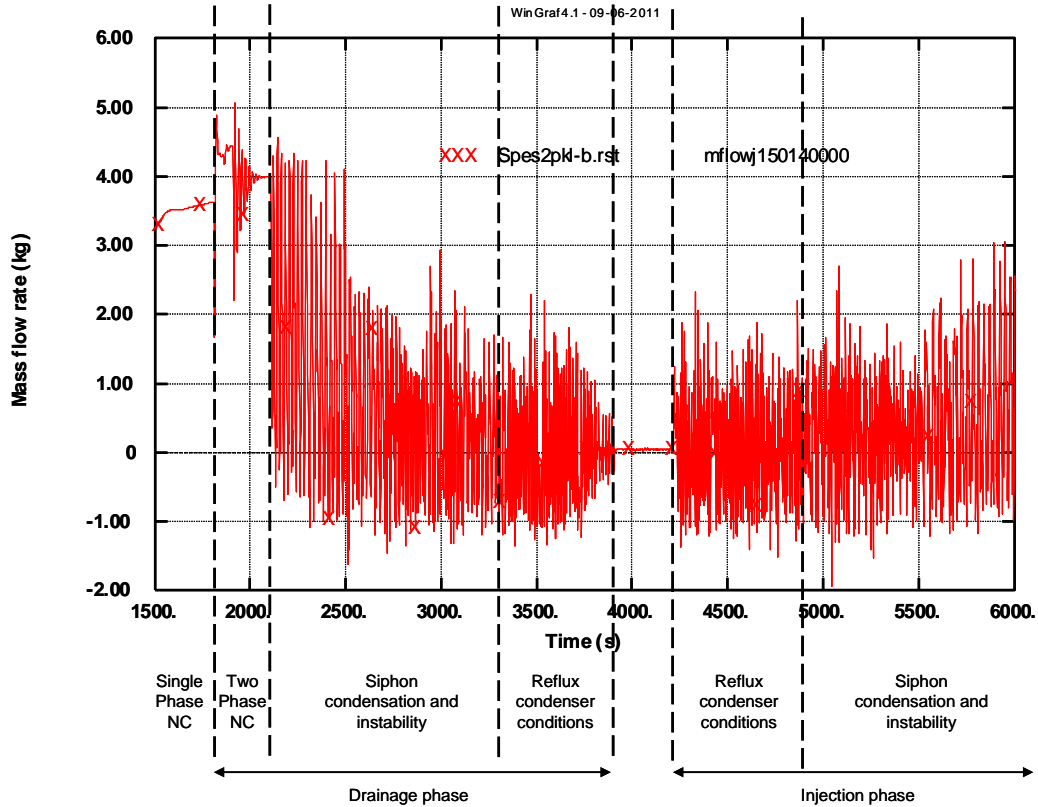


Fig.22: Portata attraverso il canale di potenza per l'esperimento su SPES2. Identificazione dei regimi instaurati.

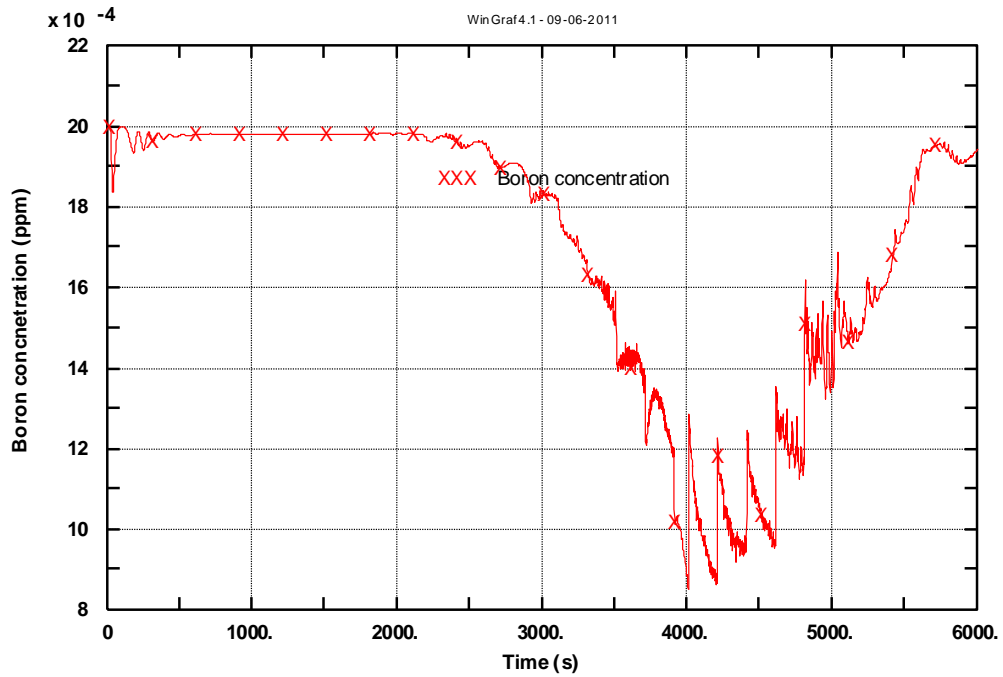


Fig. 23: Concentrazione di boro nel downcomer per l'esperimento su SPES2.

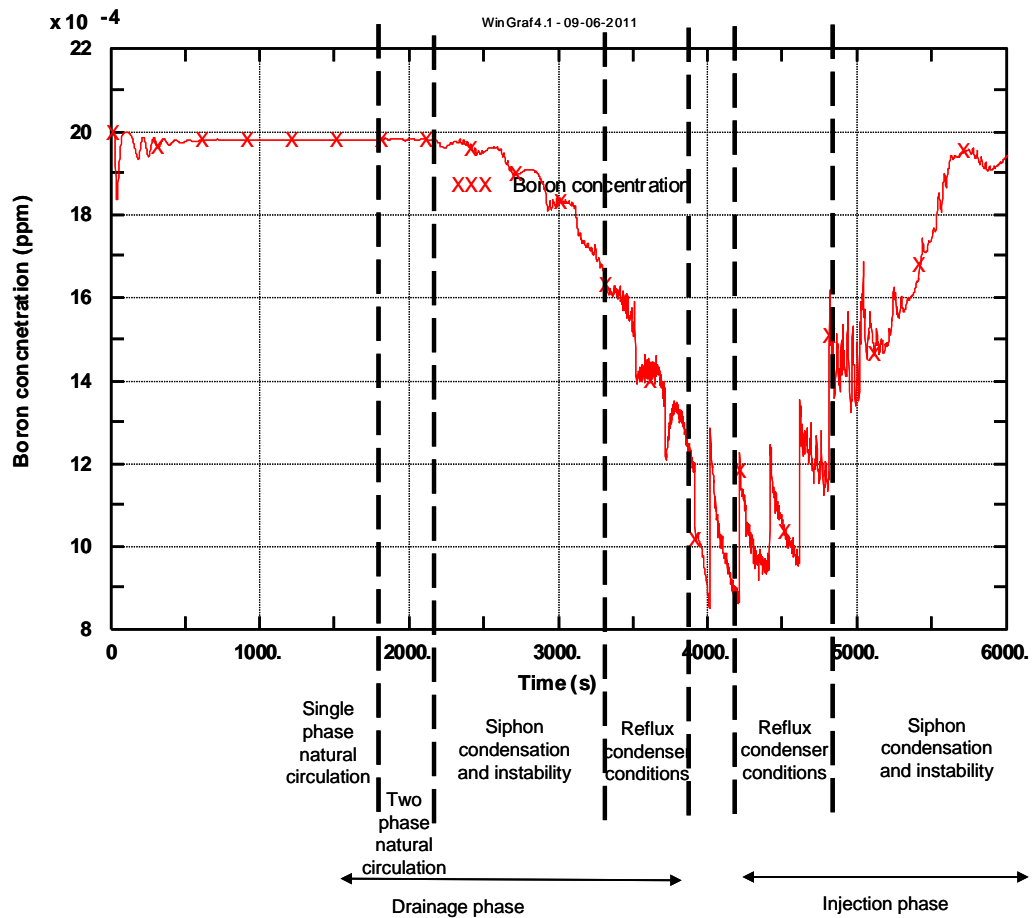


Fig. 24: Concentrazione di boro nel downcomer per l'esperimento su SPES2.

Identificazione dei regimi instaurati.

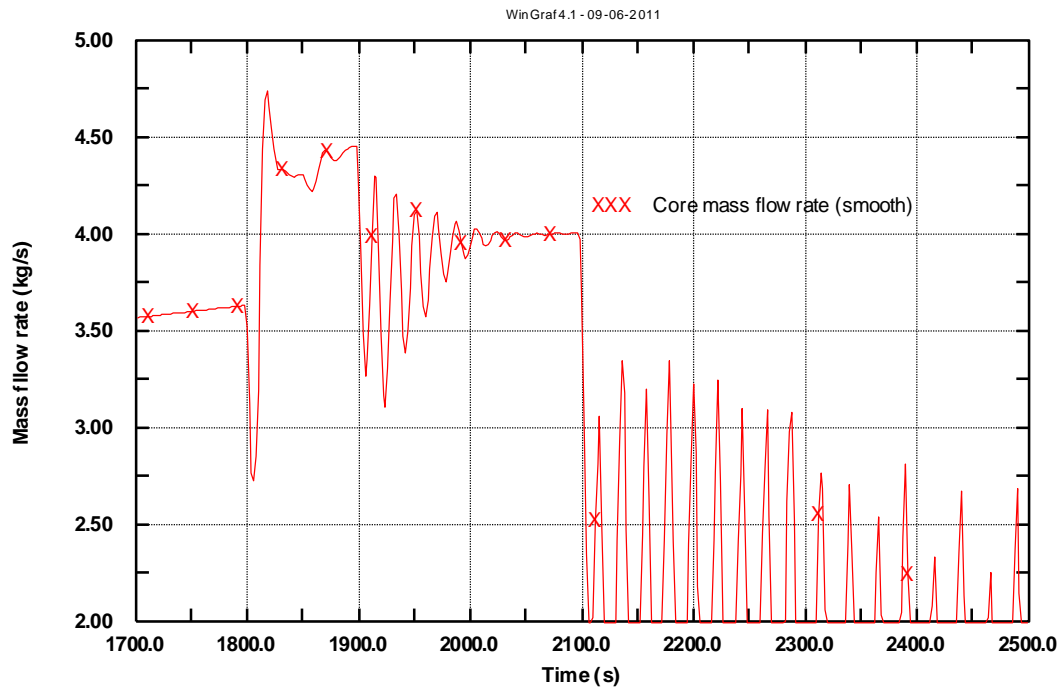


Fig. 25: Portata attraverso il canale di potenza per l'esperimento su SPES2. Circolazione naturale bifase nella fase di drenaggio.

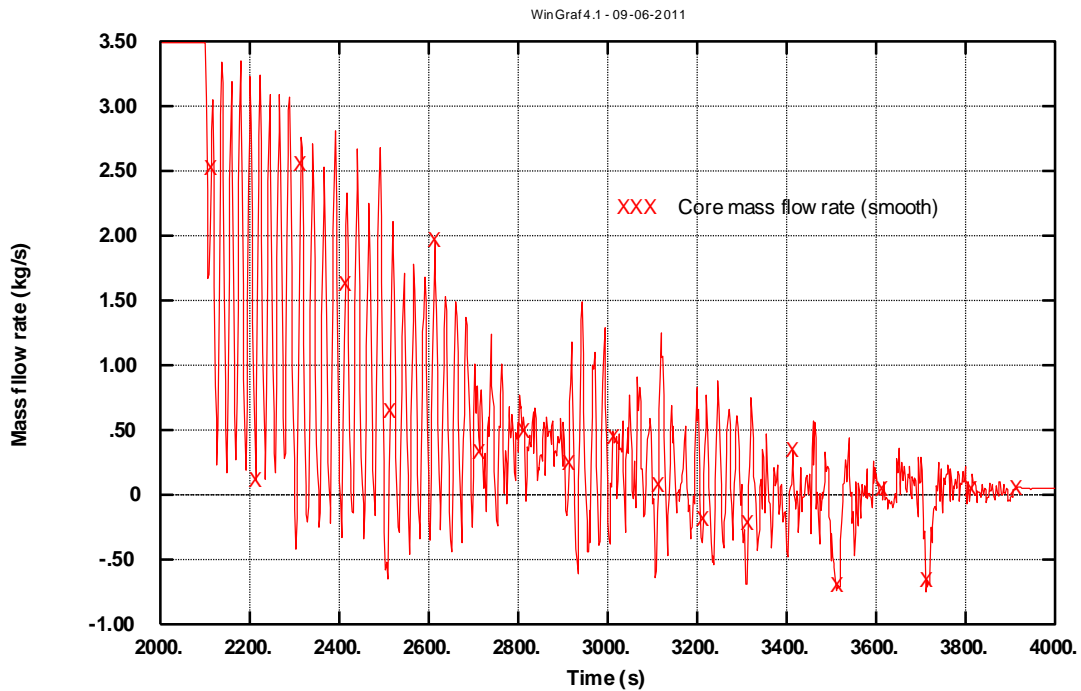


Fig. 26 : Portata attraverso il canale di potenza per l'esperimento su SPES2. Effetto

“Siphon” e “Reflux condenser” nella fase di drenaggio.

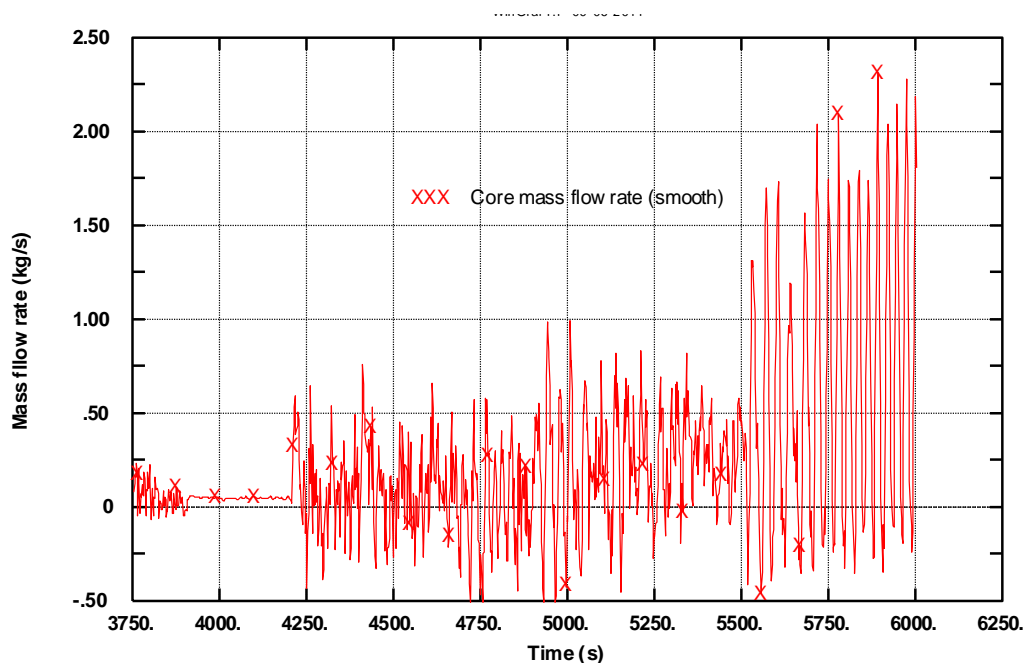


Fig. 27 : Portata attraverso il canale di potenza per l’esperimento su SPES2. Effetto “Siphon” e “Reflux condenser” nella fase d’iniezione.

I risultati ottenuti sono in buon accordo con quelli ottenuti nel test F1.2 effettuato sulla facility PKL. Nelle 28 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati rispettivamente la concentrazione di boro nei 4 loop seal della facility PKL e il valore medio della portata e della massa residua. Le differenze sostanziali notate si riferiscono alla differente localizzazione della massa di acqua deborata: rispettivamente nel loop seal per la facility PKL e nel downcomer per la facility SPES2. Come diretta conseguenza, la zona di accumulo dell’acqua deborata nella facility SPES2 è direttamente collegata con il lower plenum del canale di potenza nel quale avvengono il drenaggio e l’iniezione. Ciò influisce sulla distribuzione del boro e aumenta il mescolamento fra porzioni di acqua borata e non.

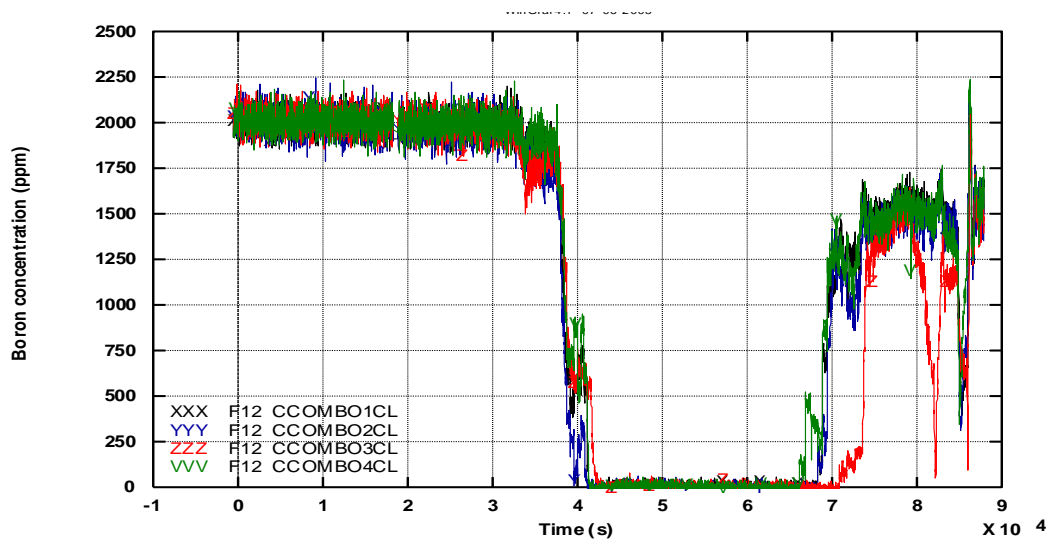


Fig. 28 – Concentrazione di boro nei 4 loop seal per l'esperimento F1.2 condotto sul PKL.

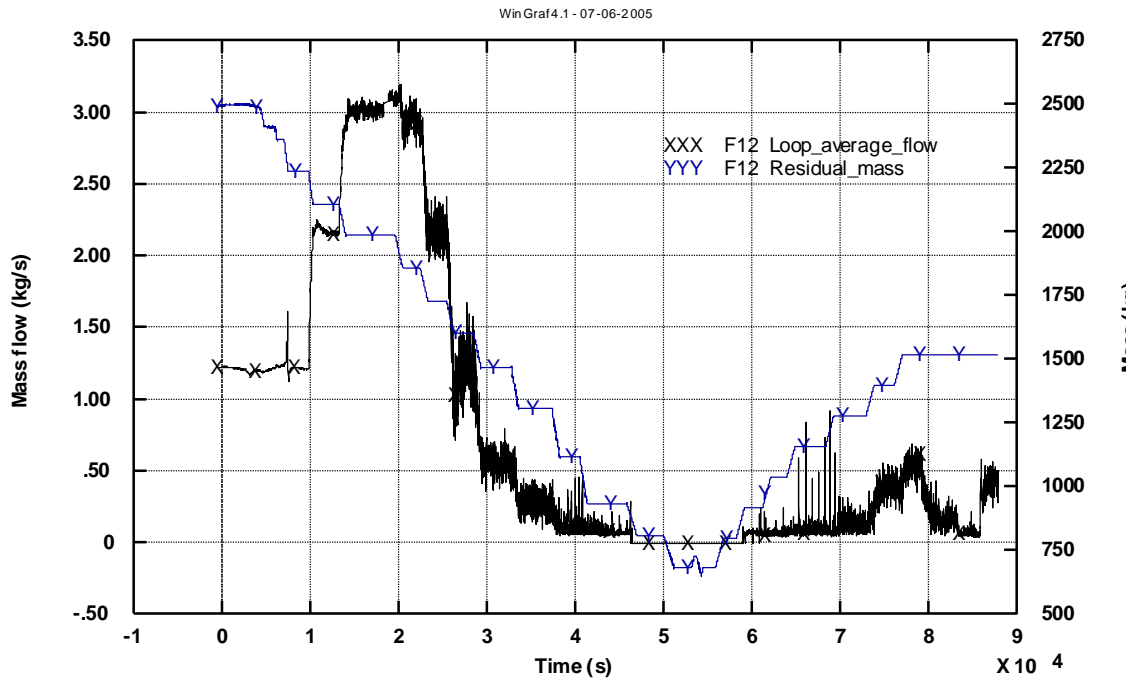


Fig. 29 – Portata media e massa residua per l'esperimento F1.2 condotto sul PKL.

## 7. Conclusioni

Nel presente documento vengono riportati i risultati del calcolo di pre-test F1.2, inizialmente condotto sulla facility PKL e proposto per essere condotto sulla facility SPES2, ottenuti tramite l'impiego di una nodalizzazione Relap5mod3.3 di SPES2 che hanno consentito di definire un nuovo test sperimentale da condurre sulla facility stessa per rilanciarne il futuro utilizzo nell'ambito di un programma internazionale.

Le condizioni iniziali e al contorno del test sperimentale proposto sono state implementate nel calcolo Relap che è stato condotto includendo sia la fase di drenaggio sia quella d'iniezione.

I risultati ottenuti si presentano in buon accordo con quelli ottenuti dall'esperimento condotto sulla facility PKL. Le principali differenze nei risultati sono imputabili alle principali differenze costruttive tra le due facilities:

- la facility PKL riproduce il comportamento termofluidodinamico di un PWR a 4 loops caratterizzato dalla presenza del loop seal, in questa parte del circuito primario nel quale si accumula l'acqua deborata si misura la concentrazione di boro;
- la facility SPES2 riproduce il comportamento termofluidodinamico dell'facility AP600, PWR a 2 loops che non contiene il loop seal. In conseguenza di ciò la porzione di acqua deborata si accumula nel downcomer.
- 

Una ulteriore fonte di differenza nei risultati può essere costituita dalle diverse condizioni iniziali, infatti:

- durante l'esecuzione del test condotto sul PKL la pressione del secondario è controllata in modo da ottenere, istante per istante, i valori scelti per i parametri significativi del circuito primario;
- nei calcoli condotti su SPES2, non essendo possibile la regolazione della pressione del secondario, il valore della pressione lato secondario è assunto costante selected.

In ogni caso, i calcoli effettuati dimostrano che il test F.1.2 scelto per essere riprodotto sulla facility SPES2 riproduce gli stessi risultati osservati sulla facility PKL: evidenziano cioè la presenza del fenomeno di "boron dilution" durante un ipotetico incidente di SBLOCA per un impianto nucleare indipendentemente dalla presenza all'interno del circuito primario del loop seal.

## 8. Riferimenti bibliografici

- [1] Senior Expert group report on facilities and programmes (SESAR/FAP): Major facilities and programmes at risk; Nuclear safety research in OECD countries; Draft 08 July 1999;
- [2] M. Rigamonti, SPES-2 Facility description, SIET 00 183 RI 92, Rev.1. Piacenza, 6-12-95;
- [3] C. D. Fletcher, R.R. Scuhltz, RELAP5/MOD3.3 Code manual, NUREG/CR-5535, INEL-95/174, Idaho National Engineering Laboratory, Gennaio 2002;
- [4] R. Ferri, "SPES-99 10" IB-LOCA in Cold Leg. Experimental data report". SIET 00 777 RP 99, Piacenza; Nov. 26th, 1999.
- [5] Mull, T., Results of OECD-PKL Test F1.2: Inherent Boron Dilution due to Reflux-Condenser Conditions as a Function of the Primary Coolant Inventory, OECD-PKL 3rd PRG-MB Meeting, Paris, France, April 11-12, 2005
- [6] W. Giannotti, Pre-test calculation of the proposed experimental test F1.2 to be performed in SPES2 ITF, Contract between ENEA and Studio Associato di Ingegneria BGS ENEA/2011/30169/UTFISSM, 6/09/2011