



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato in Energia indirizzo Energetica - XXVI ciclo
Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici DEIM
Settore Scientifico Disciplinare ING/IND-19

ANALISI DI RISCHIO DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE "SELECTIVE PRODUCTION OF EXOTIC SPECIES" (SPES) DELL'INFN DI LEGNARO

IL DOTTORE
Ing. Gaetano Palermo

IL COORDINATORE
Ch.mo Prof. Aldo Orioli

IL TUTOR
Dott. Ing. Mariarosa Giardina

A mia figlia Ζωη, il dono più prezioso e a mia moglie

Γκολφω...με αγάπη

*A mio papà Vincenzo ... i përjetshëm kloft kujtimi i tij e a mia
mamma Rosalia*

INDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUZIONE | 1 |
| CAPITOLO 1 DESCRIZIONE DEL PROGETTO SPES | 3 |
| 1.1 INTRODUZIONE | 3 |
| 1.2 PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI | 4 |
| 1.3 METODI DI PRODUZIONE DEI FASCI RIB (RADIOACTIVE ION BEAM) | 7 |
| 1.3.1 <i>Il metodo ISOL</i> | 8 |
| 1.4 IL PROGETTO SPES..... | 10 |
| 1.4.1 <i>Il sistema di produzione ed accelerazione dei protoni</i> | 10 |
| 1.4.2 <i>Il complesso target, sistema di estrazione e sistema di ionizzazione</i> | 12 |
| 1.4.3 <i>Il bersaglio di carburo di uranio</i> | 17 |
| 1.4.4 <i>Il complesso di separazione e manipolazione dei fasci</i> | 20 |
| 1.4.5 <i>Edifici</i> | 22 |
| CAPITOLO 2. ANALISI FMECA SUL SISTEMA DI STOCCAGGIO DEI GAS ESAUSTI RADIOATTIVI (RSRG) DI SPES: IMPLEMENTAZIONE DI UNA METODOLOGIA INNOVATIVA BASATO SULLA LOGICA FUZZY..... | 24 |
| 2.1 L'IMPIANTO DI STOCCAGGIO DEI GAS ESAUSTI (RSRG -RECOVERY SYSTEM FOR RADIOACTIVE GASES) | 24 |
| 2.1.1 <i>Introduzione</i> | 24 |
| 2.1.2 <i>Descrizione dell'impianto RSRG</i> | 26 |
| 2.1.3 <i>Studio dei modi di guasto dei componenti dell'impianto RSRG</i> | 30 |
| 2.2 IL METODO FUZZY FMECA | 39 |
| 2.2.1 <i>Introduzione</i> | 39 |
| 2.2.1 <i>Modifiche proposte per la valutazione dell'indice FRPN</i> | 48 |
| 2.2.2 <i>Valutazione dell'opinione degli esperti</i> | 49 |
| 2.2.3 <i>Esempio di valutazione dell'indice FRPN</i> | 49 |
| 2.3 RISULTATI DELL'ANALISI FMECA | 53 |
| 2.3.1 <i>Risultati dell'analisi FMECA riguardante il processo di stoccaggio dei gas radioattivi durante i test sperimentali</i> | 53 |
| 2.3.2 <i>Risultati dell'analisi fuzzy FMECA riguardante il processo di scarico dei gas radioattivi in atmosfera</i> | 60 |
| CAPITOLO 3..... ANALISI DI SICUREZZA DEL SISTEMA DI REFRIGERAZIONE DEL TARGET DI SPES CON UN APPROCCIO INTEGRATO HAZOP E RELAP5-3D | 63 |
| 3.1 INTRODUZIONE | 63 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.2 | DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO DI REFRIGERAZIONE DEL TARGET DI SPES | 65 |
| 3.3 | ANALISI HAZOP DEL SISTEMA DI REFRIGERAZIONE DEL TARGET DELL'IMPIANTO SPES..... | 72 |
| 3.3.1 | <i>Introduzione</i> | 72 |
| 3.3.2 | <i>Descrizione della procedura di avviamento dell'impianto SPES</i> | 73 |
| 3.3.3 | <i>Risultati dell'analisi Hazop</i> | 75 |
| 3.4 | SIMULAZIONI DI ALCUNI EVENTI INCIDENTALI CON CODICE RELAP5-3D | 78 |
| 3.4.1 | <i>Introduzione</i> | 78 |
| 3.4.2 | <i>Schematizzazione RELAP5 dell'impianto di refrigerazione</i> | 79 |
| 3.4.3 | <i>ANALISI DEI TRANSITORI LOCA</i> | 86 |
| 3.4.4 | <i>ANALISI DEL TRANSITORIO OVERPOWER</i> | 101 |
| | CONCLUSIONI | 109 |
| | BIGLIOGRAFIA | 117 |
| | APPENDICE | 120 |
| | A1 ESEMPIO DI SCHEDE FMECA PER L'IMPIANTO RSRG COMPILATE CON IL SOFTWARE RAD | 120 |
| | A2 SCHEDE ANALISI HAZOP FASE DI RAMP-UP | 133 |
| | A3 SCHEDE ANALISI HAZOP FASE DI ACCENSIONE DEI RISCALDATORI | 146 |
| | A4 SCHEDE ANALISI HAZOP FASE DI BEAM-ON | 160 |

INTRODUZIONE

Il progetto di ricerca denominato EURISOL (European Isotope Separation On-Line Radioactive Ion Beam Facility), che vede coinvolti i principali laboratori di ricerca nucleari europei, è rivolto allo studio di progettazione e fattibilità di un impianto per la produzione di fasci di nuclei radioattivi posizionati nella cosiddetta “terra incognita” della carta dei nuclidi.

Lo scopo principale è l’esplorazione della materia esotica (nuclei caratterizzati da un eccesso difetto di neutroni), con le sue possibili implicazioni nell’ambito della ricerca di base della fisica nucleare, nelle applicazioni in campo medico e dell’astrofisica, e ancora nello studio dei materiali utilizzati nei reattori nucleari innovativi di IV generazione.

La partecipazione italiana al progetto è coordinata dall' INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), in particolare, dai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) e dai Laboratori Nazionali del Sud (LNS) di Catania.

Presso il centro di ricerca LNL è in fase di realizzazione un impianto sperimentale di tipo ISOL (Isotope Separation On-Line), denominato SPES (Selective Production of Exotic Species), che prevede la produzione di fasci di ioni radioattivi del tipo “neutron-rich” per mezzo di reazioni di fissione indotte dalle collisioni di un fascio di protoni, accelerati da un ciclotrone, su un bersaglio (target) costituito da dischi in carburo di uranio (UCx). Le particelle radioattive generate dalle reazioni di fissione vengono successivamente estratte, ionizzate, separate in massa ed accelerate come fascio di ioni radioattivo per mezzo di un acceleratore lineare.

La produzione di fasci di ioni radioattivi richiede l’impiego di tecnologie estremamente complesse ed innovative, soprattutto per la progettazione del cuore della facility costituito dal target ed dai relativi sistemi di controllo e sicurezza.

L’idea innovativa introdotta dal progetto SPES è la suddivisione del target in sette dischi opportunamente spazati che permette, a parità di volume, di aumentare la superficie di scambio termico e di dissipare la potenza termica

prodotta dal fascio protonico (stimata in circa 8,5 kW) con maggiore efficienza.

L'elevata radioattività presente nel target comporta la necessità di attenti studi di sicurezza volti ad individuare condizioni di funzionamento indesiderate e/o ridurre situazioni incidentali.

L'attività di ricerca svolta nell'ambito del dottorato si è focalizzata sullo svolgimento di analisi di sicurezza riguardanti alcuni dei sistemi più importanti dal punto di vista del controllo e della sicurezza dell'impianto. In particolare, tenendo presente l'aspetto fortemente innovativo di SPES, sono state utilizzate diverse tecniche di analisi del rischio, alcune delle quali sono state modificate con lo scopo di eliminare le lacune contenute nell'applicazione del metodo.

Per lo svolgimento del lavoro di ricerca è stato utilizzato un approccio integrato basato sulla metodologia HAZOP (HAZard and OPerability analysis), che ha consentito di identificare alcuni eventi iniziatori di incidente, e la simulazione delle sequenze fenomenologiche coinvolte negli incidenti individuati attraverso il codice di calcolo termo-fluidodinamico avanzato RELAP5-3D.

Inoltre, per individuare i modi di guasto più critici è stato utilizzato un nuovo approccio della tecnica FMECA (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis), basato sulla logica fuzzy. Per migliorare la metodologia fuzzy FMECA è stata messa a punto una nuova procedura per la valutazione dell'indice di rischio, denominato Fuzzy RPN (FRPN).

I risultati ottenuti hanno consentito di fornire proposte e modifiche progettuali volte a migliorare le prestazioni dell'impianto e/o mitigare le conseguenze di alcune possibili situazioni incidentali.

CAPITOLO 1 DESCRIZIONE DEL PROGETTO SPES

1.1 INTRODUZIONE

Nel corso degli anni l'Europa è diventata leader nel campo della ricerca nucleare e sta pianificando, sotto la guida del CERN di Ginevra, la costruzione di una nuova generazione di impianti per la produzione di fasci radioattivi, con lo scopo di esplorare la materia esotica (nuclei caratterizzati da un eccesso difetto di neutroni) e di fornire un valido strumento per applicazioni di tipo medico ed industriale.

A tale programma partecipano attivamente i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), con il progetto SPES (Study and Production of Exotic nuclear Species), facility sperimentale, in fase di completamento, sarà utilizzata per la produzione di fasci di ioni radioattivi ricchi di neutroni (n-rich) di alta qualità, nel range di massa compreso tra 80 e 160 uma [1], attraverso il processo denominato ISOL (Isotope Separation On-Line).

SPES è inserito in un quadro di ricerca scientifica e sviluppo tecnologico svolto in collaborazione con importanti laboratori nel mondo: Ganil in Francia, Ornl negli Stati Uniti, Triumf in Canada e Kek in Giappone [2].

Accanto alle ricerche di fisica fondamentale che renderanno possibile indagare i processi che portano alla formazione dei nuclei pesanti nelle stelle, SPES prevede lo sviluppo di alcuni programmi nel settore della produzione di sorgenti neutroniche, utilizzabili per differenti scopi tecnologici e biomedici e nel settore della produzione di radionuclidi innovativi per la diagnostica e la terapia in medicina nucleare.

Dal punto di vista della sperimentazione, i punti di forza sono:

- l'intensità dei fasci, 10-100 volte superiore a quanto attualmente disponibile;
- l'alta selezione in massa dei fasci, cioè la capacità di selezionare l'isotopo di interesse con cui formare il fascio tra tutti i nuclei

estratti dalla sorgente;

- la produzione di nuclei con energia 2-3 volte più alta di quella fornita dai migliori sistemi ISOL oggi operanti nel mondo.

Inoltre, l'acceleratore primario di protoni è costituito da un ciclotrone da 70 MeV con due porte di uscita. L'elevata intensità del fascio di protoni e la possibilità di estrarre due fasci indipendenti dal ciclotrone permettono di far funzionare, contemporaneamente agli esperimenti di fisica nucleare, una facility applicativa per lo studio di nuovi radiofarmaci e la ricerca nel campo dei reattori di IV generazione [2].

L'elemento più critico del progetto è il sistema bersaglio-sorgente poiché deve sostenere la potenza del fascio primario, lavorare ad alta temperatura ed in un ambiente ad alta radioattività.

La progettazione termica di questo sistema e la predisposizione di opportuni dispositivi di sicurezza e di controllo rappresentano alcuni degli aspetti del progetto SPES che richiederanno lo sviluppo di tecnologie e metodologie di analisi di sicurezza avanzate ed innovative.

1.2 PRODUZIONE ED UTILIZZO DI FASCI DI IONI ESOTICI

Come è noto, i nuclei stabili possiedono, approssimativamente, ugual numero di neutroni e protoni e costituiscono la cosiddetta "valle di stabilità" nella carta dei nuclidi (figura 1.1)

La stabilità del nucleo è garantita dalla presenza di una intensa forza di attrazione tra i nucleoni, definita interazione forte, che si manifesta con efficacia a distanze inferiori alle dimensioni nucleari e bilancia la repulsione elettrostatica tra i protoni carichi positivamente.

L'interazione forte vincola il moto dei nucleoni attorno alla massa nucleare centrale e, a causa della sua notevole intensità, fa sì che la rottura del nucleo richieda molta energia.

Osservando la Figura 1.1, si nota che per nuclei con numero di massa $A \geq 40$ (si ricorda che $A = Z+N$, con $Z =$ numero di protoni ed $N =$ numero di

neutroni), la forza coulombiana sposta la linea di stabilità lontano dalla retta in cui giacciono i nuclei con numero di protoni uguale al numero di neutroni, verso nuclei ricchi di neutroni, i quali, essendo privi di carica, non alimentano la forza repulsiva elettrostatica.

Si ha, inoltre, che la forza coulombiana limita l'esistenza di elementi superpesanti, dato che il corto raggio di azione della forza nucleare forte non permette un'efficace opposizione alla forza elettrostatica, agente invece più a lungo raggio.

I quadratini neri in figura 1.1 rappresentano i nuclei stabili, mentre i quadratini colorati (in rosso, giallo, verde e azzurro) indicano i nuclei instabili conosciuti. I diversi colori dipendono dalle caratteristiche dei nuclei che determinano i modi di decadimento.

I nuclei con eccesso o difetto di neutroni, lontani dalla valle di stabilità, sono radioattivi e decadono con emissione di particelle (alfa, beta, neutrini,...) e raggi γ .

L'area compresa tra la zona colorata e la linea tratteggiata inferiore contiene i nuclei non conosciuti e costituiscono la cosiddetta terra incognita.

Calcoli teorici prevedono tuttavia l'esistenza di un numero di nuclei esotici molto più elevato (si stima siano oltre 6000). Quindi è possibile che molti di essi siano presenti nella cosiddetta "terra incognita", che comprende la regione ricca di neutroni e quella dei nuclei superpesanti (SHE, Super Heavy Elements).

L'area della terra incognita è delimitata dalla *neutron drip line*, oltre la quale si prevede che non esistano sistemi legati di neutroni e protoni e contiene i nuclei che partecipano al cosiddetto processo-r di cattura rapida di neutroni responsabile della formazione degli elementi pesanti nelle stelle e dei fenomeni che portano alle violenti esplosioni delle supernove.

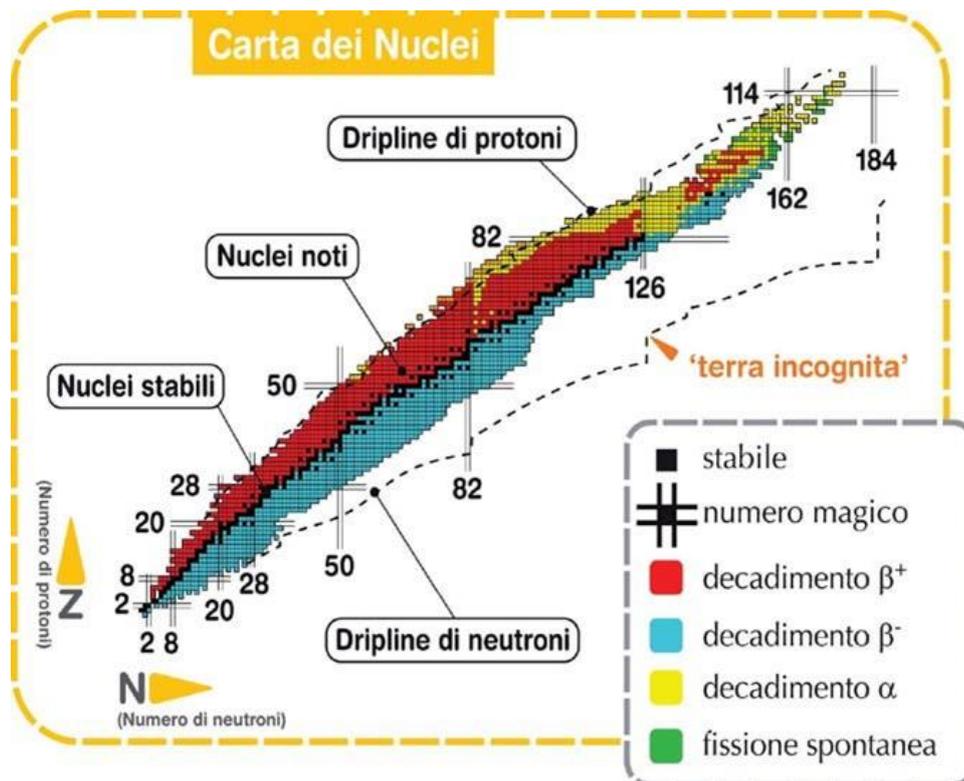


Figura 1.1 - Carta dei Nuclidi

La maggior parte delle conoscenze attuali della struttura nucleare si basa su esperimenti che inducono reazioni nucleari con fasci di ioni stabili su bersagli di nuclei anch'essi stabili. Questo ha limitato lo studio alle specie nucleari che sono vicine alla valle di stabilità. Al di fuori di questa regione abbiamo poche informazioni sul comportamento dei nuclei, soprattutto per quelli ricchi di neutroni.

Per l'utilizzo pratico e la produzione di nuclei instabili, ed in particolare dei nuclei esotici, è necessaria la costruzione di sistemi acceleratori ed attrezzature capaci di garantire fasci di elevata purezza, intensità ed energia.

La tecnica di produzione si basa sul metodo ISOL (Isotope Separation On Line) che utilizza la fissione dell'uranio indotta da un fascio di protoni per produrre i nuclidi esotici da riaccelerare. Un sistema analogo a più bassa potenza denominato EXCYT, in grado di fornire fasci esotici leggeri, è stato realizzato a Catania presso i Laboratori Nazionali del Sud dell'INFN.

Questo impianto è stata una delle installazioni di riferimento per lo sviluppo del progetto SPES.

1.3 METODI DI PRODUZIONE DEI FASCI RIB (RADIOACTIVE ION BEAM)

La produzione di fasci di ioni radioattivi può essere effettuata con diverse metodologie, a seconda del tipo di nuclidi che si intende ottenere. Metodi come la frammentazione, la spallazione, o le reazioni di trasferimento vengono utilizzati per avere nuclei ricchi di protoni (p-rich), mentre reazioni di fissione nucleare, indotte da nucleoni (protoni o neutroni) o attraverso fotofissione, vengono utilizzate per produrre nuclei ricchi di neutroni (n-rich). In quest'ultimo caso, la produzione degli isotopi all'interno del bersaglio è ottenuta principalmente tramite il processo di fissione.

Il progetto SPES prevede un target in cui la fissione avviene mediante bombardamento protonico di dischi in carburo di uranio (UCx).

Tuttavia, la reazione di produzione non è un processo selettivo: diversi nuclei, oltre quello di interesse, vengono prodotti contemporaneamente per cui, se si vuole ottenere un fascio finale quanto più puro possibile, i prodotti di reazione devono essere selezionati in massa e numero atomico [3].

Esistono due metodi per produrre fasci di nuclei radioattivi: il metodo IN-FLIGHT e il metodo ISOL, quest'ultimo utilizzato nel progetto SPES.

Lo schema di funzionamento delle due tecniche viene riportato in figura 1.2.

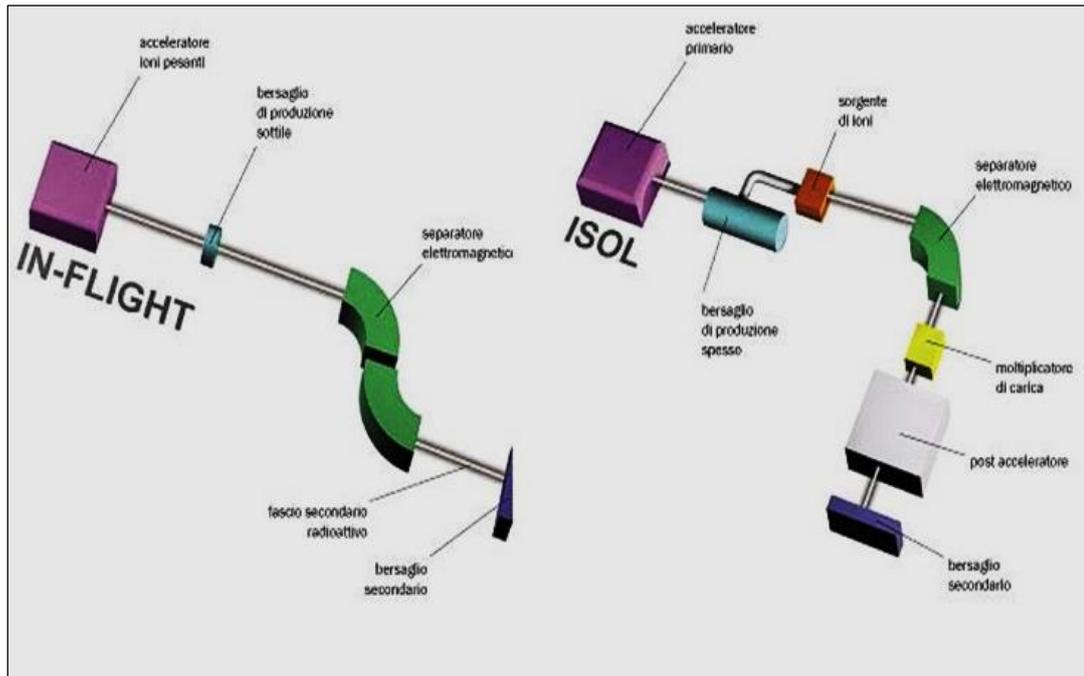


Figura 1.2 – Schemi di processo per le tecniche IN-FLIGHT e ISOL

La tecnica IN-FLIGHT consiste nell'interazione di un fascio primario di alta energia su un bersaglio sottile. Le reazioni tra proiettile e bersaglio sono di fissione o di frammentazione, in entrambi i casi i nuclei prodotti mantengono una elevata velocità e quindi non c'è bisogno di post-accelerazione. È necessario, invece, separare i nuclei più interessanti da tutti gli altri nuclei prodotti durante l'interazione. L'insieme di nuclei ottenuti viene perciò analizzato "in volo", mentre è trasportato nelle sale sperimentali.

La tecnica ISOL utilizza la separazione degli isotopi in linea, come descritto in dettaglio nel paragrafo successivo.

1.3.1 Il metodo ISOL

I principali costituenti di questo tipo di impianto sono:

- l'acceleratore primario;
- il complesso target-sistema di estrazione e ionizzazione;
- i separatori di massa ed isobari;
- il post acceleratore.

Un fascio di particelle della voluta energia, proveniente dall'acceleratore

primario, viene fatto collidere con il target di materia fissile, ottenendo così la produzione degli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari (fissione, spallazione, frammentazione, ecc.). Attraverso un opportuno sistema, i radioisotopi vengono estratti e ionizzati e, in questo modo, potranno essere accelerati per differenza di potenziale.

Il primo stadio di accelerazione avviene nel front end, il quale attira gli ioni e li invia verso dei separatori elettromagnetici all'interno dei quali il fascio viene selezionato e purificato.

Successivamente, gli ioni vengono post accelerati al livello di energia richiesto dal particolare esperimento. L'intensità del fascio radioattivo prodotto è usualmente descritta dalla seguente equazione:

$$I = \sigma \cdot \Phi_{PB} \cdot N \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 \quad (1)$$

dove σ è la sezione d'urto per le reazioni nucleari, Φ_{PB} è l'intensità del fascio primario, N è lo spessore del target, Q_1 è l'efficienza di rilascio del target, Q_2 è l'efficienza di ionizzazione e Q_3 è l'efficienza del processo di estrazione.

Una corretta configurazione del complesso target, sistema di estrazione e sistema di ionizzazione è cruciale per un efficiente funzionamento di una facility di tipo ISOL.

La separazione dei prodotti radioattivi dal substrato del target e l'estrazione dei nuclei esotici sono processi fortemente dipendenti dalla temperatura. In particolare, all'aumentare del livello termico, la diffusione delle particelle risulta agevolata. Chiaramente, più breve è la vita media degli atomi radioattivi, più rapido deve essere il tempo di rilascio e, di conseguenza, il sistema deve essere mantenuto alla più alta temperatura possibile, tenendo presente i limiti di degradazione dei materiali che ne costituiscono i componenti.

1.4 IL PROGETTO SPES

Il progetto consentirà di condurre attività sperimentali per la produzione di nuclei radioattivi *neutron-rich* attraverso reazioni di fissione indotte dalle collisioni di un fascio di protoni su un bersaglio costituito da dischi in UCx, con una resa massima di 10^{13} fissioni/s.

Il fascio di protoni utilizzato per la fissione avrà energia di 40 MeV e 200 μ A di corrente (per una potenza totale di circa 8,5 kW).

Il livello di radioattività stimato nel target è molto elevato, per cui è necessaria la progettazione di speciali infrastrutture capaci di garantire la sicurezza in termini di radioprotezione.

Viene di seguito fornita una descrizione dei componenti principali appartenenti alla RIB facility, attualmente in fase di costruzione presso il centro di ricerca LNL.

1.4.1 Il sistema di produzione ed accelerazione dei protoni

SPES utilizzerà come acceleratore primario il ciclotrone P70 della “Best Theratronics” (figura 1.3) in grado di garantire le caratteristiche di fascio richieste per la produzione di fasci di ioni esotici e allo stesso tempo offrire la possibilità di utilizzare una seconda linea di fascio in modo completamente indipendente. Il ciclotrone è stato da poco installato all'interno del building di SPES ed è in fase di collaudo.

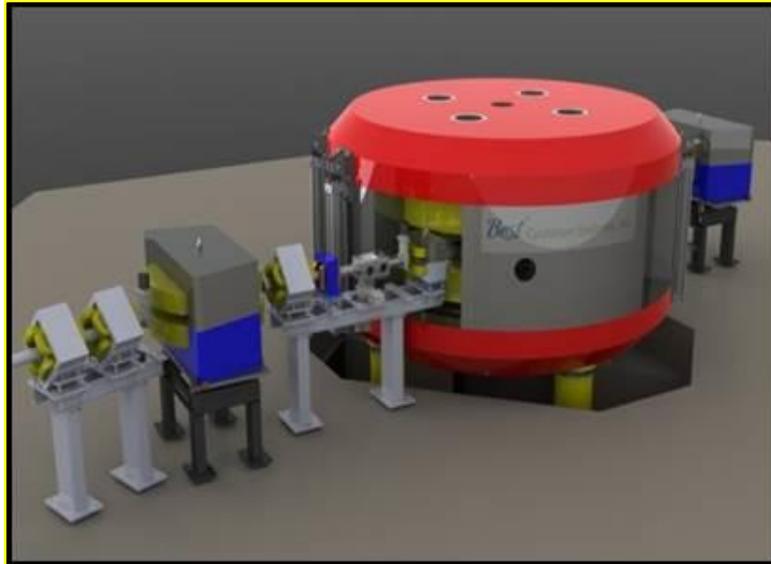


Figura 1.3 - Acceleratore primario “Best Theratronics” del progetto SPES

1.4.1.1 Il post acceleratore

Dopo l’accelerazione ottenuta con le piattaforme di alta tensione, il fascio viene indirizzato verso l’acceleratore PIAVE-ALPI (acceleratore LINAC superconduttore). In figura 1.4 è raffigurato il layout della facility SPES e del post acceleratore.

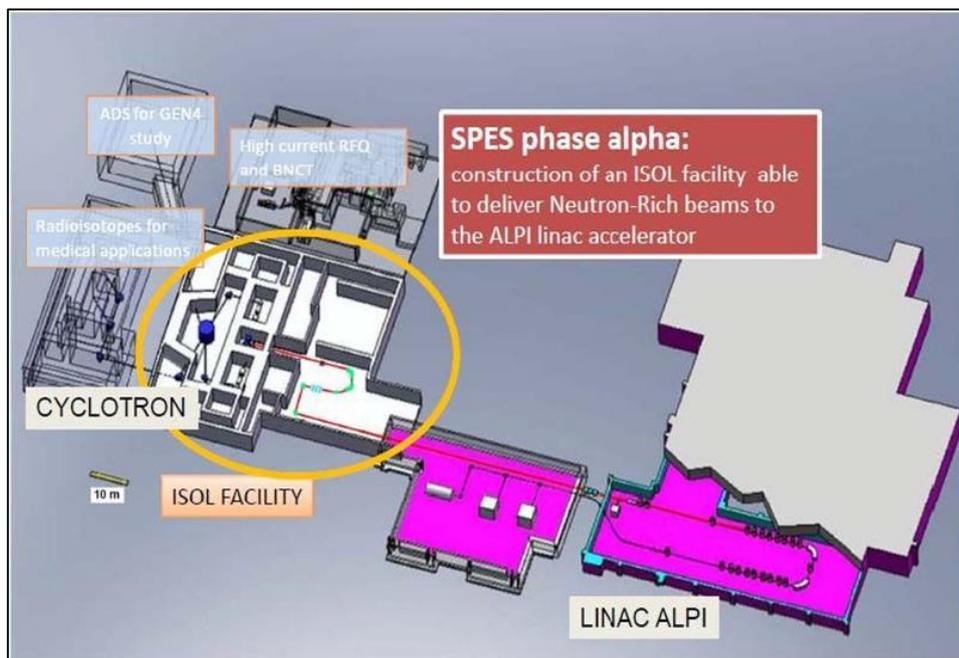


Figura 1.4 - Layout dell'impianto SPES e del post-acceleratore PIAVE-ALPI

Il complesso PIAVE-ALPI è in funzione da molti anni e recentemente è stato sottoposto ad un numero significativo di miglioramenti ed ora può essere impiegato come acceleratore per il fascio RIB.

1.4.2 Il complesso target, sistema di estrazione e sistema di ionizzazione

Il fascio secondario di ioni radioattivi è prodotto in un apparato chiamato “target chamber” che contiene il target, sul quale vengono fatti collidere i protoni del fascio primario provenienti dal ciclotrone (figura 1.5).

A causa delle alte temperature, per evitare l’ossidazione dei componenti presenti, l’interno della camera viene mantenuto in condizioni di alto vuoto (con pressione dell’ordine dei 10^{-6} mbar). La mancanza di atmosfera è, inoltre, necessaria per aumentare il cammino libero medio delle particelle radioattive prodotte. Il volume della camera è delimitato dallo spallamento di una flangia (plate) e da un coperchio (cover) a forma di pentola, entrambi realizzati in lega di alluminio, mentre la tenuta a vuoto è garantita da un O-Ring.

Il target block è rappresentato in figura 1.6 assieme ai sub-assemblies che lo compongono: il production target; il sistema di riscaldamento del target o “target heating system” ed, infine, la “transfer line”, attraverso cui gli atomi radioattivi vengono trasportati dal production target sino alla ion source per effusione¹.

Per aumentare la mobilità degli atomi, la transfer line è generalmente mantenuta ad elevate temperature per effetto Joule facendo uso dello stesso circuito elettrico adottato per riscaldare la ion source.

¹ In chimica-fisica, l'effusione è il processo tramite il quale le molecole gassose attraversano un foro sottile senza collidere fra loro. Ciò avviene quando il diametro del foro è considerevolmente più piccolo del cammino libero medio delle molecole.

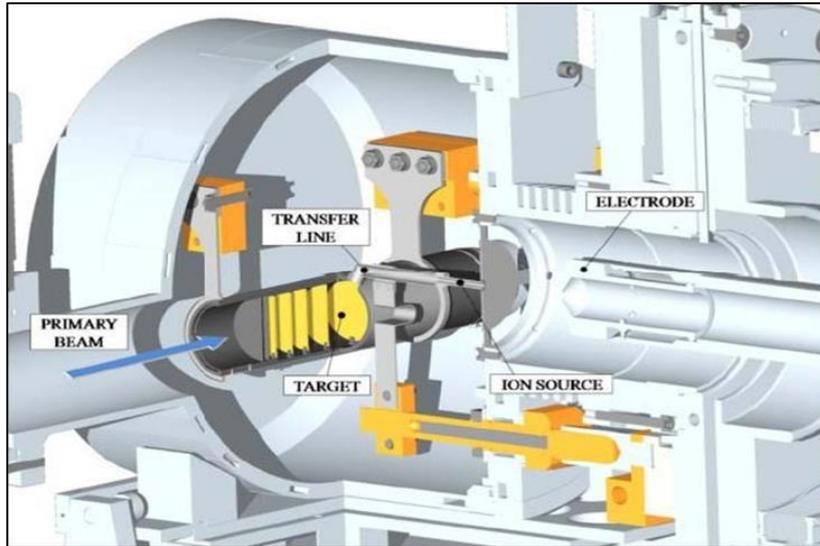


Figura 1.5 - Rappresentazione grafica del complesso target, sistema di estrazione, e sistema di ionizzazione

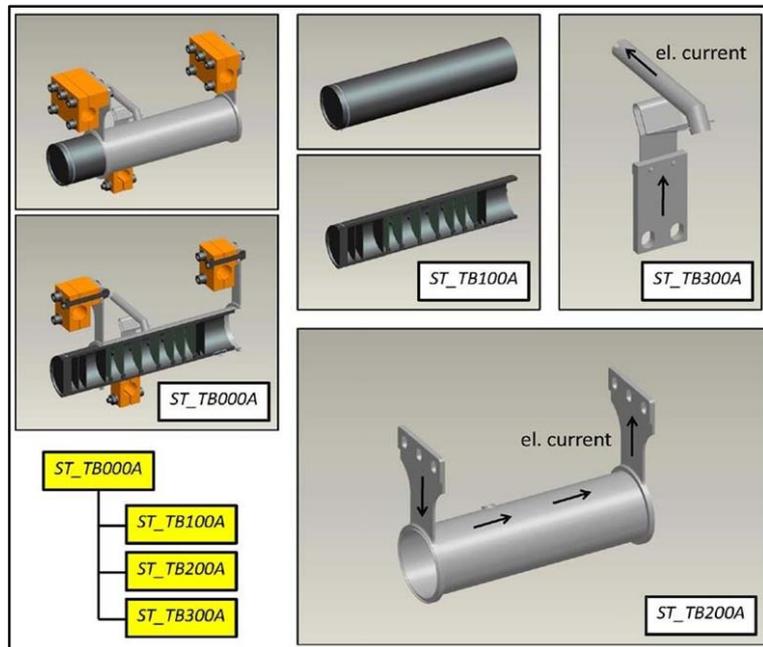


Figura 1.6 - Il target block SPES ST_TB000A e i suoi principali sub-assemblies: il production target ST_TB100A, il target heating system ST_TB200A e la transfer line ST_TB300A

La figura 1.7 mostra il primo prototipo del target block ST_TB000, testato ad alta temperatura presso i LNL, dando un contributo fondamentale per lo sviluppo dell'attuale target block ST_TB000A.

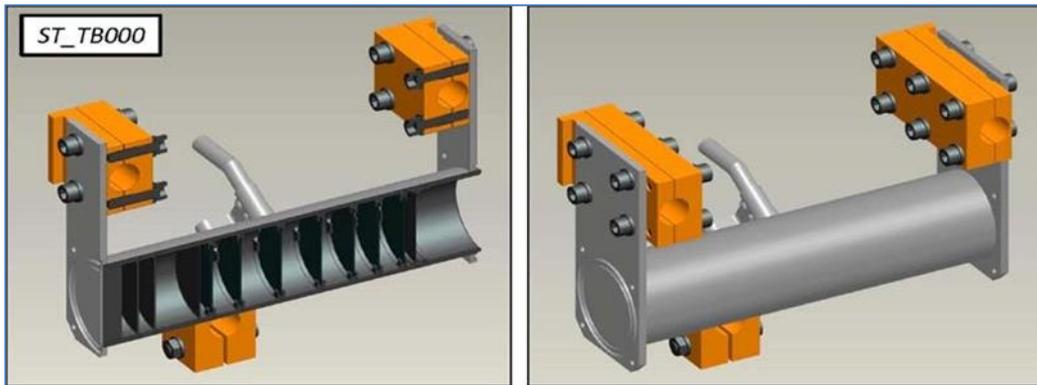


Figura 1.7 - Il primo prototipo del target block SPESST_TB000

Il production target (vedi figura 1.8) è composto da 7 dischi coassiali di UCx (diametro e spessore rispettivamente di 40 e 1,3 mm), opportunamente distanziati in direzione assiale al fine di dissipare, per irraggiamento termico, la potenza media di 8,5 kW depositata dal fascio di protoni che li attraversa.

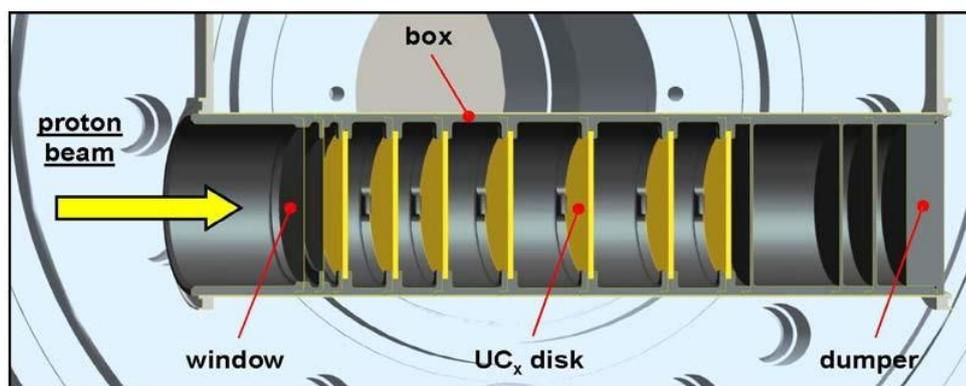


Figura 1.8 - Rappresentazione dello SPES production target e dei principali componenti (dischi di UCx, finestre, dumpers e contenitore)

Due sottili finestre circolari in grafite (0,2 mm) si trovano all'ingresso del fascio di protoni per evitare la fuoriuscita di frammenti nucleari, mentre quattro dumper circolari di grafite (figura 1.9), con spessori che vanno da 0,8 mm fino a 10 mm, fermano il fascio di protoni sul lato opposto alle finestre.

Tutti i dischi, le finestre e i dumper si trovano all'interno di una scatola tubolare in grafite, con un diametro esterno e una lunghezza rispettivamente di 49 mm e 200 mm.

La scatola si trova sotto vuoto all'interno della "target chamber",

quest'ultima raffreddata ad acqua attraverso un sistema di refrigerazione dedicato, che consente di mantenere la temperatura media al valore di circa 2000 °C.

In figura 1.9 è riportato il corrispondente tasso di produzione di isotopi “nel-target” [5].

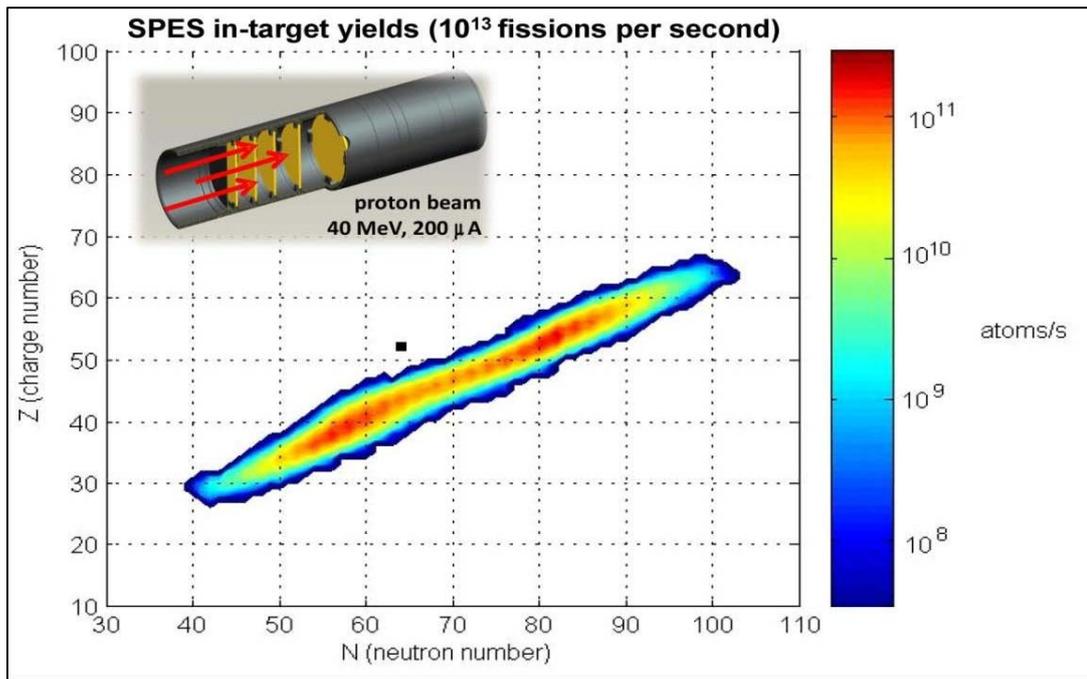


Figura 1.9 - Rappresentazione della produzione di isotopi in target

La potenza del fascio primario di protoni non è sufficiente per riscaldare il contenitore del target fino al livello di temperatura richiesto a causa dell'intenso scambio radiativo di calore [9]. Di conseguenza, è fondamentale introdurre un riscaldamento supplementare.

E' importante sottolineare che il dispositivo di riscaldamento è completamente indipendente dal fascio di protoni e consente un miglior controllo termico del target quando la potenza del fascio di protoni non è stabilizzata, cioè durante le procedure d'avvio e di spegnimento.

Il target heating system in figura 1.10 è costituito da un sottile tubo di tantalio (Ta), con una lunghezza di 200 mm, diametro esterno e spessore rispettivamente di 50 mm e 0,35 mm.

Ai bordi del tubo, sono saldate due ali di tantalio direttamente collegate ai

morsetti di rame, attraverso i quali la corrente elettrica fornita da un alimentatore di 10 kW (corrente massima $I_{\max} = 1000$ A e massima tensione $\Delta V_{\max} = 10$ V) riscalda per effetto Joule il tubo. La scelta del tantalio è dovuta alle sue proprietà fisiche: è un metallo altamente resistente alla corrosione, buon conduttore elettrico e termico, in grado di resistere alle alte temperature. Inoltre, grazie alla sua bassa emissività (0,15 a 1000 °C e 0,26 a 2000 °C), è in grado di schermare in modo efficiente il contenitore del target, limitando l'effetto di raffreddamento per irraggiamento termico [6].

Nel corso degli ultimi anni, sono stati eseguiti studi teorici e sperimentali del comportamento termico-elettrico del target che hanno portato a tutte una serie di modifiche sul design del target block e dei suoi principali componenti [7]. In figura 1.11 e 1.12 è raffigurato il nuovo target e il sistema di riscaldamento.

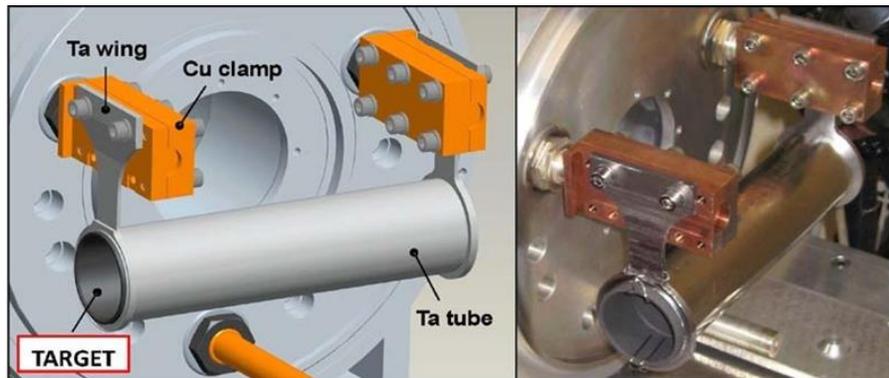


Figura 1.10 – Rappresentazione e foto del prototipo del target heating system

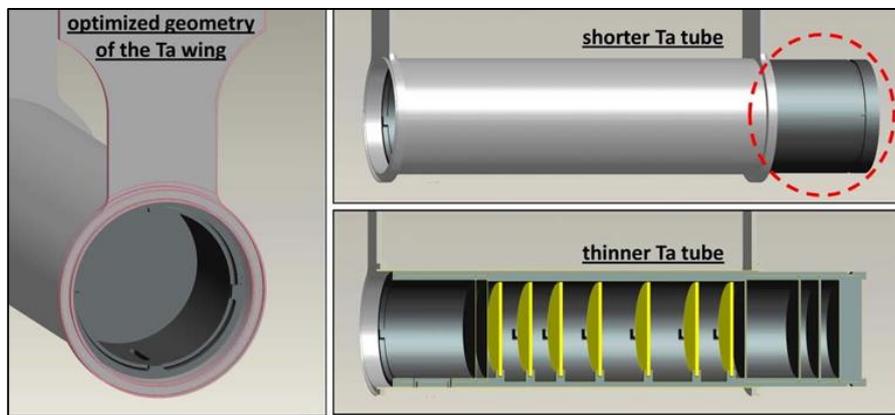


Figura 1.11 – Rappresentazione del nuovo target

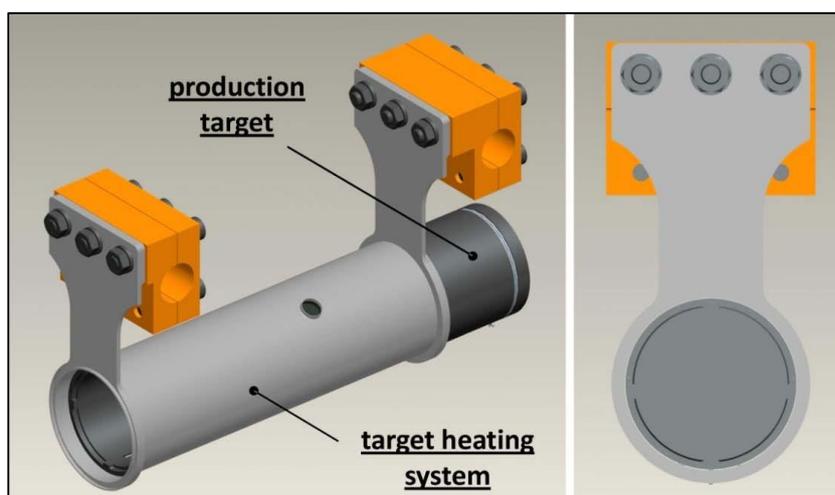


Figura 1.12 - Nuovo schema del production target e sistema di riscaldamento

In particolare, il sistema di riscaldamento con tubo di tantalio è stato ridotto al fine di contenere il riscaldamento della parte posteriore del bersaglio. Rispetto al primo prototipo (con il contenitore di grafite completamente coperto dal tubo in Ta), una parte della grafite scambia calore, per irraggiamento termico, direttamente con le superfici interne della camera a vuoto, sfruttando l'alta emissività della grafite per diminuire a livello locale (nella parte posteriore) la temperatura del target.

Lo spessore del tubo di Ta è stato ridotto per aumentare la sua resistenza elettrica e, quindi, la potenza depositata per effetto Joule. Questa modifica relativamente semplice migliora le prestazioni del sistema di riscaldamento del target. Un altro aspetto importante da menzionare è, infine, l'ottimizzazione della forma dell'ala in Ta, che ha ridotto lo squilibrio di temperatura tra il tubo e le ali stesse.

1.4.3 Il bersaglio di carburo di uranio

Per il modo di funzionamento di riferimento il bersaglio all'interno del quale avvengono le reazioni di fissione è costituito da un bersaglio UC_x, costituito da sette dischetti aventi 40 mm di diametro e circa 1 mm di spessore.

L'uranio utilizzato è uranio naturale, mentre le reazioni di fissione

avvengono sui nuclei dell'isotopo di massa 238.

Il numero totale di fissioni all'interno del bersaglio è di 10^{14} fissioni al secondo. L'attività radiologica del bersaglio, associata a questo valore, costituisce il dato di dimensionamento dell'installazione dal punto di vista della sicurezza nucleare e della radioprotezione.

Il fascio di protoni prima di impattare contro i dischi attraversa due finestre in grafite (definite windows di spessore ridotto, per non attenuare l'intensità del fascio) in grado di schermare la zona attiva e di evitare un eccessivo raffreddamento del materiale fissile in corrispondenza dell'ingresso del fascio. Dopo aver investito le due finestre di grafite e i dischi di UCx, il fascio primario va ad impattare su tre dumper e sul fondo scatola (box base): questi elementi provvedono a bloccare il fascio, evitando la fuoriuscita di particelle dal lato posteriore del target.

Al fine di migliorare l'estrazione dei prodotti di fissione, la box viene mantenuta ad una temperatura media di 2000°C utilizzando due fonti di calore: il riscaldamento generato dal fascio di protoni ed il riscaldatore a corrente elettrica, descritto in precedenza. Regolando la corrente elettrica che scorre lungo l'heater fino a 1300 A il sistema di riscaldamento supplementare permette di ambientare termicamente il target durante i transitori, evitando improvvisi sbalzi di temperatura pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi.

I prodotti di fissione sono principalmente dei radionuclidi di massa atomica compresa tra 65 e 160, corrispondenti ai radio-elementi che vanno dal Nichel all'Europio. In figura 1.13 è riportato lo spettro dei radionuclidi prodotti nel bersaglio.

I due "massimi" dello spettro rappresentano i radionuclidi maggiormente prodotti e sono in corrispondenza delle masse 91 e 140 (in grassetto i nuclei prevalenti):

- **massa 91:** ^{91}Y , ^{91}Kr , ^{91}Sr , ^{91}Rb
- **massa 140:** ^{140}Pr , ^{140}I , ^{140}Ba , ^{140}Xe , ^{140}Cs , ^{140}La

L'attività prodotta nel bersaglio raggiunge un livello costante (saturazione) dopo qualche decina di ore d'irraggiamento. L'attività massima è stata stimata essere dell'ordine di 6×10^{14} Bq (vedi figura 1.14), di cui 4×10^7 Bq di alfa-emettitori.

Il rateo di dose equivalente corrispondente a questa attività è stato stimato essere circa 60 Sv/h, ad 1 metro di distanza e senza schermature. La stessa figura mostra il tempo di decadimento del target dopo un periodo di irraggiamento continuo di 90 giorni (periodo medio di utilizzo del target). Dopo un anno dall'irraggiamento l'attività totale del target è diminuita fino ad un valore di circa 2×10^{12} Bq, che corrisponde ad un rateo di dose equivalente di 150 mSv/h (senza schermature e ad 1 metro di distanza). Il dettaglio dell'attività del target irradiato è riportato nella tabella 1.1.

Oltre al modo di funzionamento di riferimento, l'installazione SPES permette di irraggiare un bersaglio di UCx di bassa densità, oppure altri bersagli di materiale fissile di diversa natura, anche con fasci di protoni di energia inferiore a quella nominale. In tal caso i ratei di produzione sono al massimo di 10^{13} fissioni al secondo.

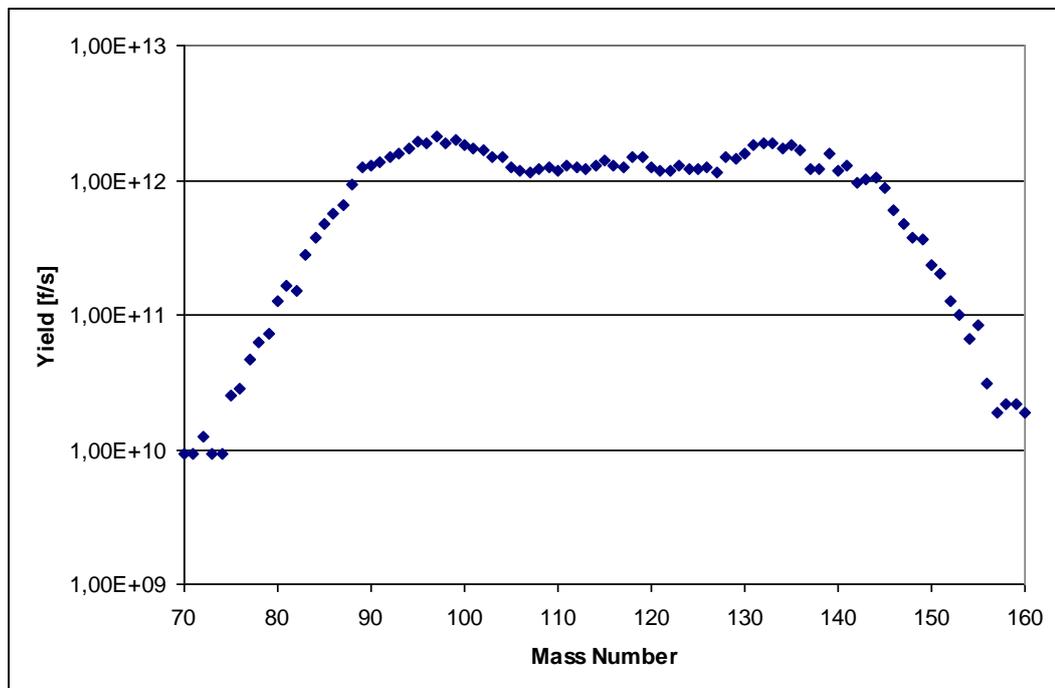


Figura 1.13 - Spettro dei radionuclidi prodotti nel bersaglio

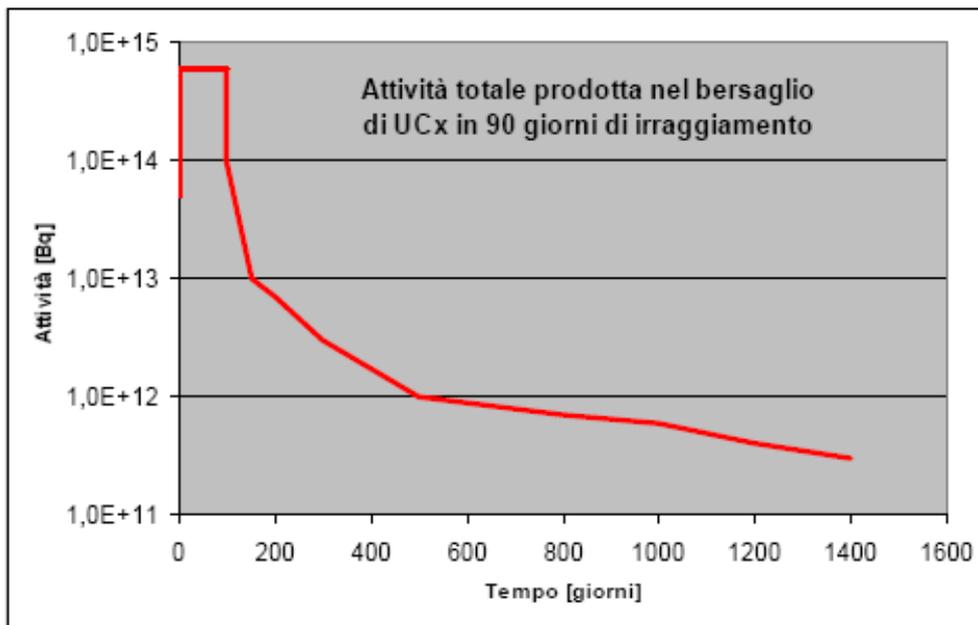


Figura 1.14 - Attività totale prodotta nel bersaglio dopo 90 giorni di irraggiamento continuo e relativo tempo di decadimento

Tabella 1.1 - Attività stimata dei vari elementi prodotti nel bersaglio di UCx, per 10^{14} fissioni/secondo.

| | |
|--|----------------------|
| Attività totale massima [Bq] | 6×10^{14} |
| Attività totale dopo 1 anno di decadimento [Bq] | 2×10^{12} |
| Massima attività- $\beta\gamma$ [Bq] | 5.7×10^{14} |
| Massimo rateo di dose equivalente di gamma a 1 metro senza schermatura [$\mu\text{Sv/h}$] | 6.3×10^7 |
| Massimo rateo di dose equivalente di gamma a 1 metro senza schermatura dopo 1 anno di decadimento [$\mu\text{Sv/h}$] | 1.5×10^5 |

1.4.4 Il complesso di separazione e manipolazione dei fasci

Il processo di separazione viene realizzato durante la seconda fase di accelerazione del fascio. L'accelerazione avviene tramite potenziali elettrostatici tali da portare il fascio ad una energia pari a 260 keV.

La target chamber ed il front end vengono mantenuti ad un potenziale pari a 200 kV mentre la sorgente di ionizzazione ad un potenziale elettrico di 260 kV. L'elettrodo estrattore, che fa parte del front end, si trova dunque a -60 kV rispetto alla sorgente di ionizzazione, consentendo di estrarre gli ioni

positivi prodotti in quest'ultima. In questo modo vengono migliorate le risoluzioni dei sistemi elettromagnetici di selezione del fascio, si fornisce al fascio l'energia necessaria per essere direttamente iniettato nel post-acceleratore PIAVE-ALPI, o si può utilizzare il fascio senza riaccelerazione. Un apparato chiamato "Beam Cooler" permette di migliorare le caratteristiche di emittanza² del fascio ed è utilizzato per migliorare le capacità di selezione del fascio nello spettrometro ad alta risoluzione.

Il Beam Cooler agisce come una trappola per il fascio di ioni in ingresso: al suo interno gli ioni vengono fermati e con un sistema di quadrupoli a radio frequenza, il fascio viene focalizzato, estratto e trasmesso al separatore di massa ad alta risoluzione. Per frenare il fascio è necessario che anche il Beam Cooler sia installato su una piattaforma a 260 kV, che si trova però in un'area a bassa radioattività e non presenta gli stessi problemi operativi della piattaforma di produzione.

Sono presenti dei separatori elettromagnetici HRMS (High Resolution Mass Spectrometer) che hanno il compito di "purificare" il fascio permettendo la raccolta selettiva degli ioni desiderati in uscita. In una prima fase di purificazione, attraverso un separatore di massa di risoluzione 1/100, viene intrappolata la maggior parte dei contaminanti prodotti nel bersaglio-sorgente.

Per avere un fascio "pulito" è però necessario arrivare a risoluzioni superiori a 1/15000. Infatti, solo in questo modo si possono separare gli isotopi con stesso numero di massa (isobari) come ad esempio il ¹³²Cs e lo ¹³²Sn.

Per migliorare la capacità di selezione dei separatori isobarici è necessario operare con un'energia in ingresso dell'ordine dei 200 keV. In seguito a

² Nella tecnica degli acceleratori di particelle, per particelle cariche in un campo magnetico, l'emittanza orbitale o geometrica (o anche radiale o trasversa) è una grandezza misurata dall'area dell'ellisse descritta dalle particelle nello spazio delle fasi (usualmente espressa in mm mrad) divisa per π . Per 'spazio delle fasi' si intende qui lo spazio (x, x', z, z') dove x e z sono due coordinate ortogonali nel piano normale alla traiettoria di riferimento del fascio, descritta dal versore s , e dall'ascissa curvilinea s , e gli apici indicano le derivate rispetto a s .

questo processo di selezione e prima dell'iniezione del fascio nel post acceleratore PIAVE-ALPI, è necessario passare ad un più elevato stato di carica rispetto all' $1+$ ottenuto dalla sorgente. Infatti, PIAVE-ALPI accetta un fascio con rapporto Massa/Carica tra 5 e 7 per accelerare gli ioni alle energie di interesse per la fisica nucleare (5-10 MeV/nucleone). L'incremento dello stato di carica è ottenuto con un "Charge Breeder", un dispositivo in grado di incrementare la carica degli ioni eccitando selettivamente gli elettroni legati al nucleo tramite onde radio di frequenza opportuna. Anche questo strumento deve essere installato su una piattaforma a 260 kV [4].

1.4.5 Edifici

La figura 1.15 rappresenta una vista generale degli edifici dell'installazione SPES. L'acceleratore primario (driver) e l'insieme dei locali tecnologici afferenti sono disposti in un edificio specifico, denominato "edificio driver". L'insieme è disposto a livello del suolo. Delle gallerie nel sottosuolo permettono il passaggio delle varie connessioni (cavi, tubi di raffreddamento, radiofrequenza, criogenia) ed ospitano l'installazione di apparecchiature necessarie al funzionamento dell'acceleratore (alimentazioni elettriche, sistema di controllo).

Il sistema di produzione e selezione degli ioni radioattivi è installato in un edificio indipendente, denominato "edificio di produzione", adiacente all'edificio driver. In questo edificio si trovano tutte le installazioni connesse che permettono di gestire la strumentazione più radioattiva, tra cui i contenitori dei bersagli, denominati "plug".

Questo edificio è costituito da un involucro di contenimento, che è una barriera statica di confinamento dei materiali radioattivi. All'interno di questo edificio le linee dei fasci radioattivi sono a livello del sottosuolo, allo stesso livello (-4 metri) dell'acceleratore secondario ALPI nel quale gli ioni radioattivi sono iniettati.

La sorgente di neutroni termici utilizzati per trattamenti medicali si trova in un apposito edificio, denominato "edificio BNCT", separato dalle altre installazioni. Accanto alla sala di irraggiamento neutronico si trovano i laboratori di analisi, le aree di servizio e gli impianti tecnologici.

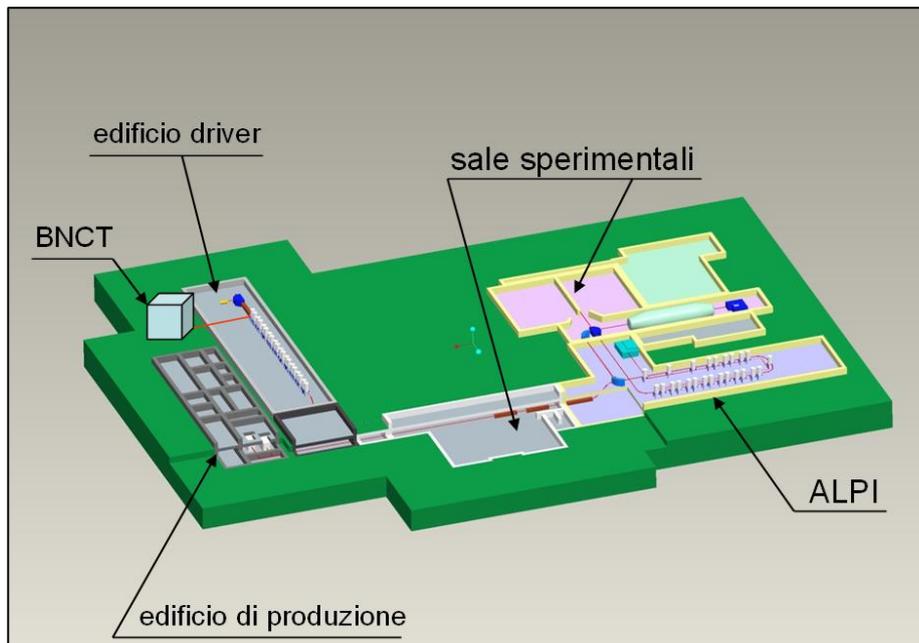


Figura 1.15 - Vista generale degli edifici dell'installazione SPES

CAPITOLO 2 ANALISI FMECA SUL SISTEMA DI STOCCAGGIO DEI GAS ESAUSTI RADIOATTIVI (RSRG) DI SPES: IMPLEMENTAZIONE DI UNA METODOLOGIA INNOVATIVA BASATO SULLA LOGICA FUZZY

2.1 L'IMPIANTO DI STOCCAGGIO DEI GAS ESAUSTI (RSRG - Recovery System for Radioactive Gases)

2.1.1 Introduzione

Nell'impianto SPES la produzione del fascio primario di protoni (PPB) e del fascio secondario di ioni radioattivi (RIB) è subordinata al corretto funzionamento del sistema di produzione del vuoto (Vacuum System, VS), creato nella camera target e nei canali previsti per il trasposto del fascio.

Le fasi operative di raggiungimento della condizione di alto vuoto e il suo mantenimento, per periodi di tempo anche molto lunghi, sono le condizioni principali per il corretto svolgimento e buona riuscita dei test sperimentali. Ciò ha comportato l'elaborazione di un'accurata analisi del rischio volta a migliorare, già nella fase di progetto, le prestazioni dei sistemi di sicurezza e di controllo ed a valutare la necessità di nuovi dispositivi di intervento.

Il VS prevede un sistema di pompe alternative, indicate come pompe primarie, collegate in serie ad un gruppo di pompe turbomolecolari (TMP), definite pompe secondarie. Le pompe primarie realizzano un primo grado di vuoto, dell'ordine di 10^{-2} mbar (fore vacuum), mentre le pompe secondarie permettono il raggiungimento di valori di vuoto più elevati, pari a circa 10^{-6} mbar (high vacuum).

Raggiunte le condizione di alto vuoto, realizzate con fascio di ioni spento (fase di beam-off), si procede con l'avvio del fascio (fase di beam-on) e l'attivazione del processo di mantenimento del vuoto attraverso una procedura di controllo della pressione dei canali dell'impianto, effettuata attraverso il Vacuum Control System (VCS). Nella prassi della tecnologia del vuoto, il VCS realizza un ciclo di isteresi mediante l'impostazione di un opportuno parametro differenziale della grandezza monitorata (pressione).

Alla fine di ogni prova, all'interno dei canali, viene ristabilita la pressione atmosferica attraverso una procedura di "venting", eseguita con l'apertura di alcune valvole elettrocomandate.

Durante la fase operativa di mantenimento del vuoto, per motivi radioprotezionistici dovuti alla presenza degli elementi radioattivi prodotti dalle reazioni di fissione nel target, i gas di scarico delle pompe del VS devono essere stoccati nell'impianto denominato Recovery System for Radioactive Gases (RSRG). Quando il livello di radioattività raggiunge i limiti imposti dalla normativa, i gas sono scaricati in atmosfera.

Durante il dottorato di ricerca, nell'ambito della collaborazione di ricerca tra l'INFN di Legnaro e il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM) dell'Università degli Studi di Palermo, si è concordato di effettuare uno studio di sicurezza per verificare le eventuali situazioni critiche che possono compromettere il funzionamento dell'impianto RSRG, per le fasi operative sopra descritte, cioè:

- stoccaggio dei gas radioattivi nei serbatoi durante i test sperimentali;
- svuotamento del sistema di stoccaggio e scarico dei gas radioattivi al camino.

La corretta progettazione dei sistemi di controllo e sicurezza dell'impianto RSRG riveste un ruolo importante per il buon funzionamento del VS, soprattutto dal punto di vista della gestione del rischio di incidente.

Per lo studio si è fatto ricorso ad un nuovo approccio della tecnica Failure Mode and Criticality Analysis (FMECA), denominata fuzzy FMECA, messa a punto da alcuni ricercatori del DEIM.

La metodologia FMECA è, ad oggi, una tecnica ampiamente utilizzata e consolidata nelle analisi del rischio di sistemi industriali, anche complessi, e permette di individuare i modi di guasto più critici mediante il calcolo dell'indice Risk Priority Number (RPN).

Tuttavia l'uso dell'indice RPN comporta alcune carenze nella determinazione dell'ordinamento dei modi di guasto più pericolosi per il sistema in studio, come verrà descritto in dettaglio nei paragrafi successivi. Ciò può portare alla mancata individuazione dei punti deboli del progetto e, di conseguenza, a trascurare quegli accorgimenti tecnici utili per la gestione dell'impianto, anche sotto condizioni operative incidentali.

Il ricorso alla metodologia della logica fuzzy ha consentito di superare questi limiti e approfondire le conoscenze e le informazioni necessarie per le successive azioni di miglioramento.

Una prima fase delle attività ha riguardato lo studio dettagliato del funzionamento dei vari componenti riportati nello schema di massima dell'impianto e l'analisi dei modi di guasto e dei possibili effetti sul processo. Tale fase ha richiesto una ricerca bibliografica particolarmente impegnativa a causa della scarsa disponibilità di informazioni legata essenzialmente al carattere innovativo dell'impianto.

Va tenuto presente che l'insufficienza dei dati affidabilistici resi disponibili dalle aziende produttrici di dispositivi impiegati nella "vacuum technology" ha reso necessario, ai fini della formulazione dell'analisi, il ricorso ai dati riportati in letteratura, o su testi specialistici, per componenti commerciali della stessa tipologia.

L'analisi dei risultati ottenuti ha consentito di suggerire alcune modifiche progettuali sui sistemi di sicurezza e di controllo per le procedure esaminate.

2.1.2 Descrizione dell'impianto RSRG

Lo schema dell'impianto RSRG (figura 2.1), fornito dai ricercatori dell'INFN [8], è costituito dall'insieme dei sistemi di stoccaggio, filtraggio dei gas e controllo e misura della pressione posizionati in un unico locale, posto all'interno di una zona detta a bassa radioattività (low radioactive zone)

nelle adiacenze dell'ISOL (Isotope Separation On Line) target bunker (high radioactive zone).

L'area, per ridurre la concentrazione degli elementi radioattivi in ambiente durante le fasi operative di beam-on, è attrezzata con un sistema di ventilazione dedicato. Nella zona a bassa radioattività sono collocate anche le pompe primarie del VS (figura 2.2).

Come si può vedere nella figura 2.1, per lo stoccaggio dei gas vengono utilizzati tre distinti serbatoi S1, S2 e S3 (quest'ultimo di sicurezza), ognuno costituito da un doppio contenimento (contenitore interno e contenitore di sicurezza). La pressione nell'intercapedine tra le due pareti è inferiore alla pressione atmosferica.

Il gas di scarico del VS viene convogliato nel vaso di espansione VA, a doppio contenimento, dopo essere stato purificato attraverso il condensatore di olio, C1, utilizzato per bloccare i vapori di olio provenienti dalle pompe rotative.

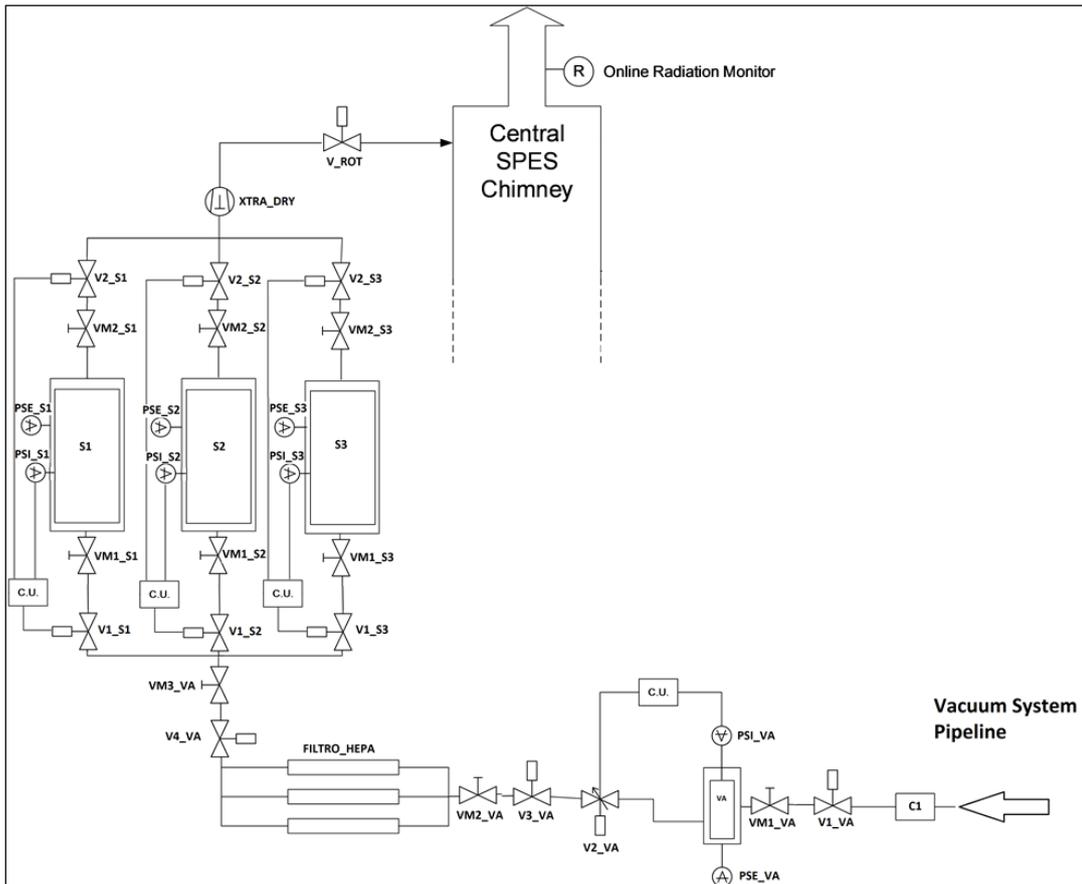


Figura 2.1 - Layout dell'impianto RSRG

La pressione del VA non può scendere al di sotto di un valore soglia (circa 500 mbar³), definito dalle specifiche tecniche di funzionamento delle pompe. Tale valore costituisce il limite al di sotto del quale le pompe rotative si danneggiano per perdita di olio lubrificante. È previsto anche un setpoint di pressione superiore, con valore inferiore alla pressione atmosferica.

La regolazione della pressione avviene tramite un apposito PLC (Programmable Logic Controller), che controlla l'apertura della valvola V2_VA a conduttanza variabile, tramite l'azionamento di un motore passo-passo, sulla base delle misure di pressione effettuate con il trasduttore PSI_VA. È previsto un secondo misuratore PSE_VA per il controllo della pressione nell'intercapedine del serbatoio VA. Ciò consente di monitorare il

³ 500 mbar è il valore minimo di soglia nel vaso di espansione utilizzato nell'analogo impianto di stoccaggio dei gas esausti di EXCYT (INFN-LNS), Catania.

verificarsi di possibili condizione di rottura del contenitore interno.

I gas fluiscono verso il serbatoio S1 dopo aver attraversato un sistema di filtri ad alta efficienza HEPA (High Efficiency Particulate Air filter).

Il controllo del riempimento sequenziale dei serbatoi viene effettuato attraverso i misuratori di pressione PSI_S1, PSI_S2 e PSI_S3, posizionati rispettivamente nei serbatoi S1, S2 e S3.

Il PLC, sulla base del segnale della sonda PSI_S1, comanda la chiusura della valvola V1_S1 e l'apertura della valvola V1_S2 per avviare la fase di riempimento del recipiente S2.

S3 ha la funzione di serbatoio di emergenza nel caso di indisponibilità di S1 e S2.



Figura 2.2 - Schema dei locali in cui verrà posizionato l'impianto RSRG

Le sonde PSE_S1, PSE_S2 e PSE_S3 misurano la pressione tra il contenitore interno e il contenitore di sicurezza e consentono di segnalare le eventuali rotture del contenimento interno.

L'impianto è dotato di valvole elettropneumatiche, utilizzate per isolare le linee del sistema che portano il gas verso i serbatoi di stoccaggio (valvole V1_VA, V3_VA, V4_VA in figura 2.1). Le valvole V2_S1, V2_S2 e V2_S3 di tipo elettropneumatico, posizionate all'uscita dei tre serbatoi, hanno la funzione di isolare l'impianto RSRG dal camino durante i test sperimentali.

Esse vengono aperte per consentire lo scarico dei gas nella procedura di svuotamento dei serbatoi di stoccaggio.

I gas vengono estratti da ciascun serbatoio attraverso una pompa di estrazione che nel presente lavoro è stata ipotizzata di tipo alternativo a pistoni (XTRA-DRY in figura 2.1). Durante la fase di svuotamento, la valvola V_ROT, a valle della pompa di estrazione XTRA-DRY, viene aperta permettendo lo scarico in atmosfera attraverso il sistema centralizzato di trattamento aria.

Per consentire le operazioni di manutenzione o di isolamento dei componenti dell'impianto, le linee sono dotate di valvole a chiusura manuale (VM1_VA, VM2_VA, VM3_VA, VM1_S1, VM2_S1, VM1_S2, VM2_S2, VM1_S3 e VM2_S3).

2.1.3 Studio dei modi di guasto dei componenti dell'impianto RSRG

Una parte delle informazioni sul funzionamento e sulle caratteristiche costruttive dei componenti utilizzati nel RSRG sono state fornite da alcune aziende, contattate dal gruppo di ricerca, che sono produttrici di dispositivi impiegati nel campo della "vacuum technology". Come accennato in precedenza, in assenza di informazioni, i dati affidabilistici sono stati raccolti utilizzando quelli disponibili in letteratura e nei test specialistici [9-11].

L'analisi FMECA ha comportato la compilazione di circa cento schede, utilizzando il software Risk Analysis Database (RAD) [12]. L'uso del RAD ha consentito di creare una tassonomia dei modi di guasto che potrà risultare utile nelle successive analisi di sicurezza da svolgere, ad esempio, con il supporto delle tecniche ad albero di guasto e ad albero degli eventi.

Si riporta di seguito una breve descrizione dei modi di guasto trattati con l'analisi FMECA, raggruppati per tipologia di componente.

Per le valvole elettropneumatiche sono stati considerati i seguenti modi di guasto:

- Mancata apertura/chiusura su richiesta, attribuibile ad eventuali malfunzionamenti meccanici del sistema pneumatico;
- Perdita esterna dovuta ad eventuali micro fessure nella struttura della valvola o ad una scarsa tenuta nella flangia;
- Apertura/Chiusura spuria dovuta ad un malfunzionamento nell'attuatore pneumatico o falso contatto nell'attuatore elettrico.

Per la valvola a conduttanza variabile del sistema di regolazione della pressione di VA, che ha la funzione di regolare la portata del gas nella linea di ingresso dei serbatoi di stoccaggio, è stato considerato un solo modo di guasto, cioè:

- Errata regolazione in eccesso/difetto, attribuibile ad un danneggiamento della membrana metallica.

Per il sistema di regolazione sono stati esaminati anche i guasti connessi al motore passo-passo dovuti ad usura oppure a malfunzionamenti degli organi statorici o del rotore.

Per i misuratori di pressione nei tre vessel stoccaggio e nel vaso di espansione sono stati considerati i seguenti modi di guasto:

- Errata misura in eccesso/difetto dovuto ad una errata calibrazione dello strumento o guasti dell'elettronica.
- Misura spuria causata dal guasto dei sistemi elettronici.

Pel il filtro HEPA ed il condensatore di olio sono stati esaminati i seguenti modi di guasto:

- Rottura o danneggiamento del filtro dovuto ad eventuali urti o sollecitazioni meccaniche;
- Parziale ostruzione prodotte dalla deposizione di frammenti metallici e/o impurità;
- Perdita esterna dovuta ad eventuali microlesioni nella struttura del contenimento.

Per la pompa di estrazione dei gas dal sistema di stoccaggio sono stati esaminati i seguenti modi di guasto:

- Stop spurio causato dal danneggiamento dei connettori elettrici o da usura in genere;
- Mancato avvio su richiesta, attribuibile a danneggiamenti dei componenti meccanici o guasti dei connettori dell'alimentazione elettrica.
- Rottura degli organi statorici.

Per i tre vessel di stoccaggio e per il vaso di espansione è stata esaminata la perdita dell'integrità meccanica nel contenitore interno dovuta alla formazione di micro fratture.

Per le valvole manuali si è voluto esaminare il possibile malfunzionamento dovuto all'errore commesso dall'operatore (fattore umano) che, nella procedura di isolamento di parti di impianto per lo svolgimento di pratiche di manutenzione o sostituzione di componenti, lascia la valvola in condizione chiusa.

L'identificazione di questo evento iniziatore è il risultato di una analisi svolta sull'affidabilità umana nelle procedure di avvio e funzionamento del sistema di refrigerazione del target, effettuata da alcuni ricercatori del DEIM.

Per la valutazione della probabilità di accadimento dell'errore si è fatto ricorso alla metodologia SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk - Human Reliability Analysis), ampiamente utilizzata nel settore nucleare per lo svolgimento di Human Reliability Analysis (HRA) [13].

2.1.3.1 Valvole elettropneumatiche

Nell'impianto sono utilizzate dieci valvole elettropneumatiche, indicate in Figura 2.1 con V1_VA, V3_VA, V4_VA, V1_S1, V2_S1, V1_S2, V2_S2, V1_S3, V2_S3 e V-ROT.

Per lo studio si è presa in considerazione la scheda tecnica della valvola elettropneumatica prodotta dalla *Pfeiffer Vacuum*, utilizzata per operazioni di shut-off e di sfiato in applicazioni da vuoto.

La valvola è del tipo ad angolo, con housing in alluminio EN AW-6060 di 0,38 kg, nella configurazione normalmente “chiusa”. Il volume di compressione è pari a 4 cm³ e la conduttanza di 5 l/s. Può commutare con frequenza pari a 100 s⁻¹ e tempi di chiusura ed apertura di 100 ms. Il “cycle life” è pari a circa 10 milioni di azionamenti (salita e discesa del pistone). La pressione operativa minima è di 10⁻⁸ mbar e la massima di 2 bar [14]. Nelle figure 2.3 e 2.4 vengono riportati gli schemi di funzionamento.

L’apertura è effettuata dall’attuatore pneumatico, attraverso l’iniezione di aria compressa sul pistone. L’azionamento del pistone attiva l'indicatore elettrico di stato di funzionamento “valvola aperta” e rende visibile l’indicatore di posizione.

La chiusura è effettuata dall’azione di una molla di contrasto, in acciaio, sull’attuatore pneumatico. L’indicatore elettrico viene disattivato e l’indicatore di posizione di stato “valvola aperta” non è più visibile (figura 2.4).

La presenza di una guarnizione a soffietto garantisce un'ottima tenuta verso l’esterno ed una grande resistenza all’usura.

Nella tabella 2.1 vengono riportati i modi di guasto esaminati con la tecnica FMECA ed i relativi tassi di guasto [9].

Tabella 2.1 - Modi di guasto e tasso di guasto della valvole elettropneumatiche V1_VA, V3_VA, V4_VA, V1_S1, V2_S1, V1_S2, V2_S2, V1_S3, V2_S3 e V-ROT

| Modo di guasto | Tasso di guasto (eventi/y) |
|------------------------------|----------------------------|
| Perdite esterne | 6.57E-3 |
| Mancata aperture a richiesta | 1.04E-2 |
| Chiusura e apertura spuria | 1.58E-3 |

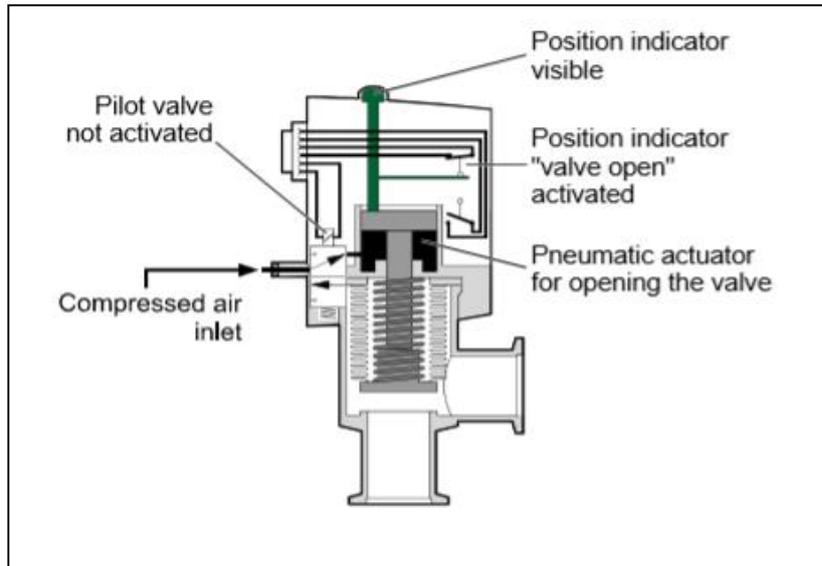


Figura 2.3 - Valvola elettropneumatica: apertura

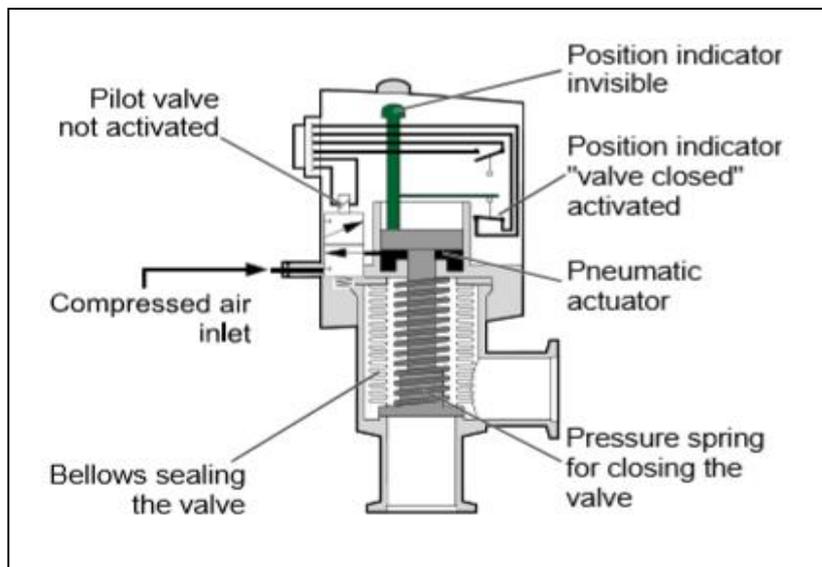


Figura 2.4 - Valvola elettropneumatica: chiusura

2.1.3.2 Condensatori di oli

Questo componente, indicato nel layout dell'impianto con C1, serve a separare eventuali impurità oleose provenienti dal sistema per la produzione del vuoto e, in particolare, dalle pompe primarie. E' realizzato in alluminio a prova di corrosione con guarnizioni in elastomeri. Le perdite dell'housing vengono valutate come inferiori a 10^{-5} l/s [15]. È provvisto di una spia (sight glass) che mostra il livello di condensa. La capacità di condensa è di 3 l e peso totale di 6,1 kg.

In tabella 2.2 sono riportati i modi di guasto e i relativi tassi di guasto [9].

Tabella 2.2 - Modi di guasto e tasso di guasto condensatore di oli C1

| Modo di guasto | Tasso di guasto (eventi/y) |
|-----------------|----------------------------|
| Perdite esterne | 8.37E-2 |
| ostruzione | 3.54E-2 |

2.1.3.3 Sonde di pressione

Per le sonde di pressione si fa riferimento a componenti commerciali di tipo Penning, da utilizzare per letture di pressione con valore massimo di 1100 hPa e valore minimo di 10^{-1} hPa [16].

Nell'impianto sono presenti 8 sonde (figura 2.1): PSI_VA, PSE_VA, PSI_S1, PSE_S1, PSI_S2, PSE_S1, PSI_S3, PSE_S3.

In tabella 2.3 sono riportati i modi e tassi di guasto esaminati [9].

Tabella 2.3 - Modi di guasto e tasso di guasto dei sensori di pressione PSI_VA, PSE_VA, PSI_S1, PSE_S1, PSI_S2, PSE_S1, PSI_S3, PSE_S3.

| Modo di guasto | Tasso di guasto (eventi/y) |
|--------------------------|----------------------------|
| Misura spuria in eccesso | 3.05 E- 6 |
| Misura spuria in difetto | 3.05 E- 6 |

2.1.3.4 Sistema di regolazione della pressione del vaso di espansione VA

Data l'importanza di questo dispositivo, si è deciso di scomporre il sistema nei suoi componenti principali per una più approfondita analisi.

Sono stati esaminati i seguenti componenti:

- valvola regolatrice a conduttanza variabile, V2_VA;
- motore elettrico passo-passo;
- misuratore di pressione, PSI_VA.

Per la valvola V2_VA si è fatto riferimento alla tipologia prodotta dalla VAT, in acciaio inossidabile AISI 316L o AISI 660, a membrana metallica in AISI 301 e placcata in oro, attuabile manualmente o per mezzo di motore

passo-passo. Lo schema di funzionamento preso in esame riguarda la configurazione con motore passo-passo.

Il tempo di chiusura fornito dalla scheda tecnica è 12 s e il “cycle life” pari a 20000 azionamenti (apertura e chiusura) [17].

La valvola, come detto in precedenza, è posizionata a valle del vaso di espansione VA e consente la regolazione della portata dei gas nei serbatoi S1, S2 o S3 (figura 2.1). In figura 2.5 viene riportato lo schema di funzionamento, mentre la tabella 2.4 riporta i modi di guasto e i relativi tassi di guasto.

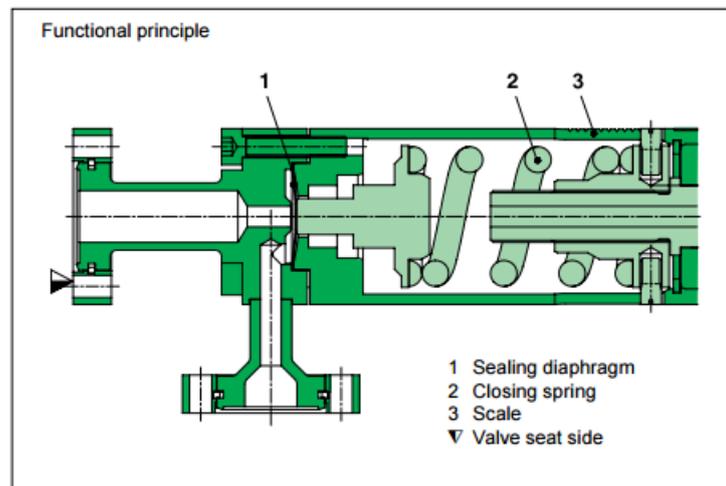


Figura 2.5 - Schema di funzionamento della valvola a conduttanza V2_VA

Tabella 2.4 - Modi di guasto e tasso di guasto della valvola V2_VA.

| Modo di guasto | Tasso di guasto (eventi/y) |
|-------------------------------|----------------------------|
| Errata regolazione in eccesso | 3,35E-01 |
| Errata regolazione in difetto | 3,35E-01 |

Per il guasto del motore passo-passo, è stato preso in esame l’avaria del complesso sistema motore con tasso pari a $4,38E-02 \text{ y}^{-1}$ [11].

Per la sonda di pressione PSI_VA i modi di guasto esaminati sono uguali a quelli descritti nel paragrafo 2.1.3.3.

2.1.3.5 Filtro HEPA

Il filtro è posizionato a valle della valvola V2_VA e prima dei serbatoi di stoccaggio (figura 2.1). La sua funzione è catturare le impurità che possono contenere elementi radioattivi.

Sono stati trovati in letteratura i modi di guasto e i tassi di guasto riportati in tabella 2.5 [10].

Tabella 2.5 - Modi di guasto e tasso di guasto filtro HEPA

| Modo di guasto | Tasso di guasto (eventi/y) |
|-----------------|----------------------------|
| Rottura | 4,38E-03 |
| Perdita esterna | 2,63E-02 |
| Ostruzione | 2,63E-02 |

2.1.3.6 Pompa di estrazione

La pompa di estrazione XTRA_DRY ha il compito di svuotare i serbatoi di stoccaggio. Per la nostra analisi, in assenza di informazioni più dettagliate, abbiamo supposto che la pompa sia di tipo a pistoncini, analogamente a quelle impiegate nel sistema di stoccaggio dei gas esausti dell'impianto EXCYT dei Laboratori Nazionali del Sud (LNS) di Catania.

In figura 2.6 vengono riportati alcuni dati tecnici della pompa presa in esame, mentre i modi e i tassi di guasto sono riassunti nella tabella 2.6 [9].

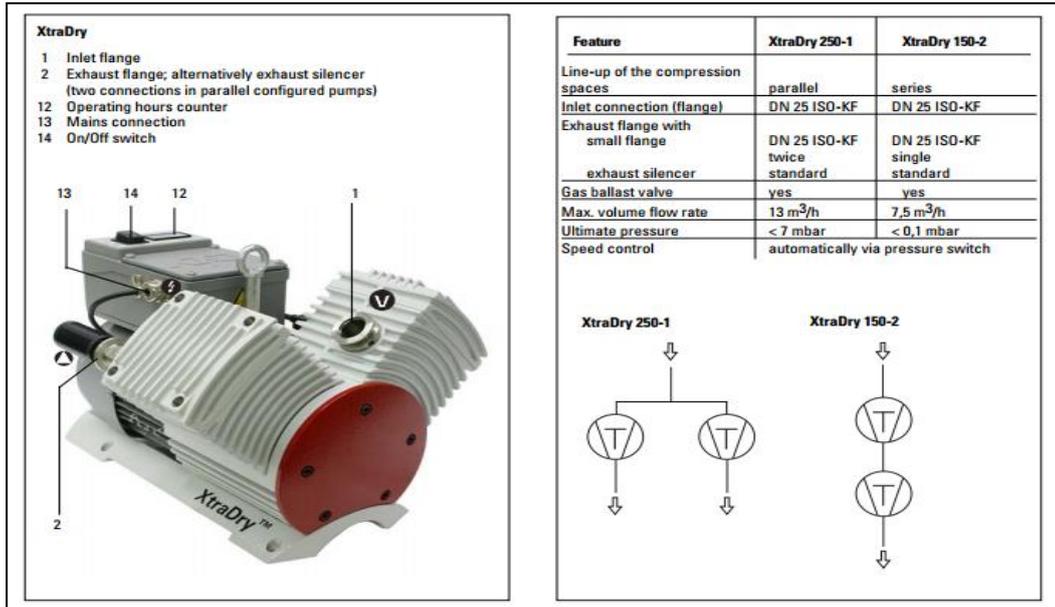


Figura 2.6 - Pompa XtraDry della Pfeiffer

Tabella 2.6 - Modi di guasto e tasso di guasto pompa di estrazione XTRA-DRY

| Modo di guasto | Tasso di guasto (eventi/y) |
|---------------------------|----------------------------|
| Rottura | 7,07E-02 |
| Non si avvia su richiesta | 1,89E-01 |
| Stop spurio | 7,07E-02 |

2.1.3.7 Serbatoi

Le dimensioni dei serbatoi per lo stoccaggio non sono stati ancora definiti in quanto sono in corso di svolgimento gli studi per la valutazione delle portate dei gas prodotti nel VS ed il calcolo dei giorni di stoccaggio necessari affinché le componenti volatili radioattive (i.e. Kr, Xe, Br, I, ³H) decadano a livelli accettabili [8, 18].

Una prima stima ha valutato 250 l per S1 e S2, e 1500 l per il serbatoio di emergenza S3. Il vaso di espansione VA avrà le stesse caratteristiche dei due serbatoi di stoccaggio [8].

Per aumentare la sicurezza dal punto di vista radioprotezionistico, i serbatoi sono a doppio contenimento per cui, in caso di rottura della parete interna, i gas rimangono confinati all'interno del contenimento di sicurezza.

L'unico modo di guasto esaminato, sia per i serbatoi di stoccaggio S1, S2 e S3 sia per il vaso di espansione VA, riguarda la perdita dell'integrità meccanica con un tasso di guasto pari a $4,35E-02 \text{ y}^{-1}$ [9].

2.2 IL METODO FUZZY FMECA

2.2.1 Introduzione

La tecnica FMECA è uno strumento ampiamente utilizzato in varie applicazioni industriali per identificare in maniera preventiva gli eventi iniziatori e le cause principali di condizioni incidentali con esiti inaccettabili. Il primo passo consiste nella scomposizione del processo, prodotto o sistema in esame in sottosistemi elementari e nell'analisi dei modi guasti per ciascun componente del sottosistema, indicando:

- le possibili cause;
- i possibili effetti;
- tutti i controlli in essere.

L'analisi utilizza tre fattori di rischio, che caratterizzano la criticità del modo di guasto, definiti come:

- Occurrence (O), descrive la probabilità che il guasto si verifichi;
- Severity (S), misura la gravità delle conseguenze;
- Detection (D), descrive la possibilità che il guasto sia rivelato prima che esso accada.

Il prodotto dei tre fattori fornisce l'indice Risk Priority Number (RPN) come segue:

$$\text{RPN} = O \times S \times D \quad (1)$$

I fattori O, S, D possono assumere valori nell'intervallo (1, 10) (i valori più alti denotano le condizioni più critiche), per cui RPN può variare nell'intervallo (1, 1000). I modi di guasto con alti valori di RPN richiederanno interventi di correzione con priorità superiore rispetto ai modi di guasto con basso RPN.

Per definire la scala di priorità dei guasti si può assumere il seguente criterio [19]:

- rischio accettabile se $RPN < 200$;
- rischio indesiderabile se $200 < RPN < 500$;
- rischio inaccettabile se $RPN > 500$.

Il valore soglia di rischio accettabile può essere modificato sulla base dell'opinione degli esperti, tenendo presente le caratteristiche dell'impianto e la gravità delle conseguenze.

Per l'analisi FMECA dell'impianto RSRG, la scala di priorità è stata modificata come riportato di seguito:

- rischio accettabile se $RPN < 200$;
- rischio indesiderabile se $200 < RPN < 400$;
- rischio inaccettabile se $RPN > 400$

Ciò è stato fatto per tenere in considerazione due aspetti importanti:

- la connotazione innovativa dell'impianto, per cui dal punto di vista della sicurezza è disponibile un background limitato;
- la gravità delle conseguenze connessa alla dispersione di inquinanti radioattivi in ambiente a seguito del verificarsi di eventi indesiderati o incidentali.

La procedura per il calcolo di RPN presenta tuttavia alcune lacune, come elencato di seguito:

- differenti combinazioni di O, S, e D possono fornire come risultato lo stesso RPN, nonostante ci siano differenze nella implicazione del tipo di rischio. Per esempio, due modi di guasto caratterizzati da $RPN = 1 \times 10 \times 2$ e $RPN = 2 \times 5 \times 2$, secondo l'eq. (1), forniscono lo stesso valore $RPN = 20$. Tuttavia, il fattore di rischio S del primo modo di guasto ($S = 10$, conseguenze gravi con morte) è certamente più critico rispetto al secondo modo di guasto ($S = 5$, conseguenze moderate). Quindi, il valore finale di RPN può "nascondere" informazioni importanti sugli effetti critici del guasto in esame;

- generalmente è difficile per gli esperti esprimere la loro opinione nell'assegnazione di un valore numerico preciso per ciascun fattore di rischio O, S e D;
- tenendo presente le caratteristiche peculiari dell'impianto in esame, non può essere presa in considerazione l'importanza relativa tra i tre fattori O, S e D;
- non viene trattato il problema dell'errore umano come componente che può portare a situazioni di incidente.

Per migliorare la metodologia FMECA e superare alcuni degli inconvenienti elencati in precedenza, in [20] viene proposta una nuova procedura per la valutazione dell'indice di rischio, denominata Fuzzy RPN (FRPN), basata sulla logica sfumata.

L'uso della tecnica sfumata può essere riassunta come somma di tre processi principali:

- fuzzificazione (definizione della funzione di appartenenza sfumata, μ che caratterizza il grado di verità della variabile x);
- inferenza fuzzy (costruzione delle regole di ragionamento);
- defuzzificazione (determinazione del valore "crisp").

Per il processo di fuzzificazione, possono essere impiegate funzioni di appartenenza di tipo triangolare o trapezoidale. Per la definizione della funzione di appartenenza di tipo triangolare, devono essere individuati tre valori. Se x_2 è il valore a cui corrisponde $\mu(x_2) = 1$ (il grado di verità pari a 1 indica che x_2 è il valore di x più probabile), gli altri due valori x_1 e x_3 sono i valori inferiore e superiore dell'intervallo sfumato a cui corrispondono $\mu(x_1) = 0$ e $\mu(x_3) = 0$ (il grado di verità 0 indica che x_1 e x_3 sono i valori di x meno probabili). Per brevità, di seguito indicheremo le funzioni triangolari con (x_1, x_2, x_3) e trapezoidali con (x_1, x_2, x_3, x_4) .

Nella metodologia proposta in [20], i fattori O, S e D vengono decomposti in una serie di funzioni sfumate triangolari e trapezoidali, a cui è associato una espressione linguistica come "Very Low", "Low", "High", ect... come

descritto nelle tabella 2.7-2.9.

Come si può vedere dalle tabelle, la definizione linguistica dei tre fattori di rischio consente di supportare il gruppo di esperti nella scelta del valore numerico, rendendo più agevole esprimere la propria opinione. Inoltre, è possibile trattare anche l'errore umano.

Ad ogni espressione linguistica di O, S e D è associato un peso indicato rispettivamente con W_O , W_S , W_D .

Anche per FRPN si procede con una classificazione linguistica e l'attribuzione di un peso indicato con W_{FRPN} in tabella 2.10.

Una volta definite le funzioni fuzzy per O, S, D e FRPN, è necessario individuare le regole di inferenza attraverso cui determinare l'output fuzzy FRPN a partire dalle diverse combinazioni degli input O, S, D.

La letteratura propone diversi metodi di inferenza fuzzy. Quella impiegata in [20] si basa sull'operazione decisionale fuzzy "if ... then" costruita utilizzando il criterio Min-Max.

Le regole fuzzy *if-then* possono essere descritte come:

Rule R_j : *If x_1 is A_{j1} and ... and x_n is A_{jn} then y is B_j $j=1, 2, \dots, m$ (peso della regola, w_j)* (2)

dove A_{ij} (i.e. O, S, D) and B_j (i.e. FRPN) sono le variabile linguistiche degli insiemi fuzzy X and Y, questi ultimi definiti come input e output dell'universo del discorso. La parte della regola "if x_n is A_{jn} " è chiamata antecedente mentre la parte della regola "then y_m is B_j " è chiamata conseguente. Il parametro W_j in Eq. (2), definito nell'intervallo $[0, 1]$, denota il grado di importanza della regola.

La regola di inferenza Min-Max, applicata nell'eq. (2), determina la funzione di output tagliando superiormente la funzione fuzzy del conseguente in corrispondenza del minimo dei valori delle funzioni di appartenenza degli antecedenti, moltiplicato per il peso della regola (in figura 2.7 si veda, per la regola R2, il valore di taglio $\mu_{21}W_2$ per il conseguente B_2)

Il risultato finale sarà l'aggregazione (operazione unione) dei valori massimi delle aree dei conseguenti dell'insieme delle regole attivate (si veda l'unione delle funzioni B_j rappresentato con l'area a tratti in figura 2.7). L'operazione unione può essere espressa come:

$$\mu_j^*(x) = \max\{w_j \mu_j(x): j=1, 2, ..m\} \quad (3)$$

essendo m il numero delle regole.

Per la costruzione delle regole di inferenza basate sul criterio Min-Max, in [20] si fa ricorso alla seguente relazione:

$$W_{RPN} = R_O \cdot W_O + R_S \cdot W_S + R_D \cdot W_D \quad (4)$$

dove R_O , R_S , e R_D definiscono l'importanza relativa attribuita dall'analista della sicurezza ai fattori di rischio O , S e D .

Ciò viene fatto poiché nella valutazione dell'indice FRPN potrebbe essere necessario enfatizzare l'importanza di un fattore di rischio rispetto agli altri.

A titolo di esempio, ricordando le attribuzioni linguistiche dei parametri O , S , D e FRPN riportate nelle tabella 2.7-2.10 e utilizzando l'eq. (4), possiamo costruire le seguenti regole di decisione considerando $R_O=0.3$, $R_S=0.4$, e $R_D=0.3$:

Rule 1: *If the occurrence is Moderate (with $W_O = 0.6$ in tabella 2.7), and the severity is No Effect (with $W_S = 0.1$ in tabella 2.8), and the detection is High (with $W_D = 0.33$ in tabella 2.9), then the consequent part is obtained using Eq. (4), namely $0.3 \cdot 0.6 + 0.4 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.33 = 0.32$. This number is placed between $W_{RPN}=0.3$ of risk RPN Very Low and $W_{RPN}=0.4$ of risk RPN Low (see tabella 2.10), but being closer to risk RPN Very Low, the result is as follows: **risk RPN Very Low with $W_{RPN} = 0.32$;***

Rule 2: *If the occurrence is Moderate (with $W_O = 0.6$ in Tab. 2.7), and the severity is No Effect (with $W_S = 0.1$ in tabella 2.8), and the detection is Moderate (with $W_D = 0.5$ in tabella 2.9), then the consequent part is*

obtained using Eq. (4), namely $0.3 \cdot 0.6 + 0.4 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.5 = 0.37$ (see tabella 2.10). This number is placed between $W_{RPN}=0.3$ of risk RPN *Very Low*, and $W_{RPN}=0.4$ of risk RPN *Low*, but being more close to risk RPN *Low*, the result is as follows: **risk RPN Low with $W_{RPN} = 0.37$** ;

Quindi la regola R1 fornisce come espressione linguistica del conseguente FRPN *Very Low*, mentre il peso della regola è pari a $W_{RPN} = 0.32$.

Sulla base della classificazione linguistica dei fattori di rischio O, S, D (cioè 5 espressioni linguistiche per O; 10 espressioni linguistiche per S; 6 espressioni linguistiche per D, come riportato nelle tabella 2.7-2.9) si possono valutare 300 possibili combinazioni ($5O \times 10S \times 6D = 300$ regole di inferenza).

Rispetto alla scelta dei parametri R_O , R_S , e R_D effettuate in [20], nel presente studio si è deciso di dare una importanza relativa maggiore ai fattori S e O. In particolare, si è assunto $R_O=0.4$, $R_S=0.4$, e $R_D=0.2$.

Ciò è stato fatto in quanto alcune situazioni incidentali riguardanti l'impianto in esame possono portare a conseguenze gravi come la dispersione di inquinanti radioattivi in ambiente. Inoltre, l'incertezza sul dato relativo alla probabilità di accadimento del guasto può risultare significativa a causa di due distinti aspetti:

- l'uso nell'analisi di dati tecnici riguardanti componenti commerciali della stessa tipologia dei dispositivi che verranno utilizzati nell'impianto RSRG;
- i vari componenti si troveranno ad operare sotto condizioni operative più gravose a causa degli effetti dell'irraggiamento sui materiali che possono generare un incremento delle condizioni di degrado.

L'ultimo passo della procedura consiste nel processo di defuzzificazione per calcolare il valore "crisp" di FRPN.

Per questa operazione in [20] viene adottato il criterio del centro di "gravità" dell'area dei conseguenti, ottenuta nella procedura di aggregazione, cioè:

$$FRPN = \frac{\int x \mu^*(x) dx}{\int \mu^*(x) dx} \quad (5)$$

dove la funzione $\mu^*(x)$ è valutata utilizzando l'eq. (3).

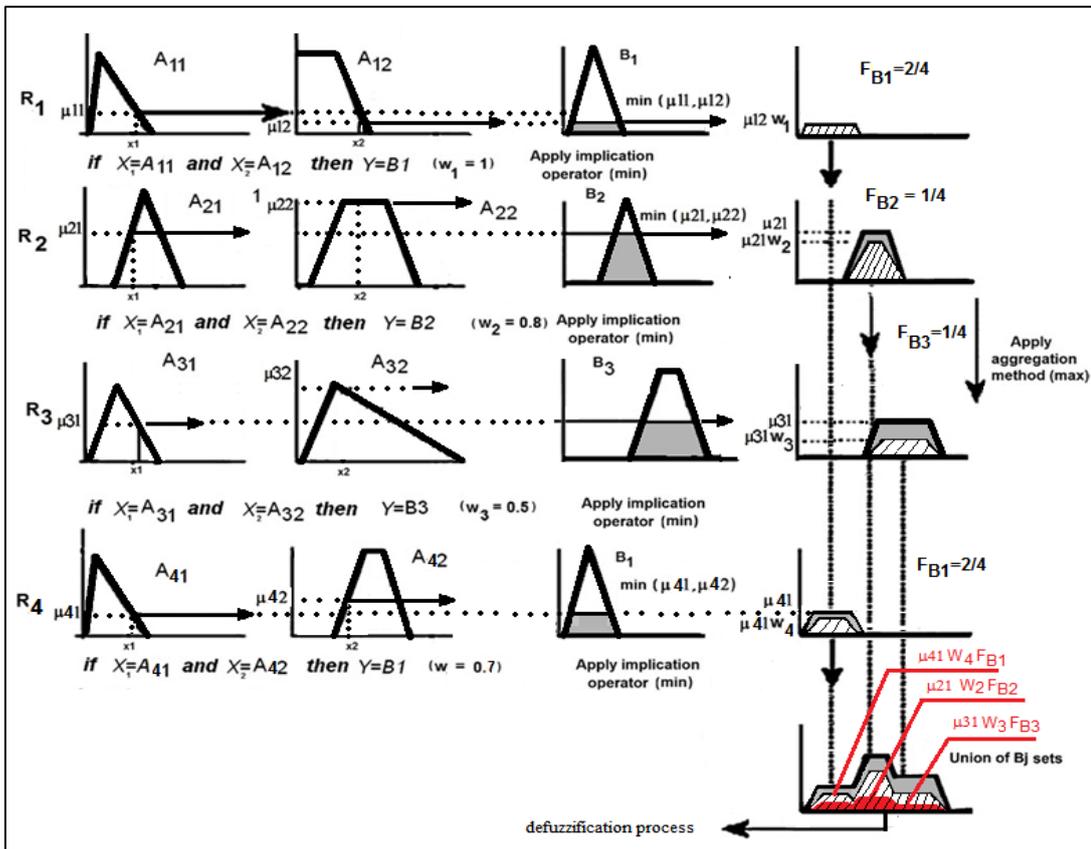


Figura 2.7 - Esempio di processo di inferenza fuzzy basato sul criterio Min-Max con l'applicazione del peso W: l'area tratteggiata mostra il risultato dell'aggregazione degli output secondo la regola dell'unione fuzzy

Tabella 2.7 - Classificazione linguistica del fattore di rischio O, definizione delle funzioni di appartenenza fuzzy e valore del peso W_O attribuito ad ogni espressione linguistica.

| Component failure occurrence probability (operating day) | Human error occurrence probability per year | Rank | Linguistic Value | Fuzzy linguistic function (x_1, x_2, x_3, x_4) | Weight W_O |
|--|---|---------|------------------|--|--------------|
| Failure unlikely, < 1:20,000 | Less than every 5 years | 1 | Very Low (VL) | (0, 0, 1, 2) | 1/5=0.2 |
| Few failures, 1:20,000/1:2,000 | Every 2-5 years, Once a year | 2, 3 | Low (L) | (1, 2, 3, 4) | 2/5=0.4 |
| Occasional failures, 1:2,000/1:200 | Several times a year, Once a month, Several times a month | 4, 5, 6 | Moderate (M) | (3, 4, 6, 7) | 3/5=0.6 |
| Repeated failures, 1:200/ 1:20 | Once a week, Several times a week | 7, 8 | High (H) | (6, 7, 8, 9) | 4/5=0.8 |
| Inevitable failure, 1:20/ 1:2 | Once a day, Several times a day | 9, 10 | Very High (VH) | (8, 9, 10, 10) | 5/5=1 |

Tabella 2.8 - Classificazione linguistica del fattore di rischio S, definizione delle funzioni di appartenenza fuzzy e valore del peso W_S attribuito ad ogni espressione linguistica.

| Severity of each effect of failure or error | Rank | Linguistic Value | Fuzzy linguistic function (x_1, x_2, x_3, x_4) (x_1, x_2, x_3) | Weight W_S |
|--|------|----------------------------------|---|--------------|
| No reason to expect failure. Slight annoyance-no injury to people. | 1 | No effect (N) | (0, 0, 1, 2) | 1/10=0.1 |
| Very minor effect on product or system performance to have any effect on safety or health. The product does not require repair. Slight danger-no injury to people. | 2 | Very Minor (VMR) | (1, 2, 3) | 2/10=0.2 |
| Minor effect on product or system performance to have any effect on safety or health. The product does not require repair. Very minor or no injury to people. | 3 | Minor (MR) | (2, 3, 4) | 3/10=0.3 |
| Very low effect on system performance. The system does not require repair. Minor or no injury to people. | 4 | Very Low (VL) | (3, 4, 5) | 4/10=0.4 |
| Moderate effect on system performance. The product requires repair. Very moderate danger-minor injury to people. | 5 | Low (L) | (4, 5, 6) | 5/10=0.5 |
| System performance is degraded. Some safety functions may not operate. The product requires repair. Moderate danger- minor to moderate injury to people . | 6 | Moderate (M) | (5, 6, 7) | 6/10=0.6 |
| System performance is severely affected but functions (reduced level of performance). The system may not operate. Dangerous-moderate to major injury to people. | 7 | High (H) | (6, 7, 8) | 7/10=0.7 |
| System is inoperable with loss of primary function. Failure can involve hazardous outcomes. Dangerous-may result in major injury to people. | 8 | Very High (VH) | (7, 8, 9) | 8/10=0.8 |
| Failure involves hazardous outcomes. Very dangerous-may result in major injury or death of people. | 9 | Hazardous with warning (HWW) | (8, 9, 10) | 9/10=0.9 |
| Failure is hazardous and occurs without warning. It suspends operation of the system. Extremely dangerous-may cause death of people. | 10 | Hazardous without warning (HWOW) | (9, 10, 10) | 10/10=1 |

Tabella 2.9 - Classificazione linguistica del fattore di rischio D , definizione delle funzioni di appartenenza fuzzy e valore del peso W_D attribuito ad ogni espressione linguistica.

| Likelihood of detection of failure or error | Probability of failure detection % | Rank | Linguistic Value | Fuzzy linguistic function (x_1, x_2, x_3, x_4) (x_1, x_2, x_3) | Weight W_D |
|--|------------------------------------|------|--------------------|--|--------------|
| Design control will almost certainly detect a potential failure mode/task error. | 0-15 | 1, 2 | Very High (VH) | (0, 0, 2, 3) | 1/6=0.17 |
| High chance that the design control will almost certainly detect a potential failure mode/task error. | 16-35 | 3, 4 | High (H) | (2, 3, 4, 5) | 2/6=0.33 |
| Moderate chance that the design control will detect a potential failure mode/task error (e.g. the defect will remain undetected until the system performance is affected). | 36-65 | 5, 6 | Moderate (M) | (4, 5, 6, 7) | 3/6=0.5 |
| Remote chance that the design control will detect a potential failure mode/task error (e.g. the defect will remain undetected until an inspection or test is carried out). | 66-85 | 7, 8 | Remote (R) | (6, 7, 8, 9) | 4/6=0.67 |
| Defect most likely remains undetected (e.g. the design control cannot detect potential cause or the task will be performed in the presence of the defect). | 86-100 | 9 | Very Remote (VR) | (8, 9, 10) | 5/6=0.83 |
| System failures are not detect (e.g. there is no design verification or the task will certainly be performed in the presence of the defect) | 90-100 | 10 | Non detection (ND) | (9, 10, 10) | 6/6=1 |

Tabella 2.10 - Classificazione linguistica dell'indice FRPN, definizione delle funzioni di appartenenza fuzzy e valore del peso W_{RPN} attribuito ad ogni espressione linguistica.

| Linguistic Value of the RPN | Rank | Linguistic Value | Fuzzy linguistic function (x_1, x_2, x_3, x_4) (x_1, x_2, x_3) | W_{RPN} |
|--|----------|---------------------------|--|-----------|
| Almost unnecessary to take the follow-up actions. | 1-50 | Unnecessary (U) | (0, 0, 25, 75) | 1/10=0.1 |
| Minor priority to take the follow-up actions. | 50-100 | Minor (MI) | (25, 75, 125) | 2/10=0.2 |
| Very Low priority to take the follow-up actions. | 100-150 | Very low (VL) | (75, 125, 175) | 3/10=0.3 |
| Low priority to take the follow-up actions. | 150-250 | Low (L) | (125, 200, 300) | 4/10=0.4 |
| Moderate priority to take the follow-up actions. | 250-350 | Moderate (M) | (200, 300, 400) | 5/10=0.5 |
| High priority to take the follow-up actions. | 350-450 | High (H) | (300, 400, 500) | 6/10=0.6 |
| Very High priority to take the follow-up actions. | 450-600 | Very high (VH) | (400, 550, 700) | 7/10=0.7 |
| Extremely High priority to take the follow-up actions. | 600-800 | Extremely high (EH) | (500, 650, 800) | 8/10=0.8 |
| Necessary to take the follow-up actions. | 800-900 | Necessary (N) | (700, 800, 900) | 9/10=0.9 |
| Absolute Necessary to take the follow-up actions. | 900-1000 | Absolutely necessary (AN) | (800, 900, 1000, 1000) | 10/10=1 |

2.2.1 Modifiche proposte per la valutazione dell'indice FRPN

Nell'ambito dell'attività di dottorato è stato svolto un lavoro di validazione della metodologia sopra descritta.

Sulla base dei risultati ottenuti è stata proposta una modifica del processo di defuzzificazione per rendere più robusto il metodo ed eliminare alcune aspetti di inconsistenza che erano stati riscontrati modificando i pesi relativi dei parametri O, S, e D.

In particolare, è stata modificata la procedura di valutazione dell'area sottesa dalle funzioni linguistiche fuzzy dei conseguenti, ottenuta facendo il ricorso all'eq. (3). Il valore finale della funzione del conseguente viene moltiplicato per un fattore F (Frequenza), valutato come rapporto tra numero di volte che le regole forniscono come conseguente la stessa espressione linguistica sul numero totale di regole attivate.

Ad esempio, in figura 2.7 nella regola R4 il valore della funzione di appartenenza " $\mu_{41} W_4$ " associato al conseguente B1 viene moltiplicato per il fattore F_{B1} , valutato come frequenza del numero di volte che la regola fornisce come conseguente l'espressione linguistica B1 rispetto al totale delle numero di regole attivate, cioè $2/4=0.5$.

Questo nuovo approccio modifica l'area del conseguente (area rossa in figura 2.7) e attribuisce un maggiore peso all'espressione linguistica che più volte si presenta nell'insieme delle regole attivate per la valutazione dell'insieme sfumato FRPN.

Quindi, nella procedura di defuzzificazione, il calcolo del valore "crisp" di FRPN viene effettuato modificando l'eq. (5) come segue:

$$FRPN = \frac{\int x \mu^*(x) F dx}{\int \mu^*(x) F dx} \quad (6)$$

dove F è la frequenza calcolata come descritto in precedenza.

2.2.2 Valutazione dell'opinione degli esperti

Come indicato da Bowles e Peláez in [21], per l'esperto è un compito difficile caratterizzare il grado di criticità del guasto di un componente e tradurre questo aspetto in valori numerici per O, S, D.

Tuttavia gli autori assumono che, se si vuole definire il livello di incertezza dell'informazione, al valore fornito dall'esperto con maggiore esperienza può essere attribuito un "grado di confidenza" elevato. Quindi, qualora si volesse costruire una funzione di appartenenza fuzzy si può attribuire il grado di verità pari a 1 al dato fornito dall'esperto più qualificato.

Nello studio riportato in questo rapporto, poiché l'impianto ha una connotazione innovativa ed esistono pochi impianti dello stesso tipo, è difficile ricorrere ad un numero significativo di esperti per determinare il grado di confidenza sulla base dei pochi dati disponibili. Quindi, per la formulazione della distribuzione sfumata della funzione di appartenenza riguardante l'opinione degli esperti si è utilizzato l'approccio proposto in [20], come descritto brevemente di seguito.

Si assume come valore più probabile quello assegnato dall'esperto (x_2 vertice della numero fuzzy triangolare) mentre gli estremi dell'intervallo x_1 e x_3 possono essere valutati ipotizzando che il dato sia caratterizzato da una funzione di probabilità di tipo Gaussiano, per cui è possibile valutare:

$$x_1 = x_2 - x(2\sigma) \quad (7)$$

$$x_3 = x_2 + x(2\sigma) \quad (8)$$

dove σ è la standard deviation e $x(2\sigma)$ è il 13.53% di x_2 [22].

2.2.3 Esempio di valutazione dell'indice FRPN

Di seguito viene riportato il calcolo di FRPN per il guasto di mancata apertura/chiusura spuria delle valvole V2_S1, V2_S2, e V2_S3 (tabella 2.11), riguardante il processo di scarico dei gas radioattivi al camino. Per questa condizione operativa l'esperto ha fornito i valori O=1, S=4 e D=6 .

Sulla base dell'opinione degli esperti, è possibile costruire la funzione di appartenenza fuzzy ricorrendo alle eq.s (7) e (8):

$$EO(x_1, x_2, x_3) = (0,865; 1; 1,135) \quad (9)$$

$$ES(x_1, x_2, x_3) = (3,46; 4; 4,54) \quad (10)$$

$$ED(x_1, x_2, x_3) = (5,19; 6; 6,81) \quad (11)$$

Nelle figure 2.8-2.10 vengono mostrate le intersezione tra le funzione fuzzy dell'opinione degli esperti eq. (9)-(11) e le funzioni linguistiche che classificano i fattori di rischio O, S, e D (in figura 2.8 si ottengono 2 espressioni linguistiche **VL** e **L** per il fattore O; in figura 2.9 si ottengono 3 espressioni linguistiche **MR**, **VL** e **L** per il fattore S; in figura 2.10 si ottengono 2 espressioni linguistiche **M** e **R** per il fattore D). Le diverse combinazioni delle funzioni linguistiche O, S, e D sono pari a 12 (2Ox3Sx2D).

Le regole corrispondenti alle 12 combinazioni di O, S, e D e i relativi pesi W_{FRPN} , valutati con l'eq.(4), vengono riportati in tabella 2.11.

Sulla base del valore di W_{FRPN} è possibile valutare le espressioni linguistiche di FRPN (**VL**, **L**, e **M**) come riportato nella quinta colonna di tabella 2.11 (per questa procedura si vedano a titolo di esempio **Rule 1** e **Rule 2** descritte all'inizio del capitolo). Dopo l'applicazione del criterio MIN-MAX (vedi in tabella 2.11, le due ultime colonne), si procede con l'aggregazione degli output. Per i tre termini linguistici dei conseguenti FRPN, cioè **VL**, **L**, e **M**, vengono calcolati i fattori di frequenza $F_{VL}=3/12$ (in tabella 2.11 l'espressione linguistica VL si presenta 3 volte sulle 12 regole attivate), $F_L=6/12$ e $F_M=3/12$. Il risultato finale dell'aggregazione viene mostrato in figura 2.11. Utilizzando la procedura di defuzzificazione secondo l'eq. (6), si ottiene infine il valore "crisp" di FRPN pari a 204,4.

Tabella 2.11 - Regole di inferenza MIN-MAX per valori O=1, S=4 e D=6

| O | S | D | W_{FRPN} valutato con eq. (4) | Espress. linguistica del conseguente FRPN | $\mu_{FRPN} = \text{Min}(\mu_O, \mu_S, \mu_D) \times W_{FRPN}$ | Criterio Max (unione o aggregazione) |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--|--|
| VL($\mu_O=1$) | MR($\mu_S=0,35$) | R($\mu_D=0,45$) | 0,334 | VL | $\mu_{FRPN}=0,35 \times 0,334=0,117$ | VL(0.34) |
| VL($\mu_O=1$) | MR($\mu_S=0,35$) | M($\mu_D=1$) | 0,3 | VL | $\mu_{FRPN}=0,35 \times 0,3=0,105$ | |
| VL($\mu_O=1$) | VL($\mu_S=1$) | M($\mu_D=1$) | 0,34 | VL | $\mu_{FRPN} = 1 \times 0,34 = 0,34$ | |
| VL($\mu_O=1$) | VL($\mu_S=1$) | R($\mu_D=0,45$) | 0,374 | L | $\mu_{FRPN}=0,45 \times 0,374=0,168$ | L(0.168) |
| VL($\mu_O=1$) | L($\mu_S=0,35$) | R($\mu_D=0,45$) | 0,414 | L | $\mu_{FRPN}=0,35 \times 0,414=0,145$ | |
| VL($\mu_O=1$) | L($\mu_S=0,35$) | M($\mu_D=1$) | 0,38 | L | $\mu_{FRPN}=0,35 \times 0,38=0,133$ | |
| L($\mu_O=0,12$) | MR($\mu_S=0,35$) | R($\mu_D=0,45$) | 0,414 | L | $\mu_{FRPN}=0,12 \times 0,414=0,042$ | L(0.059) |
| L($\mu_O=0,12$) | MR($\mu_S=0,35$) | M($\mu_D=1$) | 0,38 | L | $\mu_{FRPN}=0,12 \times 0,38=0,049$ | |
| L($\mu_O=0,12$) | VL($\mu_S=1$) | M($\mu_D=1$) | 0,42 | L | $\mu_{FRPN}=0,12 \times 0,42=0,0505$ | |
| L($\mu_O=0,12$) | VL($\mu_S=1$) | R($\mu_D=0,45$) | 0,454 | M | $\mu_{FRPN}=0,12 \times 0,454=0,054$ | M(0.059) |
| L($\mu_O=0,12$) | L($\mu_S=0,35$) | R($\mu_D=0,45$) | 0,494 | M | $\mu_{FRPN}=0,12 \times 0,494=0,059$ | |
| L($\mu_O=0,12$) | L($\mu_S=0,35$) | M($\mu_D=1$) | 0,46 | M | $\mu_{FRPN}=0,12 \times 0,46=0,0552$ | |

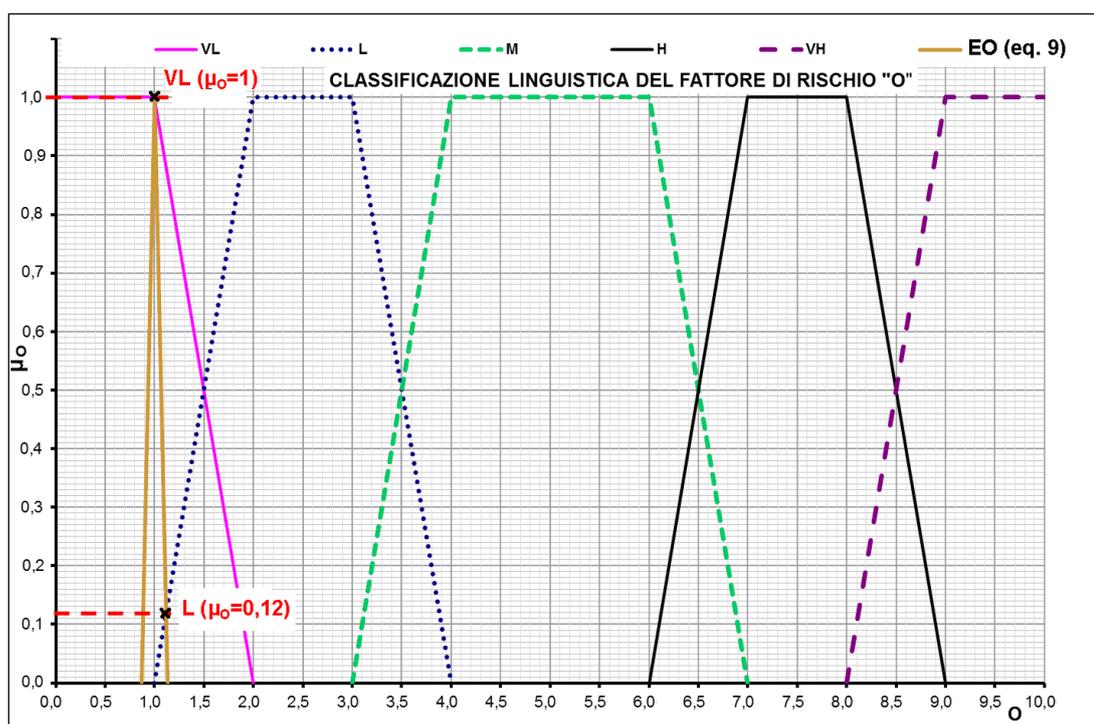


Figura 2.8 - Intersezione della funzione fuzzy eq. (9), definita ricorrendo all'opinione degli esperti, con le funzioni linguistiche del fattore di rischio O

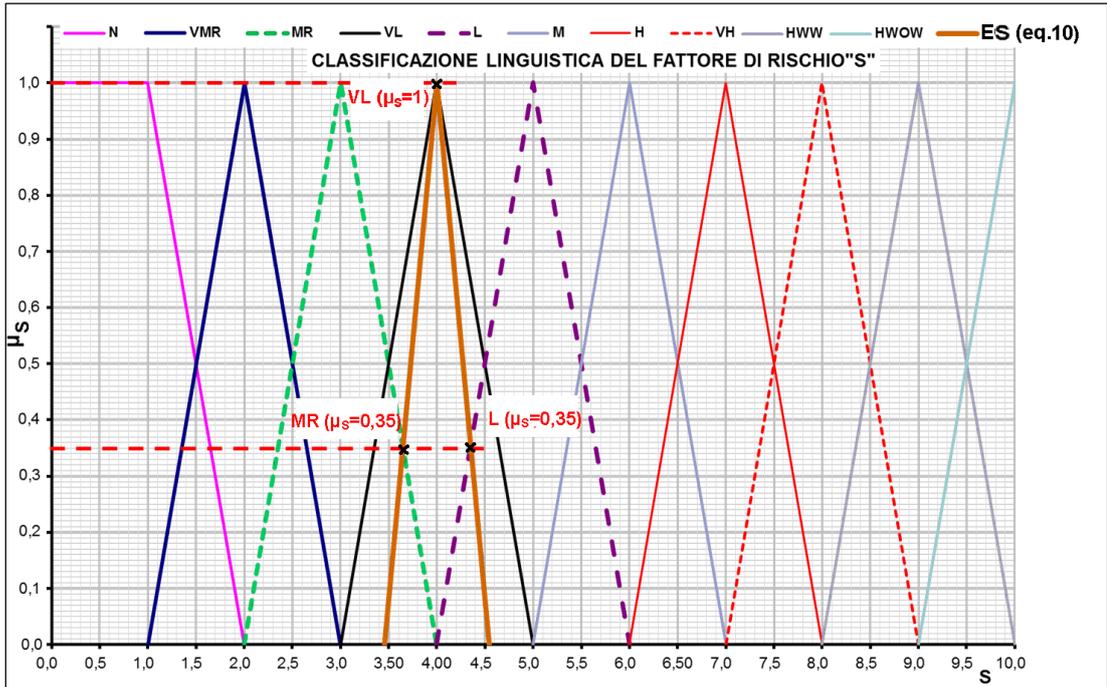


Figura 2.9 - Intersezione della funzione fuzzy eq. (10), definita ricorrendo all'opinione degli esperti, con le funzioni linguistiche del fattore di rischio S

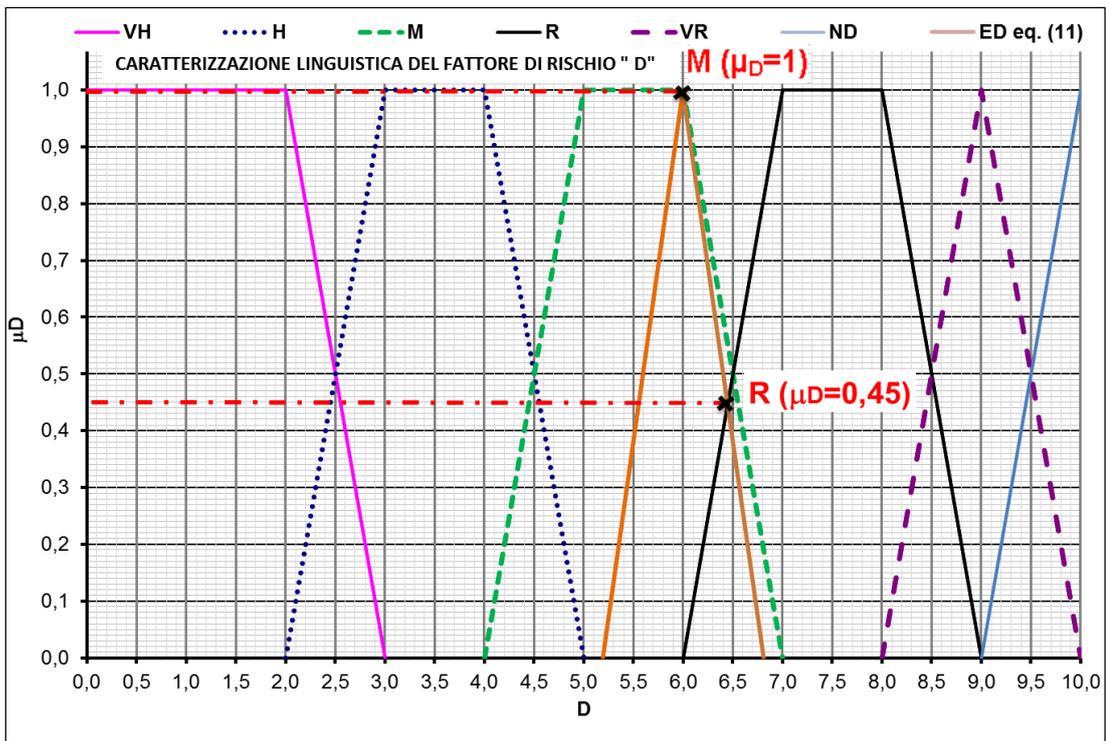


Figura 2.10 - Intersezione della funzione fuzzy eq. (11), definita ricorrendo all'opinione degli esperti, con le funzioni linguistiche del fattore di rischio D

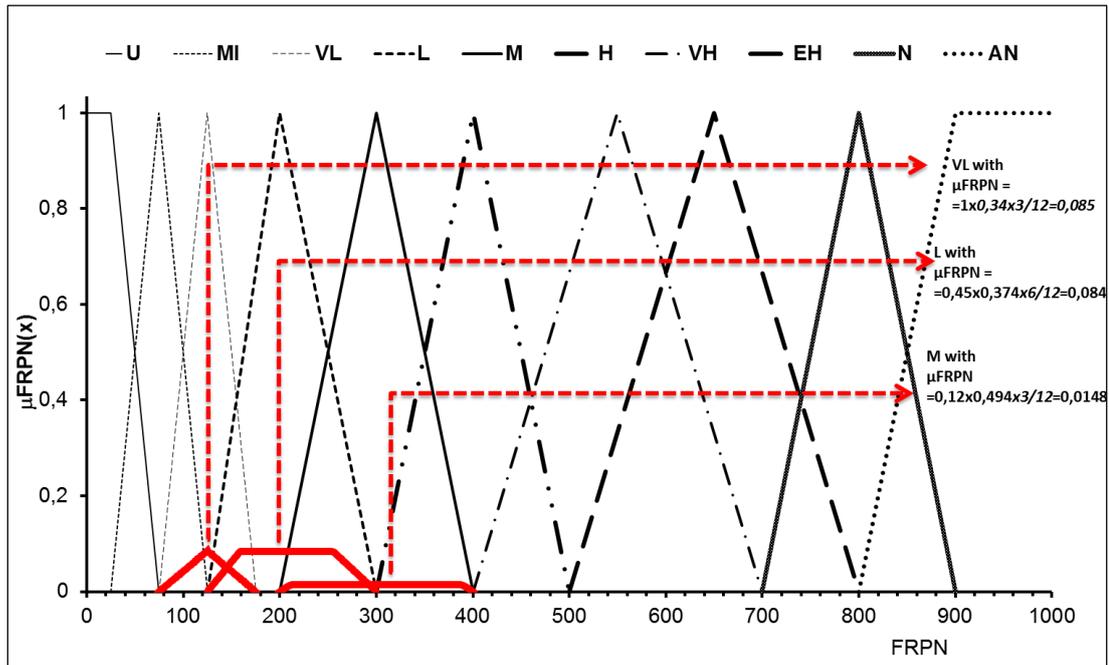


Figura 2.11 - Aggregazione degli output VL, L, M di FRPN (operazione unione), ottenuti con l'applicazione del criterio MIN-MAX secondo il metodo proposto nell'ambito dell'attività di ricerca

2.3 RISULTATI DELL'ANALISI FMECA

2.3.1 Risultati dell'analisi FMECA riguardante il processo di stoccaggio dei gas radioattivi durante i test sperimentali

Nella tabella 2.12 sono stati raggruppati i risultati ottenuti per i modi di guasto caratterizzati dal valore dell'indice di rischio FRPN superiore a 300. Nella stessa tabella vengono mostrati l'ordinamento ottenuto con la procedura FMECA classica e quello valutato con l'approccio fuzzy. È da notare che, tenendo presente i criteri di accettabilità del rischio descritti nel paragrafo 2.2.1, tutti i modi di guasto sono da considerare tollerabili se si utilizza la metodologia classica.

Come si può vedere in figura 2.12, per i guasti con più elevato valore di RPN ottenuto applicando il metodo classico (regolazione in eccesso della valvola V2_VA con RPN=180 e perdita esterna nel condensatore di olio C1 con RPN=144) si ha una inversione dell'ordinamento rispetto all'applicazione della tecnica fuzzy. Esaminando più in dettaglio i due tipi

di guasto, la perdita di olio in C1 è sicuramente da considerare più grave rispetto all'errata regolazione dovuta al malfunzionamento della valvola V2_VA, per cui deve essere oggetto di correzione con priorità maggiore. Quindi, nell'approccio fuzzy, l'aver attribuito un peso relativo maggiore ai fattori di rischio O e S ha consentito di tenere in considerazione alcuni aspetti critici che altrimenti non avrebbero avuto la giusta rilevanza.

Come accorgimento di sicurezza si potrebbe racchiudere il componente C1 con un secondo contenimento, se tecnicamente fattibile.

Anche il guasto del sistema di regolazione della pressione in VA, costituito dai componenti valvola V2_VA, motore passo-passo e misuratore di pressione PSI_VA, risulta essere critico. In particolare, una regolazione in difetto rispetto al valore reale, dovuto alla valvola V2_VA o ad errore di misura della sonda PSI_VA, potrebbe portare ad un abbassamento della pressione al di sotto del valore limite. Questi modi di guasto potrebbero causare malfunzionamenti nel VS e, in particolare, difetti di funzionamento delle pompe primarie.

Una regolazione in eccesso potrebbe, invece, causare un aumento della pressione in VA, oltre il valore limite consentito, ed una imprecisa gestione del processo di stoccaggio.

Tra i componenti del sistema di regolazione, il guasto più grave è da attribuire alla valvola V2_VA, essendo la sua probabilità di accadimento elevata (vedi tabella 2.4).

Per ridurre il rischio di malfunzionamenti del sistema di regolazione, potrebbe risultare utile inserire un misuratore di pressione (ridondanza del controllo) a monte di VA. Ciò consentirebbe di aumentare il controllo della pressione sulla linea del VS, per tutta la prova sperimentale, ma anche di verificare possibili anomalie di misura della pressione in VA.

La programmazione di una manutenzione periodica o la verifica della costanza dei parametri funzionali (ad esempio, prima dell'avvio del test

sperimentale) potrebbe consentire di verificare eventuali condizioni di degrado di V2_VA o del motore passo-passo.

Per quanto riguarda la perdita di integrità dei vessel di stoccaggio o del vaso di espansione VA, nel progetto dell'impianto RSRG è già previsto un doppio contenimento, per cui si è ritenuto non necessario prevedere ulteriori accorgimenti migliorativi, essendo la probabilità di accadimento del doppio guasto (rottura di entrambe i contenimenti) altamente improbabile.

Il guasto di errata misura in difetto delle sonde di pressione PSI_S1, PSI_S2 e PSI_S3 portano ad una sbagliata gestione del processo, per cui potrebbe risultare utile l'introduzione di una sonda di pressione a monte dei serbatoi, posizionata sulla linea di ingresso al sistema di stoccaggio. L'inserimento di questo dispositivo consentirebbe di monitorare il valore della pressione in ognuno dei tre recipienti, consentendo la diagnosi del tipo di guasto sopra descritto e una ridondanza di controllo per tutto il periodo di prova.

Il guasto dovuto a misura spuria della sonda PSE_S3 risulta importante perché, nel caso di perdita di integrità del contenitore interno di S3, non viene segnalato all'operatore questa condizione particolarmente pericolosa, tenendo presente che S3 è il recipiente di sicurezza, utilizzato in caso di malfunzionamento degli altri due recipienti. Sarebbe opportuno valutare la possibilità di inserire un secondo misuratore di pressione, tenendo presente che la probabilità di accadimento del modo di guasto di misura spuria potrebbe essere aumentata a causa degli effetti della radioattività. Tuttavia, è da osservare che la non rilevabilità del guasto da parte dell'operatore è condizionata al guasto della sonda PSI_S3. Quindi, sarebbe necessario approfondire l'analisi con tecniche ad albero di guasto per la valutazione della probabilità di accadimento dell'evento nel suo complesso.

Il guasto relativo all'apertura spuria delle valvole V2_S1, V2_S2 e V2_S3 porta alla fuoriuscita dei gas radioattivi verso la linea che collega i recipienti di stoccaggio con il camino. L'introduzione di una sonda di pressione a

valle dei serbatoi S1, S2, e S3 permetterebbe di rilevare questo tipo guasto, particolarmente importante poiché connesso alla perdita del confinamento in sicurezza dei gas radioattivi.

Inoltre, l'introduzione di un'ulteriore valvola elettrocomandata prima della pompa di estrazione XTRA_DRY consentirebbe di mitigare le conseguenze della dispersione dei gas radioattivi sulla linea.

Anche per il filtro HEPA la rottura rappresenta un modo di guasto indesiderabile. Un secondo contenimento, se tecnicamente fattibile, consentirebbe di confinare il gas in caso di perdita.

Critico risulta essere il guasto del complesso valvole a monte del serbatoio S3. In particolare, la chiusura spuria di V1_S3 e la chiusura della valvola manuale VM1_S3 rendono indisponibile il serbatoio in caso di emergenza.

Per il primo modo di guasto le procedure di manutenzione programmata possono ridurre la probabilità di accadimento, mentre per il secondo malfunzionamento è necessario che nelle valvole manuali sia predisposto un indicatore che in modo chiaro consenta all'operatore di verificare lo stato "valvola aperta".

Nella tabella 2.13 vengono riportati i modi di guasto caratterizzati da un valore di FRPN inferiore a 300.

In questa categoria rientrano i guasti: perdita verso l'esterno del filtro HEPA; errata misura in eccesso dei sensori PSI_S1, PSI_S2, e PSI_S3; misura spuria dei sensori di pressione PSE_VA, PSE_S1, PSE_S2; l'errore umano di mancata apertura delle valvole VM1_VA, VM2_VA e VM3_VA; perdita esterna e chiusura spuria delle valvole V4_VA, V3_VA, V1_VA, V1_S3.

Tuttavia gli accorgimenti tecnici descritti in precedenza consentono di dare una risposta anche per la riduzione del rischio connesso a questi modi di guasto.

Più problematico è, invece, il guasto relativo alla perdite di gas verso l'esterno delle varie valvole. In questo caso si suggerisce di verificare le

capacità di tenuta delle valvole prima del loro utilizzo nell'impianto, oppure controllare i dati affidabilistici forniti dal costruttore, scegliendo quelle soluzioni che riescono a garantire le prestazioni migliori.

Tabella 2.12 - Ordinamento dei modi di guasto, ottenuto con l'indice di rischio FRPN superiore a 300, per il processo di stoccaggio dei gas radioattivi durante i test sperimentali.

| componente | modo di guasto | O | D | S | RPN | rank classico | FRPN | rank fuzzy |
|--------------------|-----------------------------|---|---|---|-----|---------------|-------|------------|
| C1 | perdita esterna | 3 | 6 | 8 | 144 | 2 | 483,8 | 1 |
| V2_VA | errore di misura in eccesso | 5 | 6 | 6 | 180 | 1 | 421 | 2 |
| V2_VA | errore di misura in difetto | 5 | 6 | 6 | 180 | 1 | 421 | 2 |
| VA | perdita integrità meccanica | 3 | 6 | 6 | 108 | 3 | 356,9 | 3 |
| PSI_VA | errore di misura in difetto | 3 | 6 | 6 | 108 | 3 | 356,9 | 3 |
| PSI_VA | errore di misura in eccesso | 3 | 6 | 6 | 108 | 3 | 356,9 | 3 |
| Motore passo passo | avaria | 3 | 6 | 6 | 108 | 3 | 356,9 | 3 |
| S3 | perdita integrità meccanica | 3 | 5 | 6 | 90 | 5 | 312,3 | 4 |
| S2 | perdita integrità meccanica | 3 | 5 | 6 | 90 | 5 | 312,3 | 4 |
| S1 | perdita integrità meccanica | 3 | 5 | 6 | 90 | 5 | 312,3 | 4 |
| PSI_S3 | errore di misura in difetto | 3 | 7 | 5 | 105 | 4 | 312,3 | 5 |
| PSI_S2 | errore di misura in difetto | 3 | 7 | 5 | 105 | 4 | 312,3 | 5 |
| PSI_S1 | errore di misura in difetto | 3 | 7 | 5 | 105 | 4 | 312,3 | 5 |
| PSE_S3 | misura spuria | 3 | 7 | 5 | 105 | 4 | 312,3 | 5 |
| V2_S3 | apertura spuria | 1 | 6 | 7 | 42 | 9 | 303,9 | 6 |
| V2_S2 | apertura spuria | 1 | 6 | 7 | 42 | 9 | 303,9 | 6 |
| V2_S1 | apertura spuria | 1 | 6 | 7 | 42 | 9 | 303,9 | 6 |

Tabella 2.13 - Ordinamento dei modi di guasto, ottenuto con l'indice di rischio FRPN inferiore a 300, per il processo di stoccaggio dei gas radioattivi durante i test sperimentali.

| componente | modo di guasto | O | D | S | RPN | rank classico | FRPN | rank fuzzy |
|-------------|---------------------------------|---|---|---|-----|---------------|-------|------------|
| C1 | ostruito | 3 | 5 | 5 | 75 | 6 | 294,5 | 7 |
| V1_S3 | chiusura spuria | 1 | 5 | 7 | 35 | 12 | 290,2 | 8 |
| Filtro_HEPA | rottura | 1 | 5 | 7 | 35 | 12 | 290,2 | 8 |
| VM1_S3 | mancata apertura (errore umano) | 1 | 6 | 6 | 36 | 11 | 281,4 | 9 |
| Filtro_HEPA | perdita esterna | 2 | 5 | 6 | 60 | 8 | 276,8 | 10 |
| VM3_VA | mancata apertura (errore umano) | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| VM2_VA | mancata apertura (errore umano) | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| VM1_VA | mancata apertura (errore umano) | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| V4_VA | chiusura spuria | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| V4_VA | perdita esterna | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| V3_VA | perdita esterna | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| V3_VA | chiusura spuria | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| V1_VA | perdita esterna | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| V1_VA | chiusura spuria | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| V1_S3 | mancata apertura | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| V1_S3 | apertura spuria | 1 | 5 | 6 | 30 | 13 | 253,8 | 12 |
| VM1_S2 | mancata apertura (errore umano) | 1 | 6 | 5 | 30 | 13 | 253,7 | 14 |
| V2_S3 | perdita esterna | 1 | 6 | 5 | 30 | 13 | 253,7 | 14 |
| V2_S2 | perdita esterna | 1 | 6 | 5 | 30 | 13 | 253,7 | 14 |
| V2_S1 | perdita esterna | 1 | 6 | 5 | 30 | 13 | 253,7 | 14 |
| V1_S2 | mancata apertura | 1 | 6 | 5 | 30 | 13 | 253,7 | 14 |
| V1_S3 | perdita esterna | 1 | 4 | 6 | 24 | 15 | 250,5 | 13 |
| V1_S2 | perdita esterna | 1 | 4 | 6 | 24 | 15 | 250,5 | 13 |
| V1_S1 | perdita esterna | 1 | 4 | 6 | 24 | 15 | 250,5 | 13 |
| PSI_S3 | errore di misura in eccesso | 3 | 7 | 3 | 63 | 7 | 249,8 | 11 |
| PSI_S2 | errore di misura in eccesso | 3 | 7 | 3 | 63 | 7 | 249,8 | 11 |
| PSI_S1 | errore di misura in eccesso | 3 | 7 | 3 | 63 | 7 | 249,8 | 11 |
| PSE_VA | misura spuria | 3 | 7 | 3 | 63 | 7 | 249,8 | 11 |
| PSE_S2 | misura spuria | 3 | 7 | 3 | 63 | 7 | 249,8 | 11 |
| PSE_S1 | misura spuria | 3 | 7 | 3 | 63 | 7 | 249,8 | 11 |
| V1_S2 | apertura spuria | 1 | 5 | 5 | 25 | 14 | 210,1 | 16 |
| V1_S2 | chiusura spuria | 1 | 5 | 5 | 25 | 14 | 210,1 | 16 |
| V1_S1 | apertura spuria | 1 | 5 | 5 | 25 | 14 | 210,1 | 16 |
| VM1_S1 | mancata apertura (errore umano) | 1 | 6 | 4 | 24 | 15 | 204,4 | 15 |
| V1_S1 | mancata apertura | 1 | 6 | 4 | 24 | 15 | 204,4 | 15 |

| | | | | | | | | |
|-------------|------------------|---|---|---|----|----|-------|----|
| Filtro_HEPA | ostruzione | 2 | 5 | 4 | 40 | 10 | 199,4 | 17 |
| V1_S1 | mancata chiusura | 1 | 5 | 4 | 20 | 16 | 173,1 | 18 |
| V1_S1 | chiusura spuria | 1 | 5 | 4 | 20 | 16 | 173,1 | 18 |

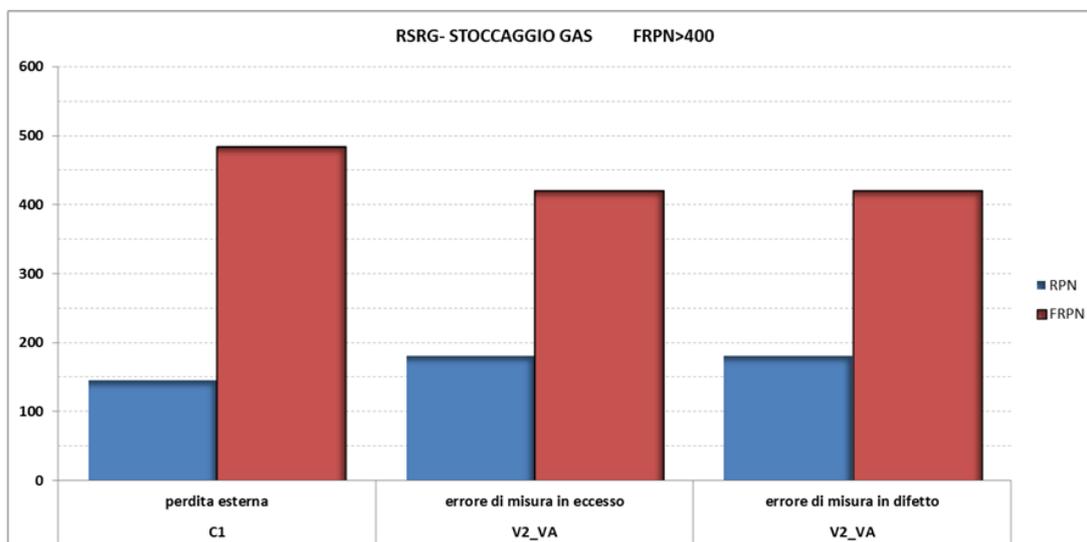


Figura 2.12- Istogramma degli indici di rischio FRPN, con valore maggiore di 400, e confronto con RPN classico per l'analisi FMECA relativa alla procedura di stoccaggio gas

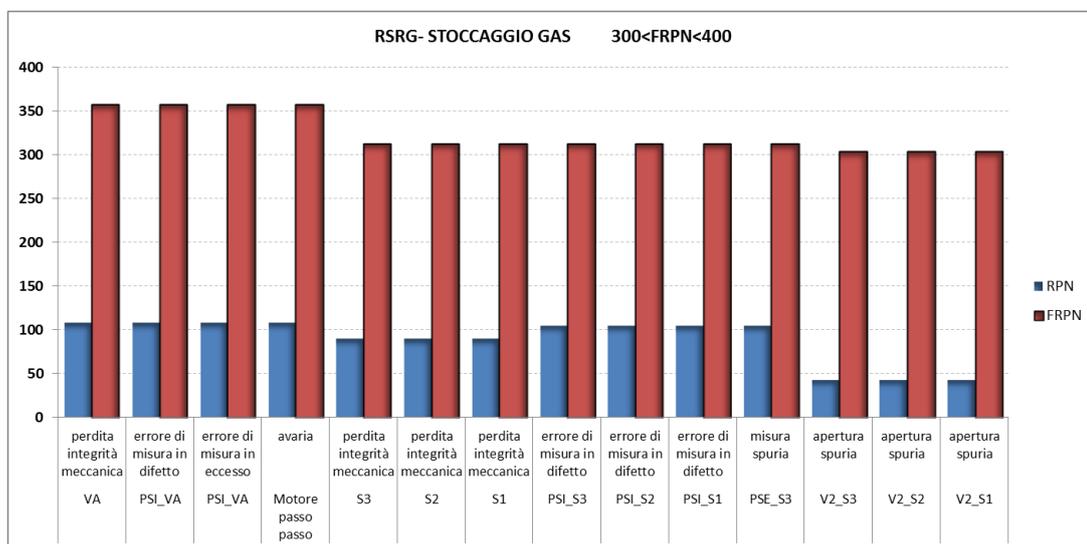


Figura 2.13 - Istogramma degli indici di rischio FRPN, compresi nell'intervallo $300 < FRPN < 400$, e confronto con RPN classico per l'analisi FMECA relativa alla procedura di stoccaggio gas

2.3.2 Risultati dell'analisi fuzzy FMECA riguardante il processo di scarico dei gas radioattivi in atmosfera

Nella tabella 2.14 sono stati raggruppati tutti i risultati dell'indice di rischio FRPN ottenuti per la fase operativa di scarico dei gas radioattivi al camino. Nella stessa tabella vengono riportati l'ordinamento ottenuto con la procedura FMECA classica e quello valutato con l'approccio fuzzy. Anche in questo caso la metodologia classica considera tutti i modi di guasto accettabili, tenendo presente i criteri descritti nel paragrafo 2.2.1.

Tra i modi di guasto più critici va segnalato l'errata calibrazione (misura in difetto) delle sonde di pressione PSI_S1, PSI_S2, e PSI_S3 che causano il mancato completamento della procedura di svuotamento. L'inserimento di una sonda di pressione posizionata a valle dei serbatoi di stoccaggio, lungo la linea che collega il sistema di stoccaggio con il camino, come già suggerito nel paragrafo precedente, consente di segnalare all'operatore eventuali anomalie di misura della pressione che si possono verificare durante questa fase operativa.

Per quanto riguarda il guasto di misura spuria delle sonde PSE_S1, PSE_S2, e PSE_S3 e la perdita di integrità meccanica del contenitore interno dei vessel S1, S2, e S3 valgono le stesse osservazioni fatte per il processo di stoccaggio dei gas radioattivi durante i test sperimentali.

La rottura della pompa di estrazione XDRY_PUMP risulta essere importante perché può portare alla dispersione indesiderata dei gas radioattività in atmosfera, anche se lo scarico riguarda un livello di radioattività basso. Va tenuto presente che i dati di guasto utilizzati per l'analisi riguardano la pompa utilizzata nell'EXCYT di Catania, quindi si potrebbe prendere in esame una pompa caratterizzata da prestazioni migliori.

Indesiderabile risulta lo stop spurio della pompa di estrazione. Nonostante questo guasto interrompa le operazioni di scarico dei gas, si ritiene non necessario un accorgimento migliorativo per la bassa probabilità accadimento del malfunzionamento e la non significativa importanza delle conseguenze.

Infine, le operazioni di scarico potrebbero essere compromesse anche a causa dei guasti della valvola V_ROT (mancata apertura o chiusura spuria). Nonostante la bassa probabilità di accadimento, l'elevato valore dell'indice FRPN è dovuto al

fatto che in caso di guasto risulta impossibile scaricare i gas, mentre la rivelabilità è demandata alle sonde di pressione interne ai serbatoi.

Tuttavia l'inserimento di una sonda di pressione a monte della pompa può consentire di individuare il guasto di V_ROT, escludendo eventuali malfunzionamenti delle valvole posizionate all'uscita di ogni recipiente.

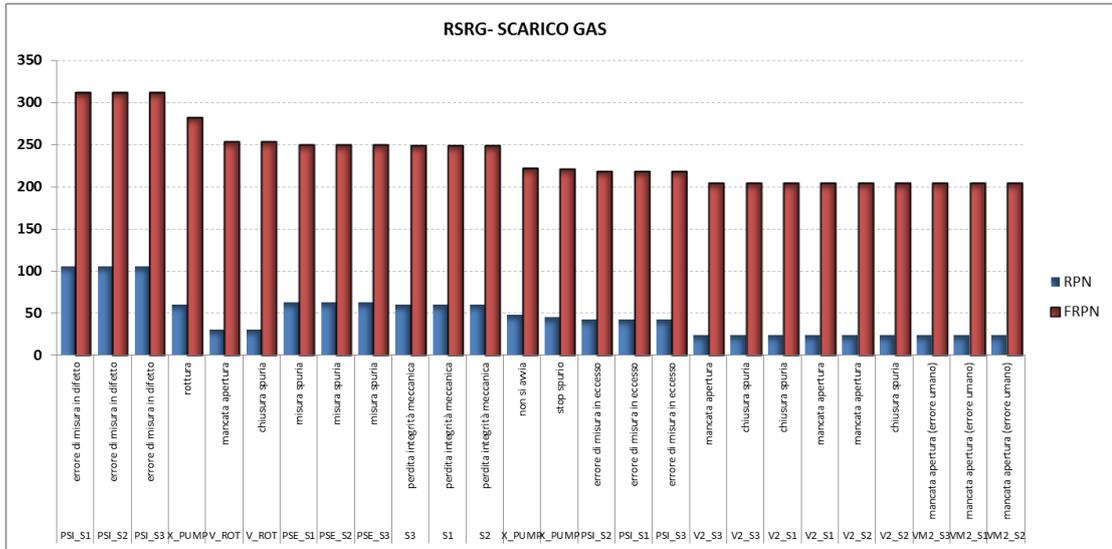


Figura 2.14 - Istogramma degli indici di rischio FRPN ottenuti nell'analisi FMECA relativa alla procedura di scarico dei gas radioattivi al camino e confronto con RPN classico.

Tabella 2.14 Ordinamento dei modi di guasto ottenuto con l'indice di rischio FRPN per il processo di scarico dei gas radioattivi al camino

| componente | modo di guasto | O | S | D | RPN | rank classico | FRPN | rank fuzzy |
|------------|---------------------------------|---|---|---|-----|---------------|-------|------------|
| PSI_S1 | errore di misura in difetto | 3 | 5 | 7 | 105 | 1 | 312,3 | 1 |
| PSI_S2 | | 3 | 5 | 7 | 105 | 1 | 312,3 | 1 |
| PSI_S3 | | 3 | 5 | 7 | 105 | 1 | 312,3 | 1 |
| XDRY_PUMP | rottura | 3 | 5 | 4 | 60 | 3 | 282,5 | 2 |
| V_ROT | mancata apertura | 1 | 5 | 6 | 30 | 7 | 253,7 | 3 |
| | chiusura spuria | 1 | 5 | 6 | 30 | 7 | 253,7 | 3 |
| PSE_S1 | misura spuria | 3 | 3 | 7 | 63 | 2 | 249,8 | 4 |
| PSE_S2 | | 3 | 3 | 7 | 63 | 2 | 249,8 | 4 |
| PSE_S3 | | 3 | 3 | 7 | 63 | 2 | 249,8 | 4 |
| S3 | perdita integrità meccanica | 3 | 4 | 5 | 60 | 3 | 248,9 | 5 |
| S1 | | 3 | 4 | 5 | 60 | 3 | 248,9 | 5 |
| S2 | | 3 | 4 | 5 | 60 | 3 | 248,9 | 5 |
| X_PUMP | non si avvia | 4 | 3 | 4 | 48 | 4 | 222,3 | 6 |
| | stop spurio | 3 | 3 | 5 | 45 | 5 | 221,5 | 7 |
| PSI_S2 | errore di misura in eccesso | 3 | 2 | 7 | 42 | 6 | 218,6 | 8 |
| PSI_S1 | | 3 | 2 | 7 | 42 | 6 | 218,6 | 8 |
| PSI_S3 | | 3 | 2 | 7 | 42 | 6 | 218,6 | 8 |
| V2_S3 | mancata apertura | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |
| | chiusura spuria | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |
| V2_S1 | chiusura spuria | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |
| | mancata apertura | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |
| V2_S2 | mancata apertura | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |
| | chiusura spuria | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |
| VM2_S3 | mancata apertura (errore umano) | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |
| VM2_S1 | | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |
| VM2_S2 | | 1 | 4 | 6 | 24 | 8 | 204,4 | 9 |

CAPITOLO 3 ANALISI DI SICUREZZA DEL SISTEMA DI REFRIGERAZIONE DEL TARGET DI SPES CON UN APPROCCIO INTEGRATO HAZOP E RELAP5-3D

3.1 INTRODUZIONE

Come descritto nei capitoli precedenti, per ottimizzare la separazione dei prodotti radioattivi dal substrato dei dischetti di UCx e agevolare l'estrazione dei nuclei esotici è necessario mantenere elevata la temperatura del sistema target. Ovviamente, più breve è la vita media degli atomi radioattivi più rapido deve essere il tempo di rilascio, per cui si è valutato che per ottimizzare il processo è necessario che la temperatura sia mantenuta al valore di circa 2000 °C.

La potenza termica dissipata nel bersaglio dovuta essenzialmente all'interazione del fascio primario di protoni, corrisponde a circa 8,5 kW. Questa potenza non è sufficiente a mantenere il bersaglio alla temperatura di esercizio di 2000 °C per cui viene utilizzato un dispositivo riscaldante esterno, come descritto nel capitolo 1. Si ricorda che il riscaldatore, in tantalio, ha il compito di portare la temperatura del sistema al livello desiderato prima dell'accensione del fascio e mantenere il valore operativo durante le prove sperimentali, evitando improvvisi sbalzi di temperatura, pericolosi per l'integrità strutturale dei dischi.

Il riscaldatore è composto da un tubo molto sottile in tantalio saldato ai bordi a due ali (wings) direttamente collegate a due morsetti in rame (clamps) agganciati a due puntali refrigerati con acqua. Attraverso i morsetti e i puntali è possibile far fluire la corrente necessaria a generare, per effetto Joule, il desiderato quantitativo di potenza da dissipare.

Il rischio di origine termomeccanico è rappresentato dalla rottura della finestra sottile d'ingresso del bersaglio. Questa evenienza comporterebbe la dispersione dei prodotti di fissione dentro il sistema target e nel sistema da vuoto.

La sicurezza dell'impianto viene valutata positivamente se i componenti del

target non superano la temperatura di 2500 °C e quelli in rame e in lega di alluminio la temperatura di 150 °C.

In particolare, è necessario mantenere la temperatura inferiore ai 150 °C nei pressi delle tenute della camera a vuoto, situate all'intersezione del sistema puntali-piatto e cover [29]. Se dovesse venire a mancare la condizione di vuoto nella camera, l'entrata di aria in un ambiente a 2000 °C porterebbe a gravi conseguenze dal punto di vista della degradazione dei materiali. Inoltre, i materiali del target che si ossidano sarebbero da sostituire e il loro costo non è trascurabile. L'operazione di bonifica successiva richiederebbe, inoltre, il fermo dell'impianto per diversi mesi e tale condizione risulterebbe non accettabile. La bonifica sarebbe necessaria anche perché gli isotopi si diffonderebbero sia nelle condotte di immissione del fascio che verso l'esterno. Per le parti dei componenti in rame e alluminio, non a contatto con le tenute, è preferibile restare al di sotto dei 150 °C, tuttavia è accettabile il raggiungimento della temperatura di 250 °C.

Per quanto sopra descritto, il sistema di refrigerazione del sistema target, utilizzato per asportare la potenza ivi prodotta, ha un ruolo importante ai fini della sicurezza.

Nell'ambito della collaborazione del gruppo di ricerca DEIM e dei ricercatori dell'INFN, sono state condotte analisi di sicurezza basate su un approccio integrato che fa ricorso alla metodologia HAZOP (HAZard and OPerability analysis), per identificare alcuni eventi incidentali, e alla simulazione delle sequenze fenomenologiche coinvolte nell'incidente con il codice di calcolo termo-fluidodinamico avanzato RELAP5-3D ai fini della valutazione delle conseguenze.

Come è noto la famiglia dei codici RELAP è ampiamente utilizzata nel settore nucleare per lo studio del comportamento termofluidodinamico di impianti nucleari di tipo BWR (Boiling Water Reactor) o PWR (Pressurized Water Reactor) in condizioni incidentali.

Gli eventi incidentali esaminati con il codice RELAP hanno riguardato

alcuni transitori di perdita di refrigerante, definiti LOCA (Loss of Coolant Accidente), analogamente a quanto fatto per gli incidenti negli impianti nucleari di potenza, ed incidenti di aumento della potenza prodotta nel sistema target, definiti overpower.

È da evidenziare che la configurazione di SPES del sistema di produzione del fascio primario può essere oggetto di condizioni di instabilità che possono al più condurre ad un aumento della potenza depositata nel target di qualche percento rispetto al valore nominale. Tuttavia, per motivi conservativi, si è voluto testare il comportamento del sistema di refrigerazione ipotizzando condizioni più gravose, cioè un incremento della potenza, rispetto ai 10 kW previsti in condizione di esercizio, pari al 10% e al 100%.

3.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO DI REFRIGERAZIONE DEL TARGET DI SPES

Lo schema di massima del sistema di refrigerazione primario e secondario [23], utilizzato per questo studio, è stato fornito dai ricercatori dell'INFN, come riportato in figura 3.1 [24].

Il corpo principale del sistema di refrigerazione (serbatoio, pompe di ricircolo, scambiatore di calore, demineralizzatore, etc...) è alloggiato in un'area del locale denominato A17 con impronta in pianta di circa 2÷2,5 m² [24].

Come già descritto in precedenza, l'impianto è costituito da due circuiti idraulici, definiti dai ricercatori dell'INFN come:

- sistema idraulico secondario, in cui circola l'acqua demineralizzata utilizzata per l'asportazione della potenza termica prodotta nel target, costituito da un circuito chiuso;
- circuito idraulico primario, che refrigera l'acqua demineralizzata del loop secondario tramite uno scambiatore di calore intermedio.

L'acqua demineralizzata è contenuta all'interno di un serbatoio di acciaio

inox AISI 316L di 300 l, munito di misuratore di livello, alla pressione di circa 1 bar.

Un sistema di due linee di alimentazione, poste in parallelo (sistema ridondante), ciascuna equipaggiata con una pompa che lavora a numero di giri fisso, consente il ricircolo della portata nel loop secondario (figura 3.2).

In figura 3.2, la pompa primaria viene indicata con P10-1, la pompa secondaria con P10-2. La linea ridondante diventa attiva in caso di guasto della pompa primaria. Due valvole di non ritorno VR1 e VR2 sono posizionate rispettivamente a valle delle pompe P10/1 e P10/2.

Per le pompe sono stati utilizzati i dati tecnici della pompa TRAVAINI TBK [25]. Tale scelta è stata fatta in quanto questo componente viene utilizzato nel sistema di refrigerazione dell'impianto EXCYT del LNS di Catania.

Dopo le due linee di alimentazione si trova lo scambiatore di calore intermedio (figura 3.3). Per questo componente sono stati utilizzati i dati forniti dalla COMET [26] per uno scambiatore di calore in controcorrente, con più passaggi, a piastre saldobrasate in acciaio AISI-316L, di 15 kW. Tale scelta è stata fatta tenendo presente che il sistema dovrà essere utilizzato per asportare una potenza massima di circa 10 kW.

Nello scambiatore di calore, il passaggio della portata di acqua secondaria avviene all'interno di canali alterni, in controcorrente con i canali intermedi dove fluisce l'acqua primaria.

La regolazione della temperatura del refrigerante secondario all'uscita dello scambiatore avviene attraverso un PLC che, sulla base del valore della temperatura misurata nel sensore di temperatura TT2, varia la portata primaria per mezzo dell'apertura/chiusura della valvola a tre vie VM3 (figura 3.3), posizionata all'ingresso dello scambiatore intermedio. La temperatura del refrigerante primario in ingresso allo scambiatore è pari a 8 °C.

La regolazione deve assicurare che la temperatura del refrigerante secondario all'ingresso del target sia pari a 20 °C (setpoint di esercizio fisso).

La temperatura del fluido secondario all'ingresso dello scambiatore viene misurata attraverso il trasduttore di temperatura TT1 (figura 3.2 e 3.3).

Un misuratore di pressione PP4, posizionato dopo lo scambiatore di calore e prima dell'ingresso della linea di mandata (figura 3.4) all'interno del locale A7, consente di monitorare la pressione del circuito secondario.

A valle dello scambiatore si trova il demineralizzatore utilizzato per eliminare la presenza di impurità nel fluido refrigerante (figura 3.4).

Per il demineralizzatore, i dati tecnici hanno riguardato un dispositivo [27] compatibile con le dimensioni necessarie per la sua collocazione nella linea di mandata del sistema secondario.

Una linea di bypass permette di isolare la linea del demineralizzatore, o parzializzare la portata di refrigerante che attraversa il dispositivo, se necessario.

Dal locale A17 (figura. 3.1), attraverso la soletta, due tubi verticali (mandata e ritorno), di diametro pari a 60 mm, collegano il sistema descritto in precedenza ai collettori di distribuzione installati al livello inferiore, nel locale A7 (figura 3.5).

Nel collettore di mandata si diramano tre linee che entrano nel locale A6 (figura 3.5) dove è posizionata la camera target. Una prima linea è dedicata alla refrigerante della porzione cilindrica del cover del target, la seconda linea consente la refrigerazione del sistema puntali e piatto del cover, che di seguito indicheremo come sistema puntali-piatto, la terza linea, invece, è dedicata alla refrigerazione della strumentazione.

Uno schema della serpentina in cui fluisce il fluido refrigerante per raffreddare il cover del target e il passaggio dell'acqua all'interno dei tre puntali vengono mostrati in figura 3.6.

Le tre linee si ricollegano al collettore di ritorno, sempre nel locale A7.

In prossimità dei collettori, per ognuna delle linee di mandata e di ritorno, si prevede l'installazione di misuratori di portata (flussimetri FF1, FF2, FF3, FF4, FF5, FF6) e sonde di temperatura (TT3, TT4, TT5, TT6, TT7, TT8) che

permettono di monitorare le portate e le temperature di ingresso e di uscita del fluido refrigerante nel complesso target (figura 3.5). La posizione di questi dispositivi nel locale A7 garantisce che la radiazione prodotta nel target non abbia effetti negativi sulla strumentazione.

Vengono impiegate diverse valvole a sfera di tipo manuale di diametro nominale diverso a seconda della tubazione su cui sono montate [29], utili per l'isolamento di parti del sistema, quando necessario.

Nella tabella 3.1 sono riportati le principali caratteristiche termoidrauliche di alcuni parametri fisici del sistema.

Tabella 3.1 - Principali caratteristiche termoidrauliche del circuito di refrigerazione target

| | Valore nominale | unità | note |
|---|------------------------|--------------|---|
| Portata del refrigerante secondario | 1200 | l/h | Portata garantita da ciascuna pompa del sistema ridondante |
| Portata del refrigerante primario | 550 | l/h | valore massimo 860 l/h |
| Temperatura uscita scambiatore secondario | 20 | °C | Punto di lavoro fisso |
| ΔT scambiatore, lato secondario | 7 | °C | |
| Temperatura ingresso scambiatore primario | 8 | °C | |
| Δt scambiatore, lato primario | 15 | °C | Valore massimo consentito 15 °C |
| Potenza termica totale | 10 | kW | 8,5 kW prodotti dal fascio protonico e 1,5 kW prodotti nella sistema target |

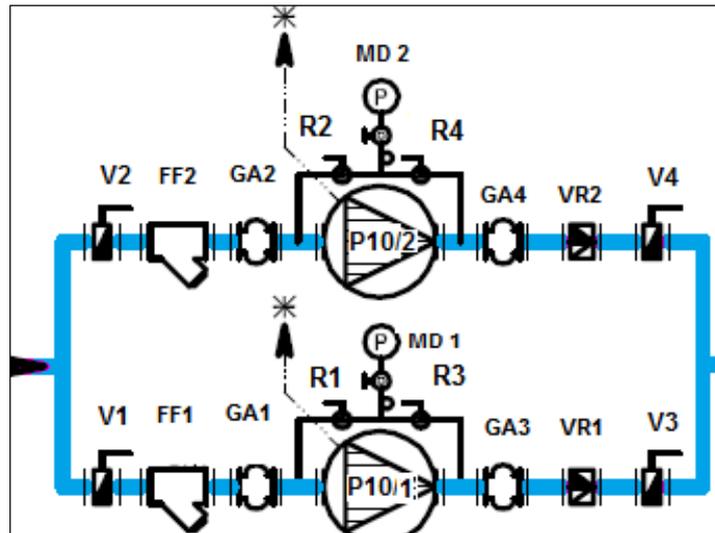


Figura 3.2 - Linea ridondante di alimentazione

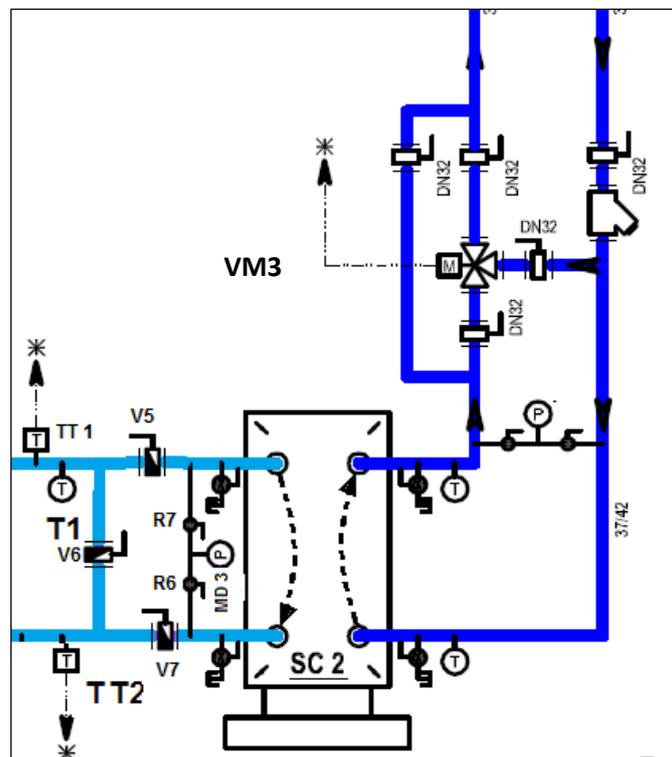


Figura 3.3 - Scambiatore di calore intermedio e posizione della strumentazione per la misura della temperatura del fluido refrigerante secondario all'ingresso e uscita dello scambiatore

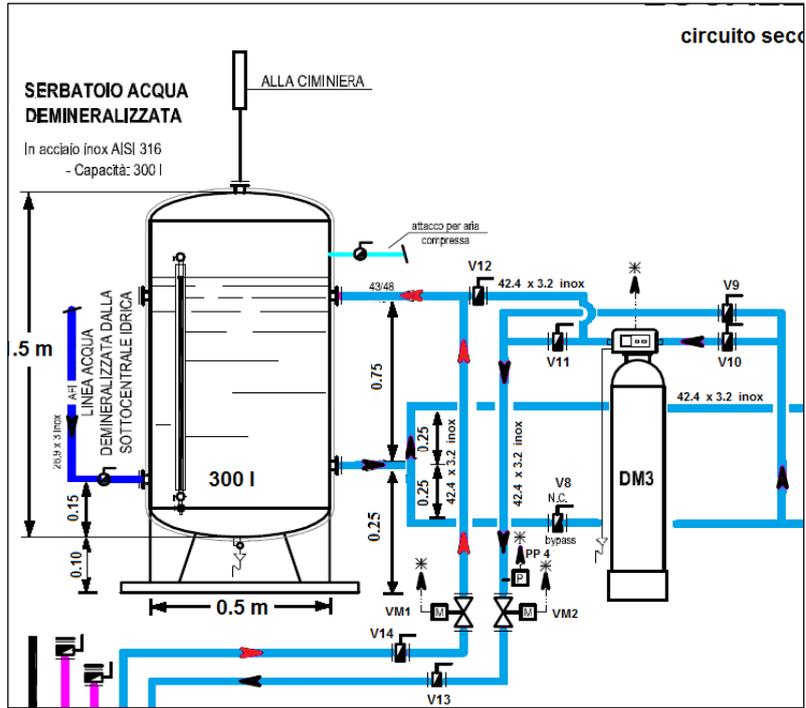


Figura 3.4 - Demineralizzatore e linee di mandata e ritorno dal target

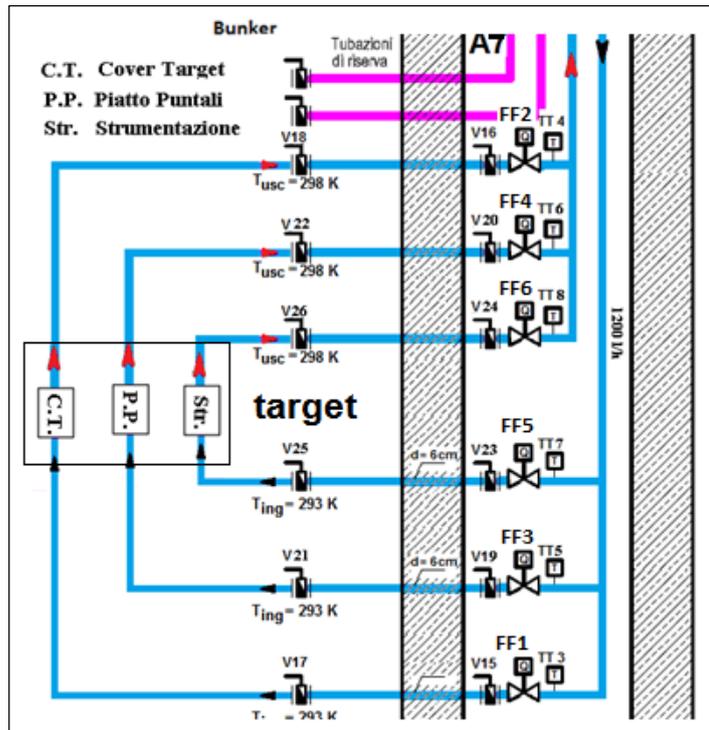


Figura 3.5 - Linea di mandata e ritorno nel locale A7 e strumentazione di misura posizionata nel collettore

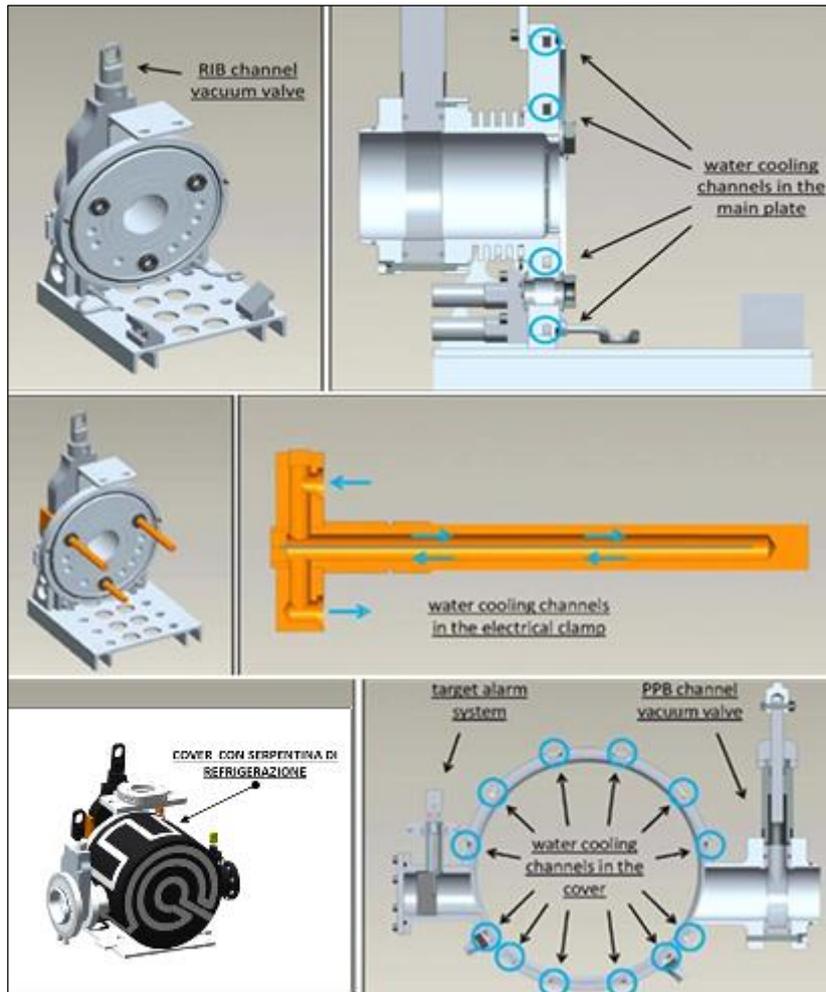


Figura 3.6 - Camera target: cover, piatto, e puntali nel sistema target

3.3 ANALISI HAZOP DEL SISTEMA DI REFRIGERAZIONE DEL TARGET DELL'IMPIANTO SPES

3.3.1 Introduzione

Il metodo HAZOP è uno strumento di analisi di sicurezza molto utilizzato in vari settori industriali e permette di individuare le condizioni di incidente (Top Event, TE) che possono verificarsi nelle diverse condizioni operative di funzionamento. In particolare, l'impianto viene suddiviso in sotto-sistemi e per ogni sottosistema vengono studiate le deviazioni dei principali parametri fisici del processo in alcuni punti detti "nodi interni" e/o "nodi di frontiera" (tra due sistemi confinanti).

Per l'impianto di refrigerazione il "nodo di frontiera" di riferimento è un punto del sistema di refrigerazione posizionato all'interno del cover target.

I parametri fisici analizzati sono:

- Pressione;
- Portata;
- Temperatura.

Per lo svolgimento dell'analisi è stato opportuno concordare una ipotetica/plausibile/ possibile procedura di avviamento dell'impianto SPES in tre fasi principali:

- Ramp-Up del circuito idraulico, con riscaldatori e fascio spenti;
- Accensione dei riscaldatori;
- Avvio del fascio (Beam-On).

Per ognuna delle tre fasi operative sono state compilate le schede HAZOP, come riportato nelle appendici A2-A4. L'analisi ha consentito di individuare diversi TE. Per alcuni dei TE individuati, sono state svolte le simulazioni termofluidodinamiche tramite il codice RELAP5-3D per individuare la gravità delle conseguenze.

Va tenuto presente che a causa dell'insufficienza dei dati tecnici di alcuni componenti dell'impianto, ai fini della formulazione delle analisi HAZOP e della schematizzazione RELAP, è stato necessario utilizzare le informazioni riportate in letteratura per componenti commerciali della stessa tipologia.

Di seguito viene riportata una descrizione dettagliata dello schema dell'impianto di refrigerazione utilizzato per lo svolgimento dell'analisi integrata.

3.3.2 Descrizione della procedura di avviamento dell'impianto SPES

Come già detto, per la formulazione delle analisi è stato necessario fare alcune ipotesi sulle procedure di avvio, non essendo ancora stato definito il quadro operativo di funzionamento. Si noti che questo lavoro riguardante la schematizzazione del processo potrà ritornare utile quando verranno messe a punto le procedure di esercizio per la conduzione dei test sperimentali.

Il primo step, prima della fase di avvio, riguarda l'ispezione e la verifica

della funzionalità dei vari componenti del sistema di refrigerazione (circuito idraulico primario e secondario).

Dopo avere controllato la corretta apertura e chiusura delle valvole manuali nel locale A17, si effettuano le seguenti operazioni per la procedura di Rump-up:

- controllo livello di refrigerante nel serbatoio;
- avvio pompa secondaria P10/2 e verifica del raggiungimento del punto di lavoro nominale (numero di giri pompa, portata, prevalenza);
- verifica del raggiungimento della pressione nominale (verifica della sonda di pressione PP4);
- verifica del raggiungimento della portata nominale (controllo dei valori della portata attraverso i flussimetri FF1, FF2, FF3, FF4, FF5, FF6);
- spegnimento della pompa secondaria P10/2;
- avvio pompa primaria P10/1 e verifica del raggiungimento del punto di lavoro nominale (numero di giri pompa, portata, prevalenza);
- verifica del raggiungimento della pressione nominale (verifica della sonda di pressione PP4)
- verifica del raggiungimento della portata nominale (controllo dei valori della portata attraverso i flussimetri FF1, FF2, FF3, FF4, FF5, FF6).

Si procede, quindi, con la fase operativa successiva riguardante l'accensione dei riscaldatori del target e l'esecuzione dei seguenti step:

- Controllo della temperatura del target attraverso i sensori di temperatura da TT1 a TT8;
- Controllo delle temperature ingresso uscita dello scambiatore di calore attraverso i sensori di temperatura TT1, TT2;
- verifica della pressione attraverso il sensore PP4.

Infine, si procede con l'accensione del fascio (beam-on). In questa fase

occorre riverificare i parametri termoidraulici dell'impianto e si ripetono gli step di controllo descritti in precedenza.

3.3.3 Risultati dell'analisi Hazop

Di seguito sono descritti i risultati dell'analisi HAZOP per ognuna delle tre fasi descritte nel paragrafo precedente.

3.3.3.1 Fase Ramp-up

Durante questa fase operativa si attiva il sistema idraulico di circolazione del refrigerante primario e secondario, si valuta il corretto funzionamento del gruppo pompe (attivando consecutivamente entrambe le linee di ricircolo) e si verifica il valore delle portate del refrigerante in ingresso ai tre collettori.

Sono stati individuati per il nodo in esame due TE (appendice A2):

- mancanza di portata (indicato con TE_A1);
- aumento della pressione (indicato con TE_A2).

Qualora si verifichi il TE_A1 occorre: fermare le operazioni di avviamento, spegnendo la pompa di circolazione; individuare e rimuovere le cause di guasto. Le cause individuate sono:

- Chiusura spuria della valvola elettropneumatica VM1 o VM2 (figura 3.4);
- Valvola manuale chiusa (errore umano) sia a monte che a valle del nodo.

Per l'aumento della pressione TE_A2, che potrebbe portare al danneggiamento di parti del circuito idraulico nel sistema target, la causa è stata individuata nella chiusura spuria della VM1.

Sulla base dei risultati ottenuti, si suggerisce l'introduzione di una seconda sonda di pressione, posizionata a valle del sistema target sulla linea di ritorno del refrigerante all'interno del locale A17, dopo la valvola VM2.

L'inserimento di questa sonda, oltre a consentire la ridondanza di misura

della sonda PP4, permetterebbe di individuare in maniera inequivocabile che l'evento iniziatore è da associare al guasto della valvola VM1 oppure alla valvola VM2. Senza questo ulteriore controllo l'operatore, da remoto, non è in grado di interpretare la causa del malfunzionamento.

3.3.3.2 Accensione dei riscaldatori

Per questa fase operativa e per il nodo in esame, l'analisi ha permesso di individuare tre TE (appendice A3):

- portata ridotta o nulla (indicato con TE_B1);
- aumento della temperatura (indicato con TE_B2);
- aumento della pressione (indicato con TE_B3).

Per il verificarsi del TE_B1, le cause identificate sono:

- chiusura spuria della valvole VM1 o VM2;
- blocco della valvola di non ritorno VR1 o VR2;
- grippaggio della pompa P10/1 o P10/2;
- perdita di refrigerante (Loss Of Coolant Accident) a monte del nodo.

Per il verificarsi del TE_B2, le cause identificate sono:

- chiusura spuria della valvole VM1 o VM2;
- blocco della valvola di non ritorno VR1 o VR2;
- perdita di refrigerante (LOCA) a monte del nodo;
- grippaggio della pompa P10/1 o P10/2
- malfunzionamento della valvola a tre vie VM3 che regola la portata nel circuito primario;
- misura errata delle sonde di temperatura TT1 e TT2.

Infine, per il verificarsi del TE_B3 la causa individuata è la chiusura spuria della valvola VM1, le conseguenze sono analoghe a quelle descritte per la fase di rump-up.

È interessante osservare che, nel caso in cui si verificano gli incidenti TE_B1 o TE_B2 è sufficiente fermare le operazioni, spegnendo la pompa di circolazione ed i riscaldatori, e rimuovere le cause di guasto. Diversa

considerazione va fatta per TE_B3, poiché questo evento può portare un danneggiamento del sistema di refrigerazione nel target non identificabile. Di conseguenza, anche se viene rimosso il guasto dovuto alla valvola VM1, si potrebbero verificare condizioni di degrado dello scambio termico durante la fase successiva della procedura di avvio del fascio. Quindi è necessario prevedere adeguate procedure manutentive utili per diagnosticare i guasti, oppure mettere a punto accurate procedure per il controllo della temperatura nei collettori di ingresso e di uscita.

3.3.3.3 Fase beam-on

In questa fase operativa, l'impianto deve garantire l'asportazione della potenza termica prodotta nel target.

Per il nodo in esame sono stati individuati i seguenti TE (appendice A4):

- assenza di portata (TE_C1);
- aumento della temperatura (TE_C2);
- aumento della pressione (TE_C3).

Ovviamente la criticità di questi eventi è particolarmente importante a causa del rischio radiologico ad essi associato (possibile rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente in caso di danneggiamento del sistema target).

Le cause sono molteplici ed in parte coincidono con quelle identificate nella fase di ramp-up e l'avvio dei riscaldatori.

Per il verificarsi del TE_C1, le cause identificate sono:

- chiusura spuria della valvole VM1 o VM2;
- blocco della valvola di non ritorno VR1 o VR2;
- grippaggio della pompa P10/1 o P10/2;
- perdita di refrigerante (LOCA) a monte del nodo.

Per il verificarsi del TE_C2, le cause identificate sono:

- chiusura spuria della valvole VM1 o VM2;
- blocco della valvola di non ritorno VR1 o VR2;
- perdita di refrigerante (LOCA) a monte del nodo;

- grippaggio della pompa P10/1 o P10/2
- malfunzionamento della valvola a tre vie VM3 che regola la portata nel circuito primario;
- misura errata delle sonde di temperatura TT1 e TT2
- overpower di potenza nel target

Infine, per il verificarsi del TE_C3 la causa individuata è la chiusura spuria della valvola VM1. Particolarmente importante è l'aumento della temperatura TE_C2 che può essere generato da condizioni di "overpower" di potenza a causa di variazioni dell'intensità del fascio di protoni con conseguente aumento delle reazioni di fissioni.

3.4 SIMULAZIONI DI ALCUNI EVENTI INCIDENTALI CON CODICE RELAP5-3D

3.4.1 Introduzione

Sulla base dei risultati dell'analisi HAZOP, descritta nei paragrafi precedenti, sono stati simulati con il codice RELAP5-3D cinque transitori incidentali riguardanti diverse tipologie di LOCA e overpower.

Questa attività ha comportato un lavoro preliminare riguardante la messa a punto e successiva validazione della schematizzazione RELAP.

Tale lavoro è stato svolto secondo tre fasi principali:

- acquisizione delle caratteristiche tecniche dei componenti e dei parametri nominali di funzionamento dell'impianto, necessari per la nodalizzazione RELAP;
- predisposizione dello schema di impianto e sua modellizzazione ai fini della formulazione dell'input RELAP;
- simulazione del comportamento termo-fluidodinamico del sistema di refrigerazione in condizioni nominali, sotto diverse condizioni operative.

L'attività di validazione dell'input ha riguardato i seguenti parametri fisici:

- perdite di carico nel target, come indicato dai progettisti del sistema;

- temperature e parametri di scambio per lo scambiatore di calore intermedio, sulla base delle specifiche tecniche indicate dal costruttore;
- regolazione della portata nel sistema di refrigerazione primario, volta a garantire il setpoint di temperatura del fluido secondario in ingresso al target;
- condizioni di scambio termico nominali per i tre sistemi di refrigerazione del target (cover, puntali-piatto, strumentazione).

Per quanto riguarda le simulazioni dei transitori incidentali, dopo il raggiungimento delle condizioni di stazionario, con fascio acceso, all'istante di tempo $t = 12000$ s, si verifica l'evento incidentale in studio.

3.4.2 Schematizzazione RELAP5 dell'impianto di refrigerazione

La schematizzazione RELAP viene riportata in figura 3.7.

Per il circuito primario, si è assunto che l'acqua primaria in ingresso allo scambiatore sia sempre fornita alla temperatura di 8 °C (non sono considerati guasti nel sistema di controllo o nei dispositivi del circuito primario). Per la modellizzazione RELAP si è fatto ricorso ad un volume tempo dipendente (Time-Dependent Volume Component 700 in figura 3.8) che consente di simulare la portata primaria alla temperatura di esercizio.

Come descritto in precedenza, la regolazione della temperatura del refrigerante secondario all'uscita dello scambiatore è effettuata attraverso la variazione della portata primaria mediante la valvola a tre vie VM3 asservita alla sonda di temperatura TT2.

La regolazione è stata simulata attraverso l'apertura, o chiusura, delle servovalvole srvvlv 712 e 714, connesse al volume tempo dipendente 700 attraverso il branch 711 (figura 3.8).

Sono state definite opportune variabili di controllo che dipendono dalla variabile temperatura del fluido refrigerante (tempf) nel primo volume del pipe 245 (figura 3.8), in corrispondenza del punto di misura della sonda

TT2. Utilizzando queste variabili di controllo, è stata messo a punto un modello di regolazione di tipo proporzionale che consente di variare la sezione normalizzata di srvvlv 712 e, quindi, di regolare la portata primaria in ingresso nei canali dello scambiatore intermedio. La valvola srvvlv 714, consente di simulare la sezione deviatrice della valvola VM3. La sezione normalizzata viene calcolata come complemento a uno della sezione normalizzata di srvvlv 712.

Il Time-Dependent Volume Component 717 schematizza il volume di scarico della valvola VM3.

Nel circuito secondario, il pipe 001, suddiviso in 30 sotto-volumi e riempito con acqua demineralizzata per il 95% del volume, rappresenta il serbatoio da 300 litri da cui, tramite il branch 005, l'acqua viene prelevata attraverso la linea principale di pompaggio, schematizzata con i volumi da 015 a 077 (figura 3.7).

La linea di pompaggio secondaria è stata schematizzata con i volumi da 114 a 176.

All'interno di ciascuna linea, sono stati schematizzati in sequenza un filtro flangiato (volume 023, per la linea 1, e volume 122, per la linea 2), un giunto antivibrante (volume 031, per la linea 1, e volume 130, per la linea 2), una linea per la misura della differenza di pressione ingresso-uscita pompa (volumi da 035 a 051, per la linea 1, e volumi da 134 a 150, per la linea 2), una pompa (tmdpjun 053, per la linea 1, e tmdpjun 152, per la linea 2), un giunto antivibrante (volume 063, per la linea 1, e volume 162, per la linea 2), e una valvola di non ritorno (vlv 069, per la linea 1, e vlv 168, per la linea 2).

La portata viene garantita attraverso la schematizzazione della pompa con una giunzione tempo-dipendente (tmdpjun 053 per linea 1 e tmdpjun 152 per la linea 2), che consente di imporre la portata nominale.

Il pipe 210 rappresenta il passaggio del refrigerante nel lato secondario dello scambiatore di calore, mentre il pipe 730 schematizza il passaggio dell'acqua nel lato primario (figura 3.8).

Per consentire la simulazione delle perdite di carico dovute al passaggio del fluido in canali alterni, i sotto-volumi sono stati schematizzati con angoli verticali pari a 90° e -90° , con scambio termico in controcorrente.

Una struttura termica, suddivisa in 10 sotto-volumi, permette di schematizzare lo scambio termico per conduzione nelle piastre dello scambiatore intermedio.

Il demineralizzatore è stato schematizzato con il pipe P275 di lunghezza pari a 0,4 m (figura 3.10), mentre la linea di bypass viene simulata con i pipe da 266 a 270.

Nella linea di mandata e in quella di ritorno dal target, nel locale A17, le valvole VM1 e VM2 sono state schematizzate, rispettivamente, con trip valvole (trpvlv) 485 e 320.

I branches 343 e 472 schematizzano i collettori di ingresso e di uscita delle linee di alimentazione nel locale A7. Le linee che portano il refrigerante dal collettore di alimentazione al sistema target e dal sistema target al collettore di uscita viene mostrato in figura 3.11.

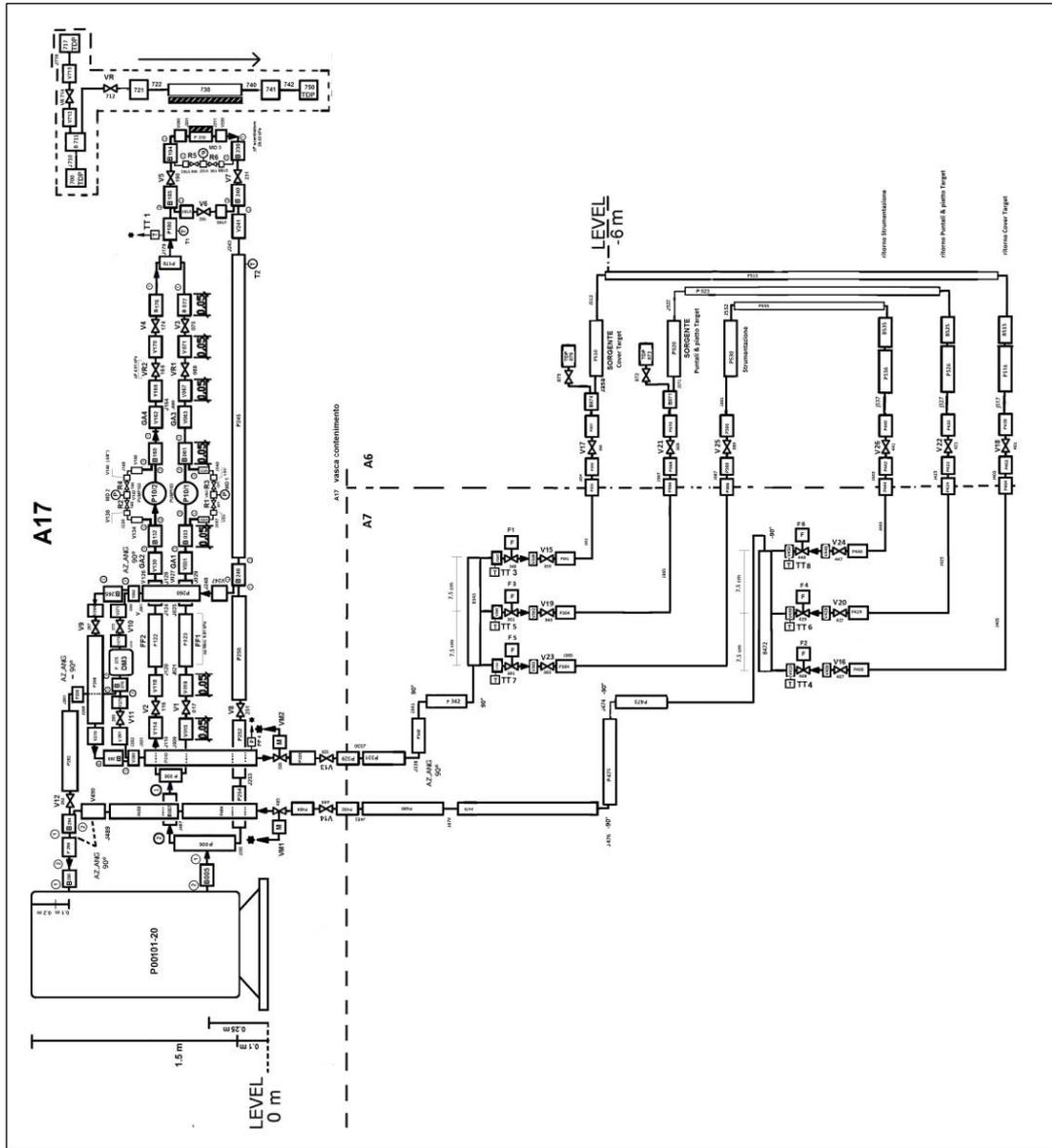


Figura 3.7 Schematizzazione RELAP dell'impianto di refrigerazione di SPES

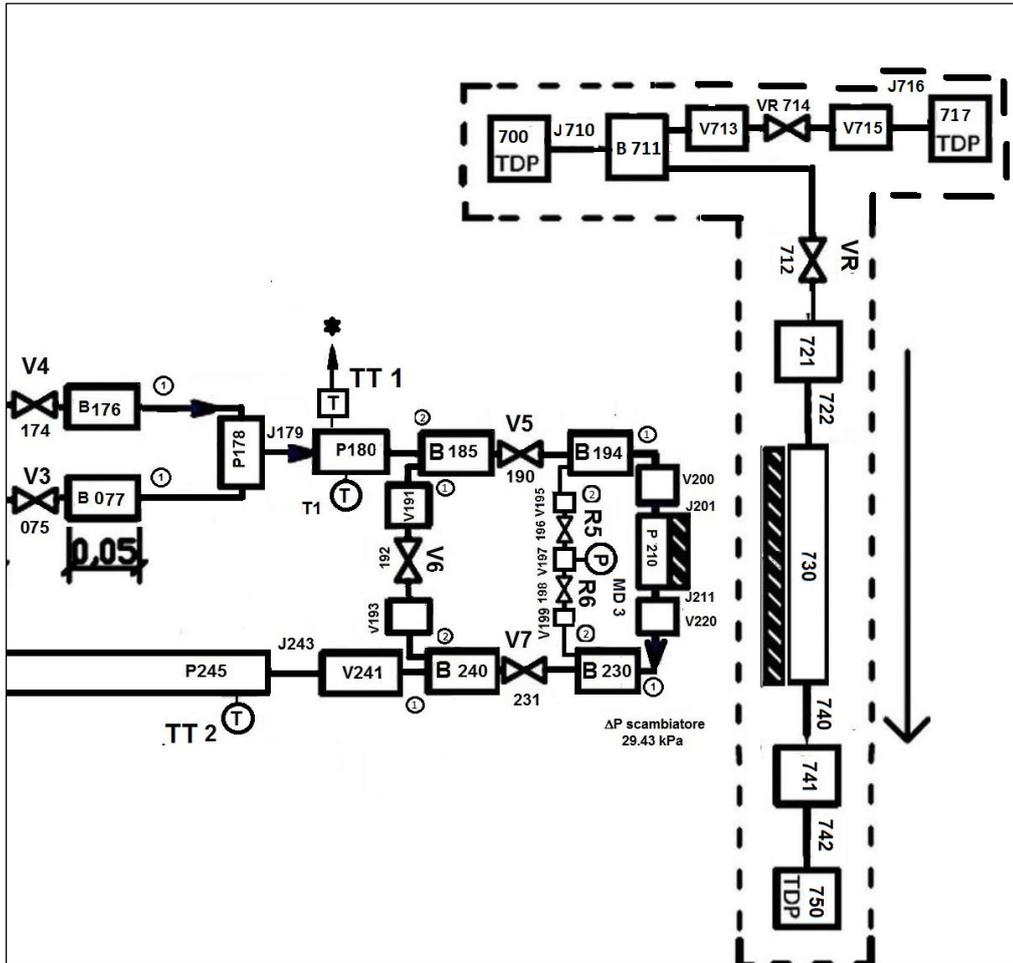


Figura 3.8 - Schematizzazione RELAP del circuito primario e dello scambiatore intermedio

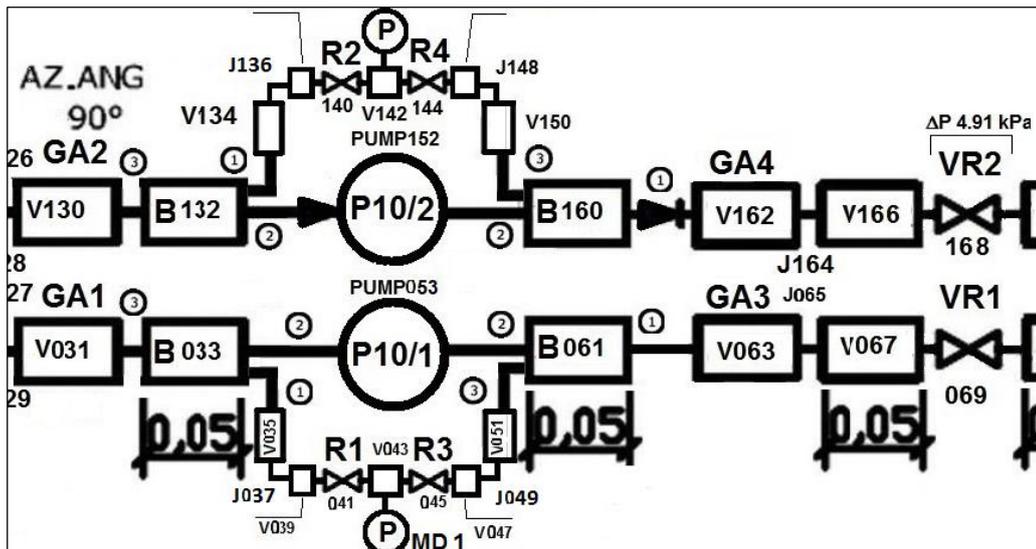


Figura 3.9 - Schematizzazione RELAP del sistema ridondante di alimentazione del refrigerante secondario

Il sistema di refrigerazione del cover, dell'insieme puntali-piatto, e della strumentazioni sono stati schematizzati rispettivamente con i pipes 510, 520 e 530. Le caratteristiche geometriche sono state valutate sulla base dei disegni costruttivi forniti dai ricercatori dell'INFN.

Per la simulazione dello scambio termico, sono stati schematizzati tre distinte strutture termiche (una per ogni canale) che consentono di simulare la potenza depositata nel sistema cover, puntali-piatto e strumentazioni.

In figura 3.12 viene mostrato una vista dell'impianto del locale A17, ottenuta con l'interfaccia grafica del codice Relap5-3D.

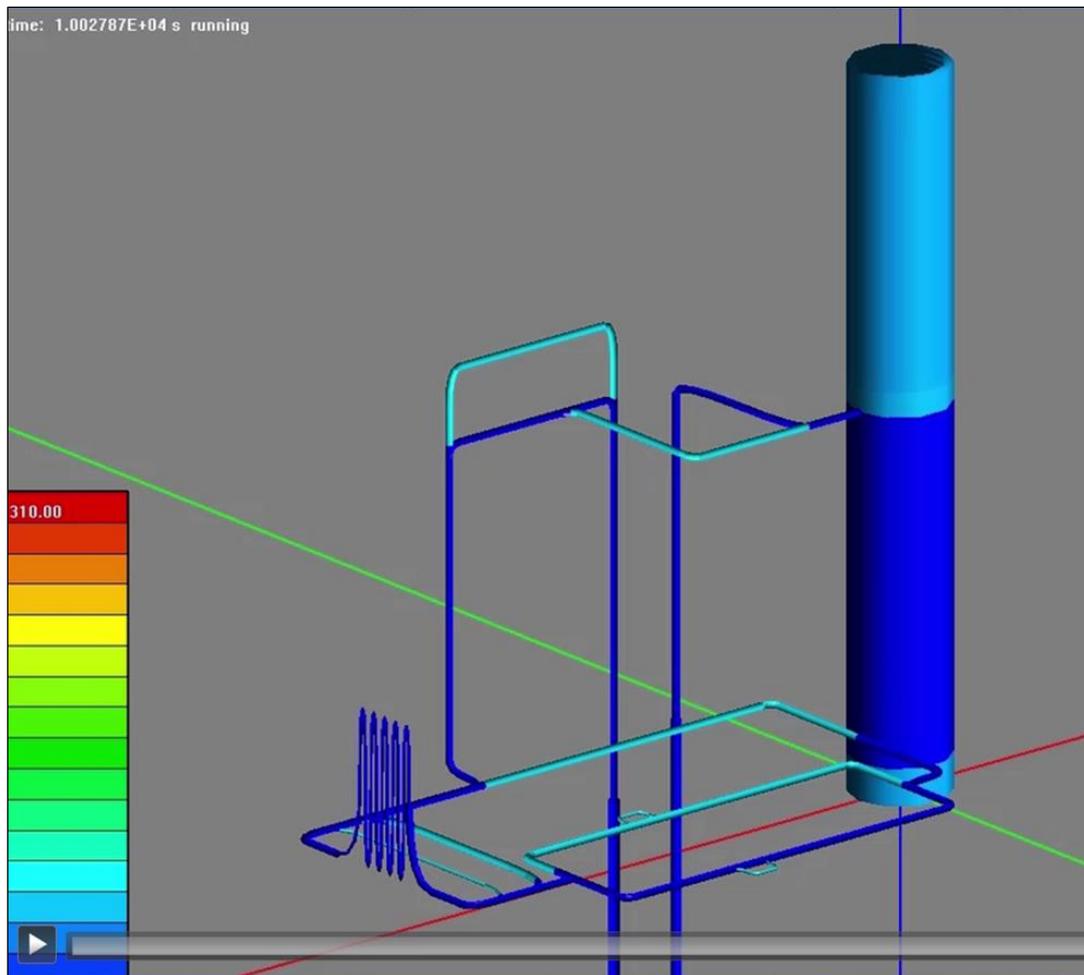


Figura 3.12 - Visualizzazione della schematizzazione Relap-3D riguardante il serbatoio, lo scambiatore di calore ed le varie linee dell'impianto all'interno del locale A17

3.4.3 ANALISI DEI TRANSITORI LOCA

La simulazione dei transitori incidentali LOCA è stata svolta ipotizzando il guasto dei sistemi di controllo e di sicurezza che, come indicato nelle analisi HAZOP, portano allo spegnimento del fascio primario in caso di riduzione della pressione nel circuito di refrigerazione secondario e di aumento della temperatura nel target. Quindi, il fascio di protoni continua ad essere erogato e, di conseguenza, la potenza rilasciata sul target rimane costante per tutta la durata dei transitori esaminati.

La schematizzazione della perdita della portata nel break viene effettuata attraverso la *trip valve 875* posizionata a monte del cover target. Questa ipotesi consente di esaminare la peggiore condizione dal punto di vista delle conseguenze, in quanto il cover è la sezione del target più sollecitata dal punto di vista termico.

L'evento incidentale inizia con l'apertura della valvola 875 all'istante $t=12000$ s.

Si noti che nella schematizzazione riportata in figura 3.11 sono state inserite due trip valve all'ingresso del sistema di refrigerazione puntali-piatto e strumentazione per consentire future analisi riguardanti ipotesi di rottura in questi condotti.

Sono state simulate tre differenti rotture, come riportato in tabella 3.3, dove viene mostrata la percentuale della sezione di apertura della valvola 875 (A), normalizzata rispetto al valore della sezione del condotto (A_0), e la percentuale della portata persa rispetto al valore nominale dopo i primi istanti del transitorio, quando la pressione del circuito secondario si stabilizza.

Come era da attendersi, all'aumentare della rottura, la portata persa nel break aumenta e le fenomenologie che si sviluppano nei veri transitori si evolvono sempre più rapidamente.

Tabella 3.3 Sezione di rottura della linea del circuito secondario utilizzate per la simulazione dell'incidente LOCA

| sezione di rottura /sezione nominale del tubo A/A_0 [%] | Portata rottura/portata nominale G/G_0 [%] |
|---|--|
| 1 | 7 |
| 10 | 40 |
| 50 | 70 |

3.4.3.1 LOCA con rottura 1%

Le figure 3.13-3.19 mostrano i risultati ottenuti nel transitorio LOCA caratterizzato dalla rottura dell'1% della sezione del condotto.

Nella figura 3.13 vengono riportate il valore della pressione nella sonda di pressione PP4 e la portata del break.

La pressione del circuito, dopo una iniziale rapida riduzione, decresce più lentamente fino a stabilizzarsi al valore di circa 2 bar a $t = 1300$ s.

La portata nel break prima aumenta rapidamente e poi decresce per assestarsi intorno ad un valore pari a 0,022 kg/s (circa il 7% del valore della portata nominale del refrigerante secondario). Questo valore si mantiene per 5500 s dopo l'inizio dell'incidente (circa 90 minuti).

Nello stesso grafico viene riportato l'andamento della portata nel sistema di refrigerazione del cover che si porta al valore di circa 0,105 kg/s (circa il 93% del valore nominale).

Le portate della pompa primaria, del flussimetro FF1 nella linea di ingresso del cover e delle tre linee all'interno della camera target (cover, puntali-piatto, strumentazione) sono mostrate in figura 3.14.

Mentre la pompa continua ad erogare la portata nominale, la riduzione della pressione nel break porta ad una redistribuzione delle portate all'ingresso del collettore, con un incremento del valore della portata nella linea di refrigerazione del cover, come mostrato dall'aumento della portata misurata dal flussimetro FF1. Le portate nel sistema di refrigerazione puntali-piatto e strumentazione raggiungono, rispettivamente, il valore di 0,141 kg/s e 0,062 kg/s. (circa il 92% del valore nominale).

La pressione e la portata che fuoriesce dal break inizia ad oscillare intorno a

$t=17000$ s, quando si verificano malfunzionamenti della pompa primaria. Infatti, la temperatura dell'acqua in aspirazione della pompa (figura 3.15), a causa della continua riduzione della pressione (figura 3.16), raggiunge la condizione di saturazione. La produzione di vapore in questo volume (vedi il grado di liquido nel volume di spirazione della pompa riportato in fig. 3.15) causa la degradazione del corretto funzionamento della pompa, fino all'istante $t=17500$ s, quando la pompa si arresta. Contemporaneamente, la portata al break decresce rapidamente (figura 3.13).

Con lo spegnimento della pompa, il volume di aspirazione si riempie a causa del riversamento dell'acqua dal serbatoio verso la linea di alimentazione. Ciò si può evincere dalla figura 3.17 in cui viene mostrato l'andamento del grado di liquido nei sotto-volumi 17 e 18 del pipe 001 che schematizza il serbatoio.

Quando si verifica il blocco della pompa, il serbatoio risulta essere pieno per il 50% de volume (figura 3.18).

Nelle figure 3.19 e 3.20 vengono riportate le temperature nelle strutture termiche nel sistema di refrigerazione cover, puntali-piatto e strumentazione.

Come si può vedere in figura 3.19, la temperatura, dopo un iniziale aumento di piccola entità all'istante $t=12000$ s a causa della riduzione del refrigerante, con il blocco della pompa comincia ad aumentare significativamente, come si può vedere in dettaglio nella figura 3.20.

Come descritto in precedenza, all'inizio dell'incidente, la redistribuzione di portata nel collettore di ingresso, con un aumento di quella che fluisce nella linea di refrigerazione del cover, consente di compensare la portata persa nel break e di conseguenza di mitigare la riduzione di refrigerante nel sistema cover.

Questo giustifica, all'istante $t= 17500$ s, l'aumento della temperatura nelle strutture termiche del cover meno rapida rispetto alle temperature delle strutture termiche puntali-piatto e strumentazione.

Se prendiamo come riferimento la temperatura limite di 423 K, oltre la quale non è più garantita la tenuta del vuoto nella camera target [7], questo valore viene superato all'istante $t=17700$ s, cioè dopo circa 5700 s (95 minuti) dall'inizio del transitorio (è stato trascurato lo scambio termico con l'ambiente).

Quindi, per questa condizione incidentale si ha un buon margine per la diagnosi del problema e l'avvio delle fasi di intervento e di emergenza.

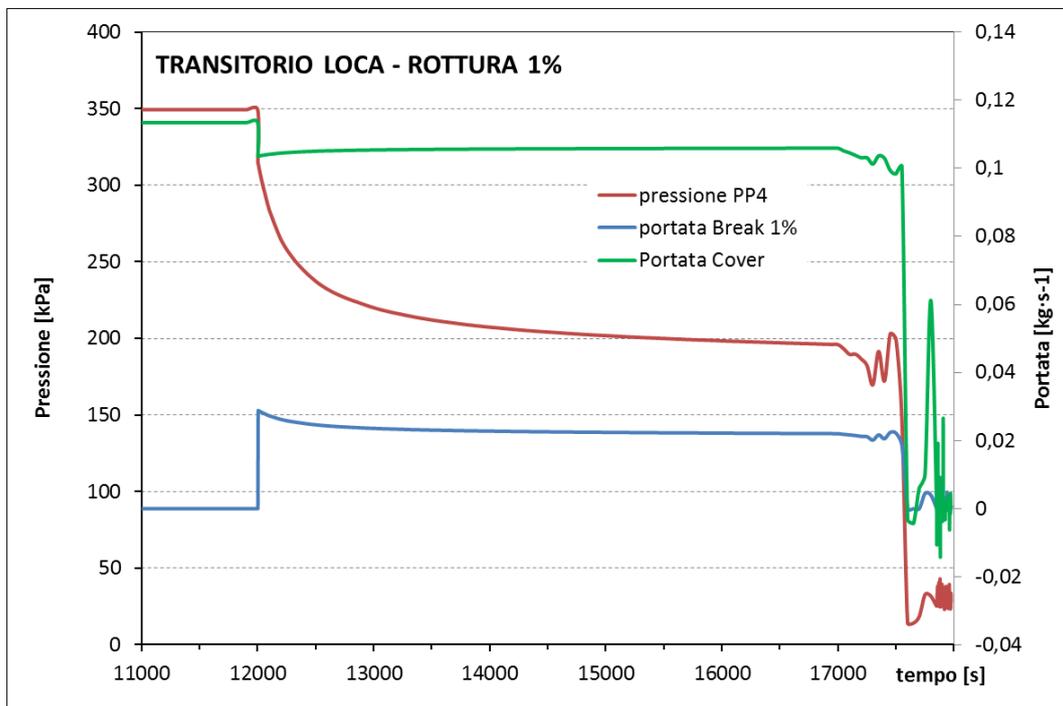


Figura 3.13 - Andamento della pressione nella sonda PP4 e delle portate nel break e nella linea di refrigerazione del cover per il caso LOCA 1%.

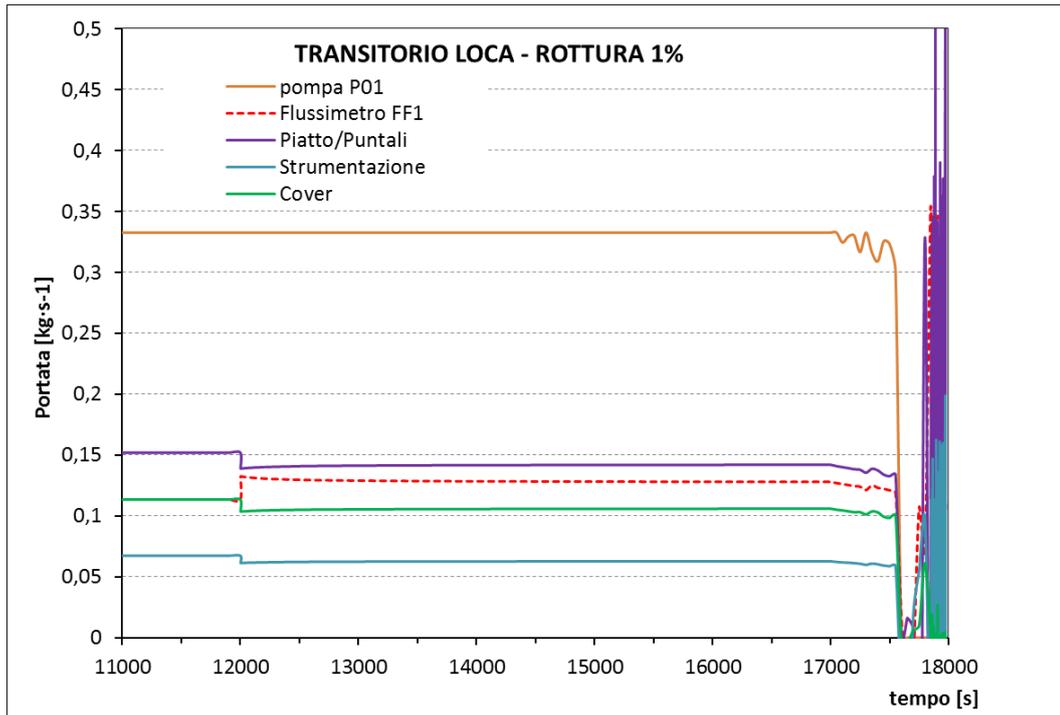


Figura 3.14 - Valore delle portate nella linea cover, puntali-piatto e strumentazione per il caso LOCA 1%. La curva tratteggiata mostra la portata del flussimetro FF1

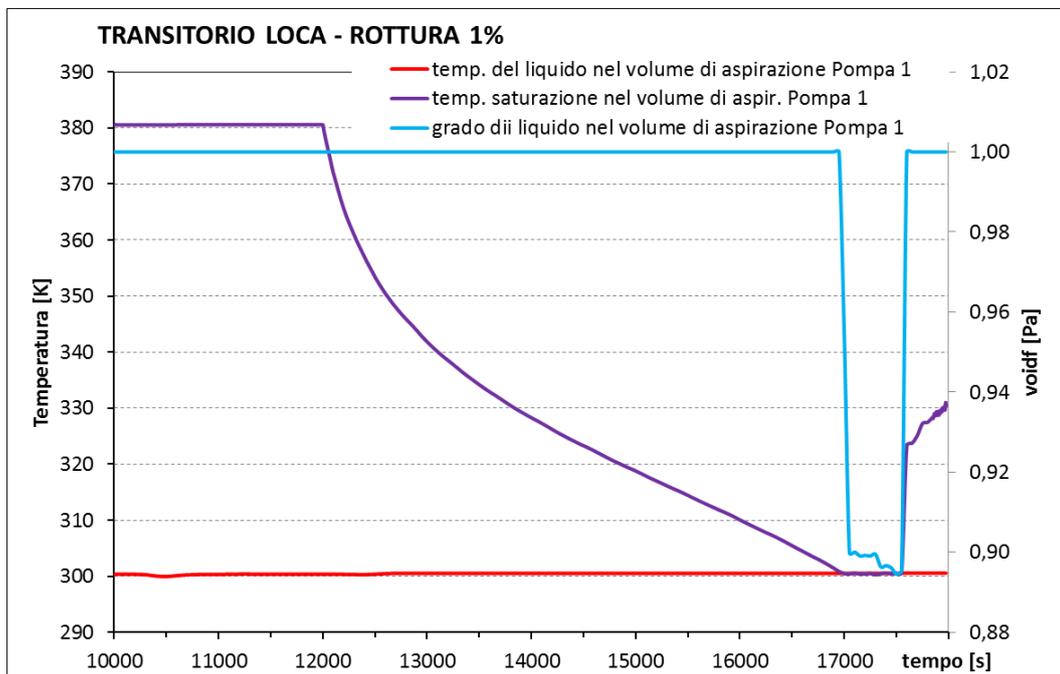


Figura 3.15 - Andamento della temperatura del fluido, della temperatura di saturazione e del grado di liquido nel volume di aspirazione della pompa primaria per il caso LOCA 1%

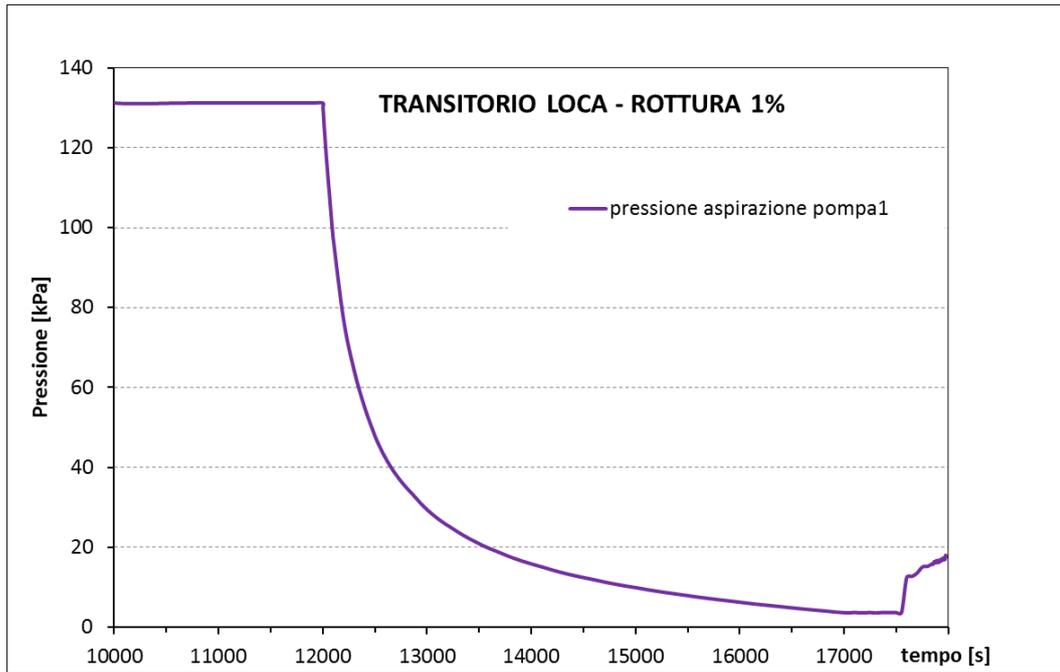


Figura 3.16 - Valore della pressione nel volume di aspirazione della pompa primaria per il caso LOCA 1%

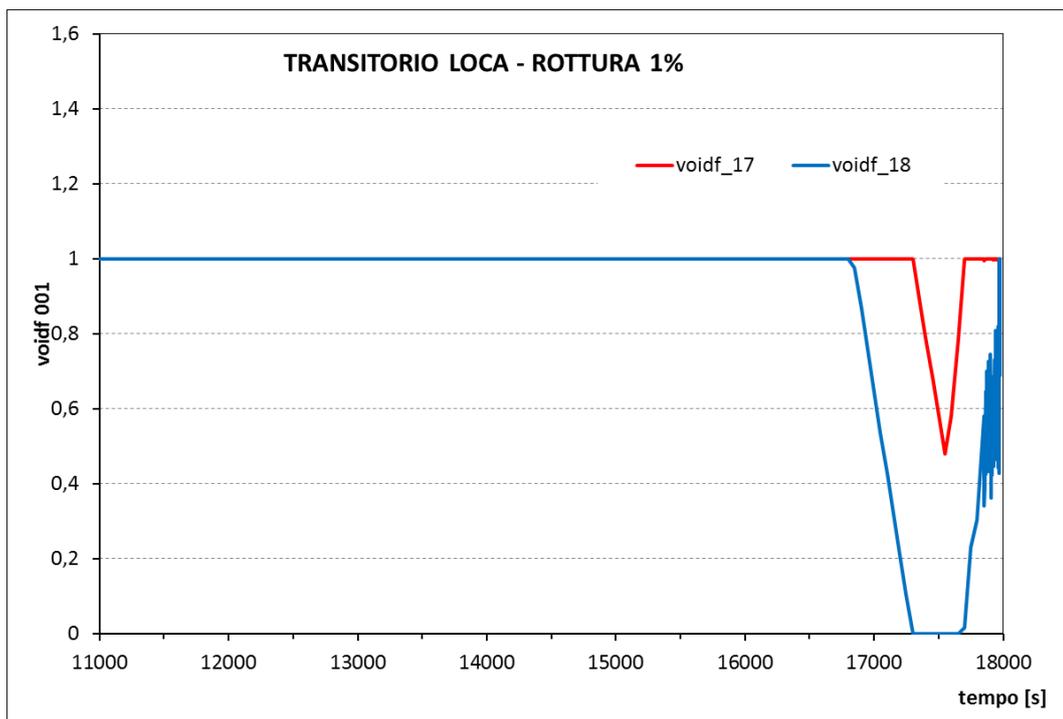


Figura 3.17 - Andamento del livello di liquido nei sotto-volumi 17 e 18 del serbatoio 001 per il caso LOCA 1%

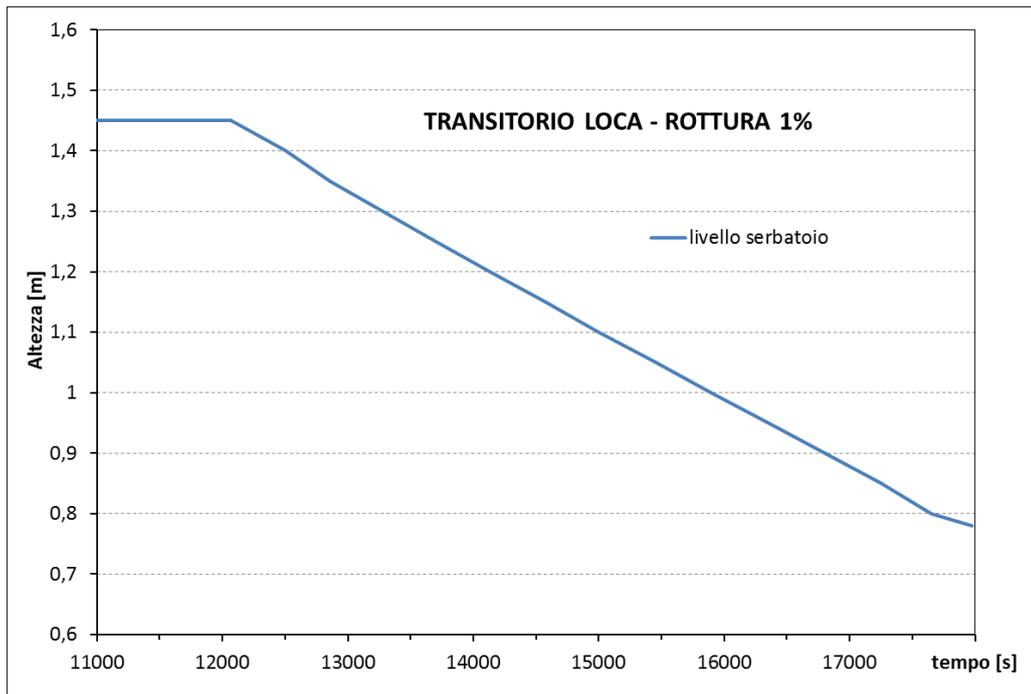


Figura 3.18 - Andamento del livello di liquido nel serbatoio 001 per il caso LOCA 1%

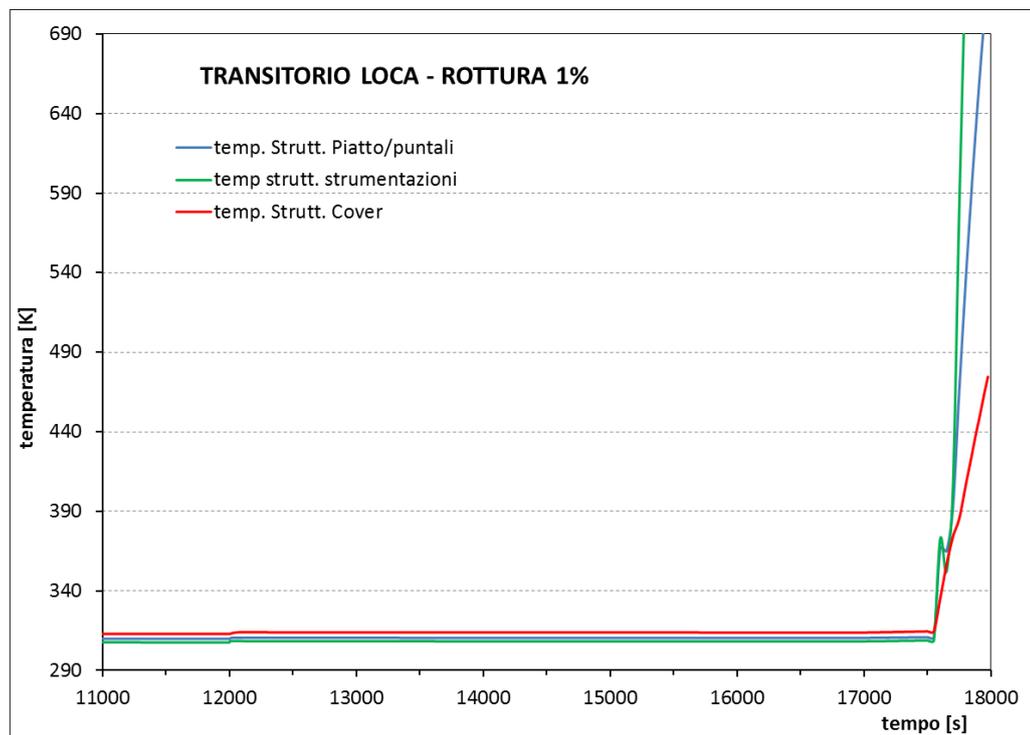


Figura 3.19 - Andamento della temperatura nelle strutture termiche cover, puntali-piatto, e strumentazione per il caso LOCA 1%

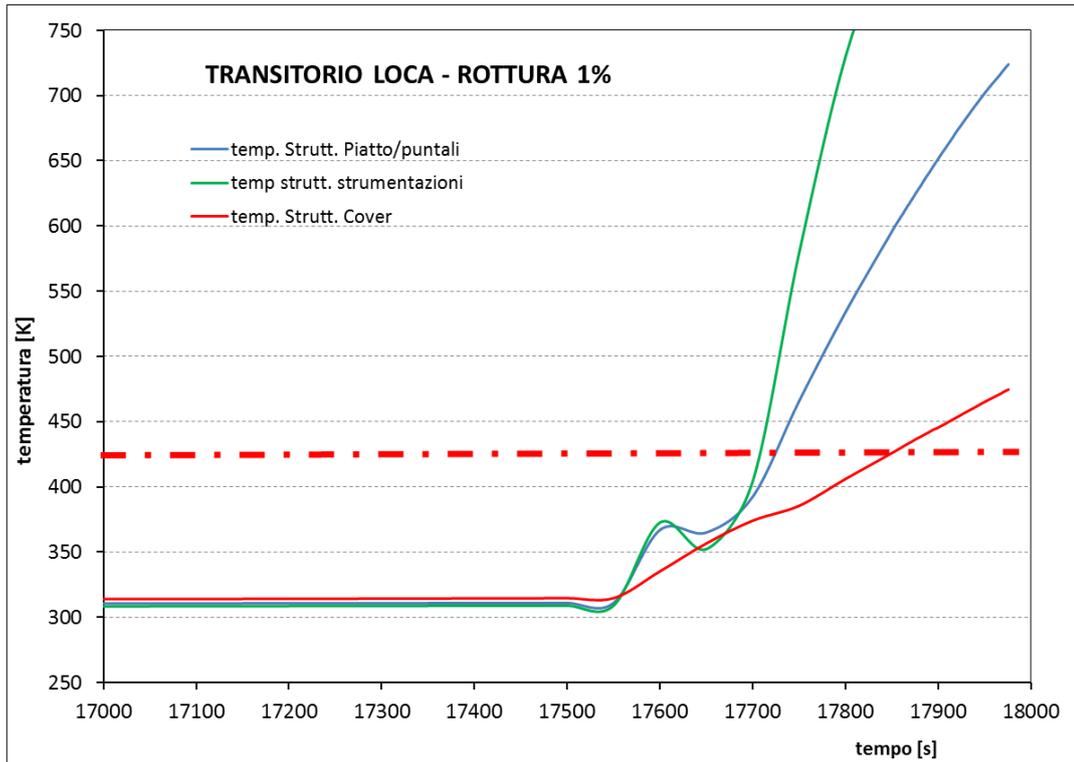


Figura 3.20 - Andamento della temperatura nelle strutture termiche cover, puntali-piatto, e strumentazione a partire dall'istante $t = 17000s$ per il caso LOCA 1%

3.4.3.2 LOCA con rottura 10%

Le figure 3.21-3.27 mostrano i risultati ottenuti per il transitorio LOCA con rottura del 10%.

Il transitorio si evolve come per il caso 1%, tuttavia le sequenze fenomenologiche si sviluppano più velocemente.

Nella figura 3.21 vengono riportate il valore della pressione nella sonda di pressione PP4 e la portata del break.

La pressione, dopo l'inizio dell'incidente, decresce rapidamente fino al valore di circa 1 bar, quando la portata nel break diventa quasi costante, raggiungendo il valore medio di 0,135 kg/s (circa il 40% del valore della portata nominale del refrigerante secondario). Questo valore si mantiene per circa 800 s dopo l'inizio dell'incidente (14 minuti). Nello stesso grafico viene riportato il valore della portata nel sistema di refrigerazione del cover che si porta al valore di 0,067 kg/s .

In figura 3.22 sono riportate le portate della pompa primaria, del flussimetro FF1 e delle tre linee all'interno della camera target (cover, puntali-piatto e strumentazione).

Anche in questo caso, la riduzione della pressione nel circuito, a causa del break, porta ad una redistribuzione delle portate all'ingresso del collettore, con un incremento del valore della portata nella linea di refrigerazione del cover, come mostrato dall'aumento della portata misurata dal flussimetro FF1 di fig. 3.22. Rispetto al caso con rottura 1%, la portata misurata da FF1 è quasi il doppio.

Le portate nel sistema di refrigerazione puntali-piatto e strumentazione, dopo un valore minimo raggiunto nei primi istanti dell'incidente, si stabilizzano, rispettivamente, intorno al valore medio di 0,090 kg/s e 0,039 kg/s. (circa il 60% del valore nominale).

La pressione e la portata di liquido che fuoriesce dal break cominciano ad oscillare intorno a $t=12800$ s, quando inizia la degradazione del funzionamento della pompa a causa della presenza di vapore nel volume di aspirazione (figura 3.23). In figura 3.24 viene riportato l'andamento del valore della pressione a monte della pompa. L'aumento della pressione si verifica solo a seguito del blocco della pompa a $t=13000$ s.

Contemporaneamente, il volume di aspirazione si riempie a causa del riversamento dell'acqua dal serbatoio, come si può vedere nella figura 3.25 in cui viene mostrato l'andamento del grado di liquido nei sotto-volumi 16 e 17 del pipe 001 che schematizza il serbatoio.

Anche per questo transitorio, il serbatoio non si svuota, rimanendo pieno per più della metà (figura 3.26).

Le temperature nelle strutture termiche del sistema di refrigerazione del cover, puntali-piatto e strumentazione aumentano lievemente all'istante $t=12000$ s (figura 3.27). Con l'arresto della pompa e la riduzione della portata di refrigerante, si ha il rapido aumento delle temperature.

La temperatura limite di 423 K viene superata all'istante $t = 13200$ s, dopo

circa 1200 s (20 minuti) dall'inizio del transitorio.

Anche in questo si ha un buon margine per la diagnosi del problema e l'avvio delle fasi di intervento e di emergenza.

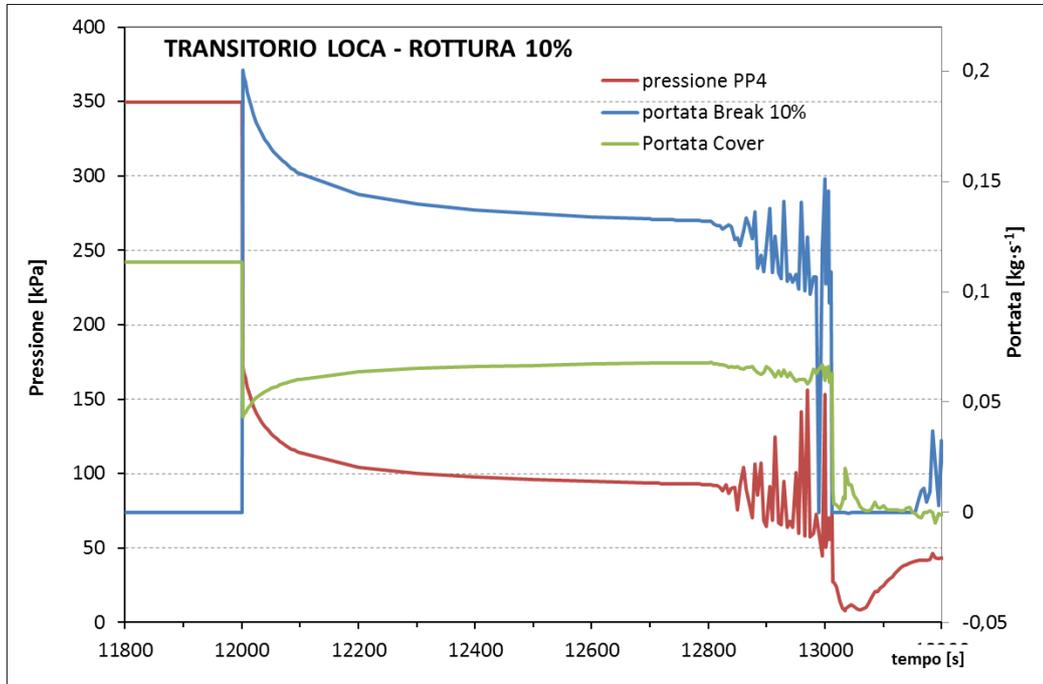


Figura 3.21 - Andamento della pressione nella sonda PP4 e delle portate nel break e nella linea di refrigerazione del cover per il caso LOCA 10%

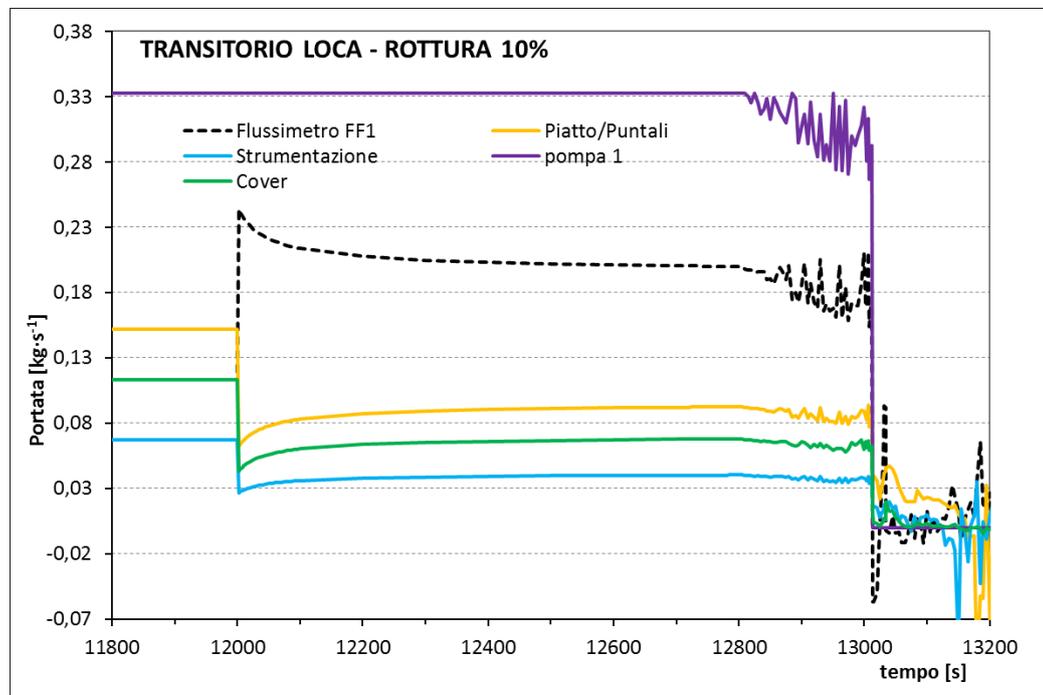


Figura 3.22 - Valore delle portate nella linea del cover, puntali-piatto e strumentazione per il caso LOCA 10%. La curva tratteggiata mostra la portata del flussimetro FF1

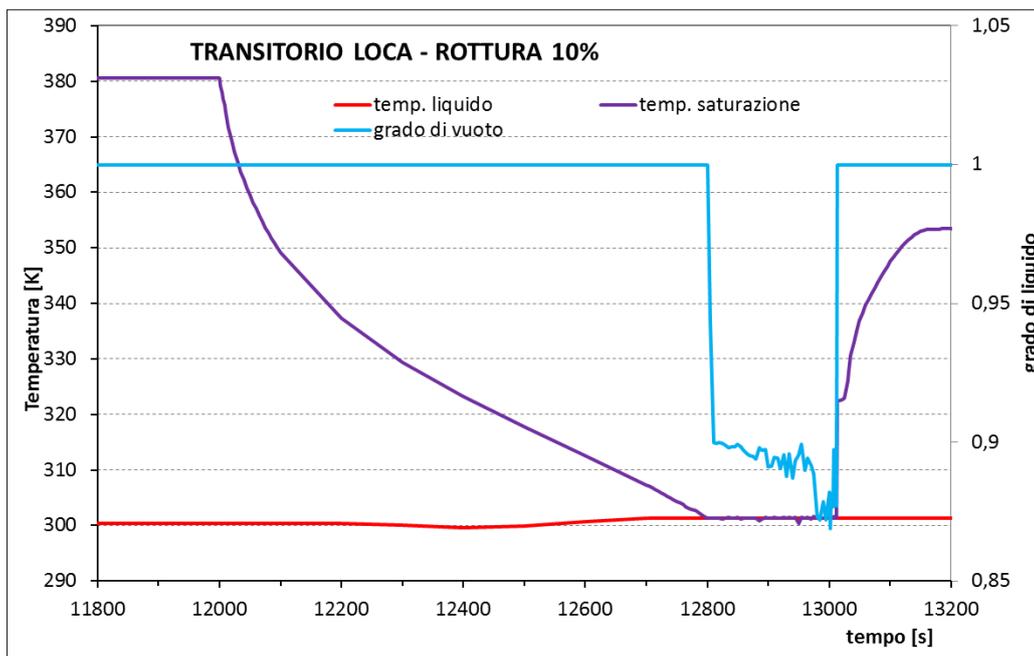


Figura 3.23 - Andamento della temperatura del fluido, della temperatura di saturazione e del grado di liquido nel volume di aspirazione della pompa primaria per il caso LOCA 10%

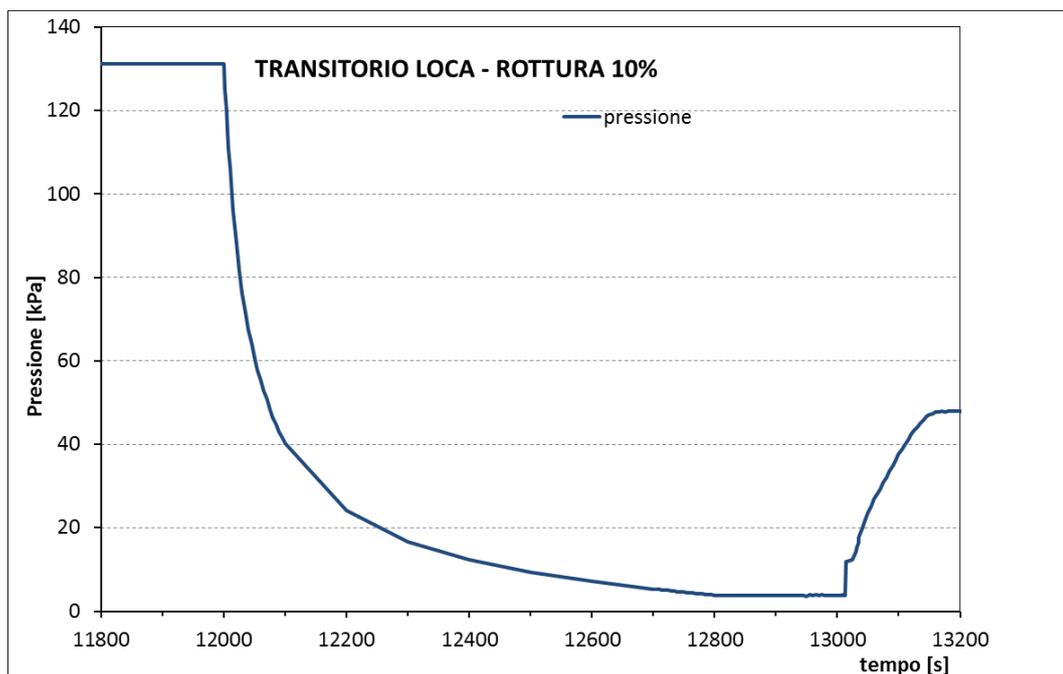


Figura 3.24 - Valore della pressione nel volume di aspirazione della pompa primaria per il caso LOCA 10%

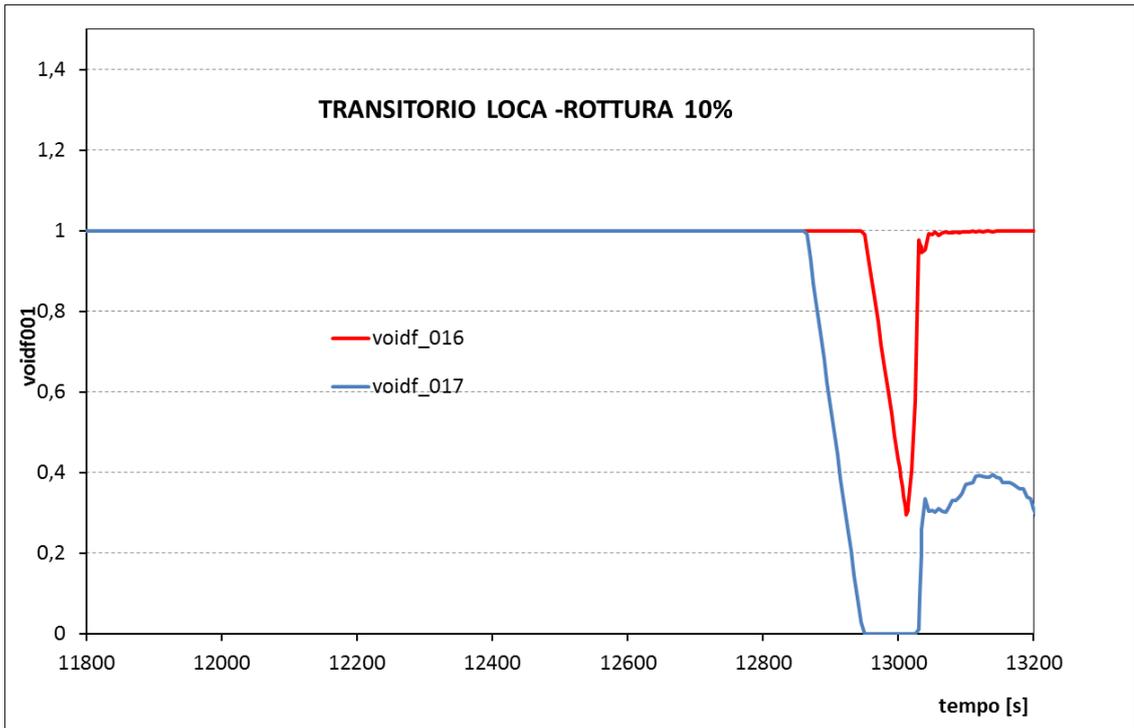


Figura 3.25 - Andamento del livello di liquido nei sotto-volumi 16 e 17 del serbatoio 001 per il caso LOCA 10%

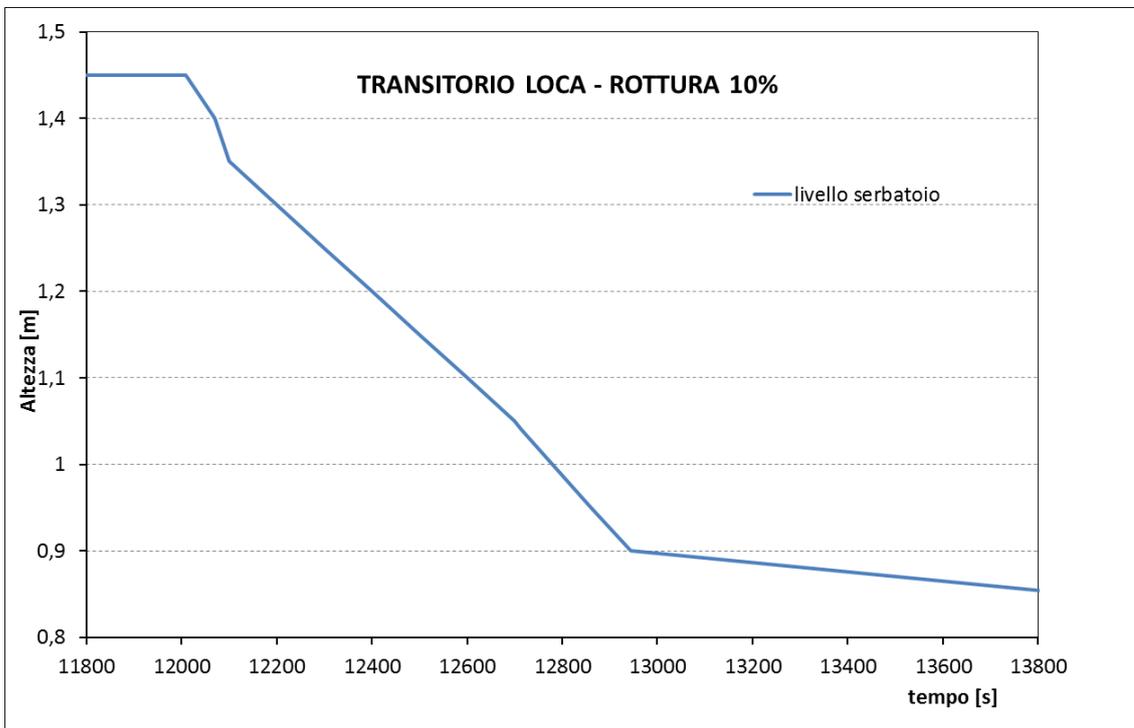


Figura 3.26 - Andamento del livello di liquido nel serbatoio per il caso LOCA 10%

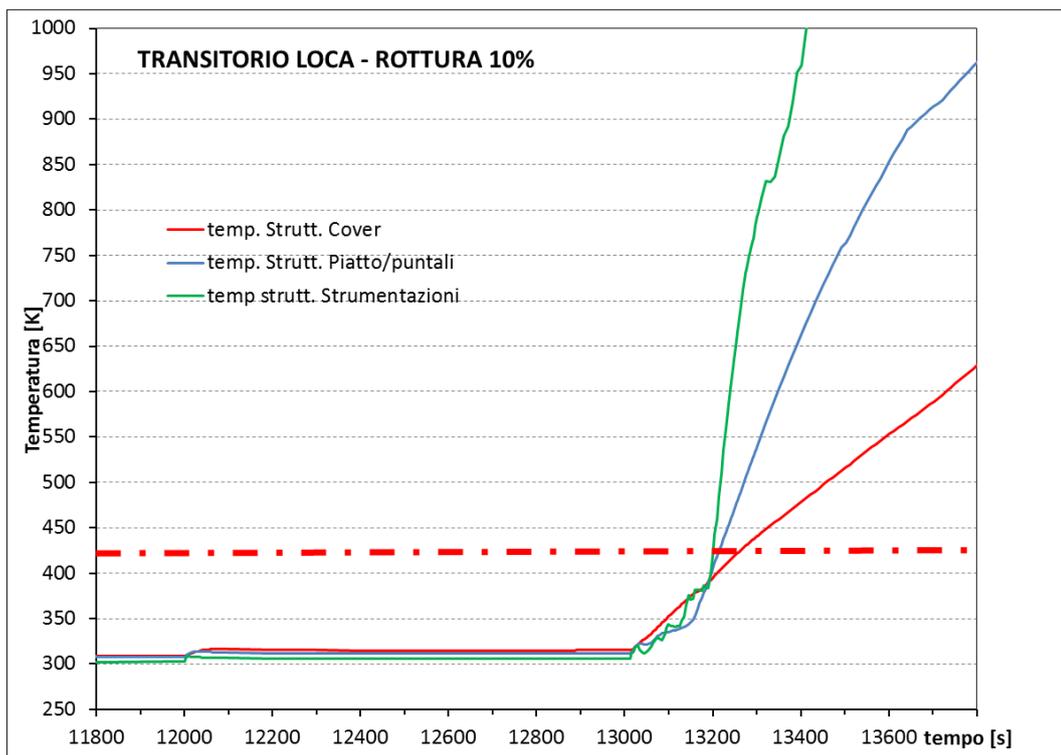


Figura 3.27 - Andamento della temperatura nelle strutture termiche cover, puntali-piatto e strumentazione per il caso LOCA 10%

3.4.3.3 LOCA con rottura 50%

Poiché l'evoluzione delle fenomenologie è simile a quella descritta per i transitori con rottura 1% e 10%, di seguito ci limiteremo a riportare i grafici ritenuti più utili per caratterizzare le conseguenze per l'incidente LOCA con rottura del 50%.

L'inizio dell'incidente viene caratterizzato da una portata nel break superiore al valore erogato dalla pompa a causa dell'inversione della portata nel sistema di refrigerazione del target, come si può vedere nella figura 3.28 in cui la portata nel sistema di refrigerazione del target diventa negativa. Successivamente la portata del break si riduce per stabilizzarsi intorno al valore medio di 0,23 kg/s (circa il 70% del valore della portata nominale del refrigerante secondario). Questo valore si mantiene per circa 700 s dopo l'incidente (12 minuti).

Nello stesso grafico viene riportato il valore della portata nel sistema di refrigerazione del cover che si porta al valore di circa 0,035 kg/s.

Le portate nel sistema di refrigerazione puntali-piatto e strumentazione, dopo l'iniziale inversione, aumentano per stabilizzarsi, rispettivamente, intorno al valore di 0,052 kg/s e 0,022 kg/s (circa il 34% del valore nominale).

La portata nel break decresce rapidamente intorno a $t=12700$ s, quando la pompa si ferma dopo un breve periodo (30 s) di degradazione del corretto funzionamento che porta all'oscillazione della portata erogata, come si può vedere in figura 3.29.

Nella figura 3.30 vengono riportate, infine, le temperature nelle strutture termiche nel sistema di refrigerazione del cover, puntali-piatto e strumentazione. All'istante $t = 12750$ s le temperature aumentano rapidamente e la temperatura limite di 423 K viene superata a $t = 12900$ s, dopo circa 900 s dall'inizio del transitorio (15 minuti).

Anche se l'intervallo di tempo per la diagnosi del problema risulta essere più piccolo rispetto ai casi di rottura 1% e 10%, esso risulta essere sufficiente per avviare le procedure di sicurezza e di emergenza.

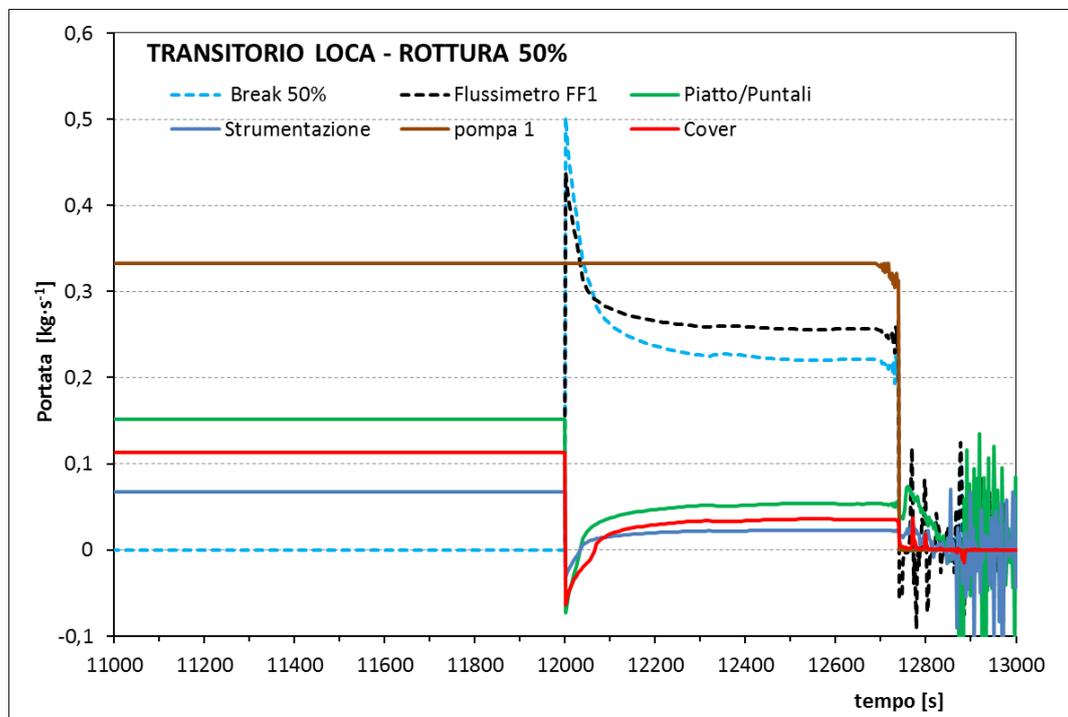


Figura 3.28 - Valore delle portate nella linea del cover, puntali-piatto e strumentazione per il caso LOCA 50%. La curva tratteggiata mostra l'andamento della portata in FF1 e nel break

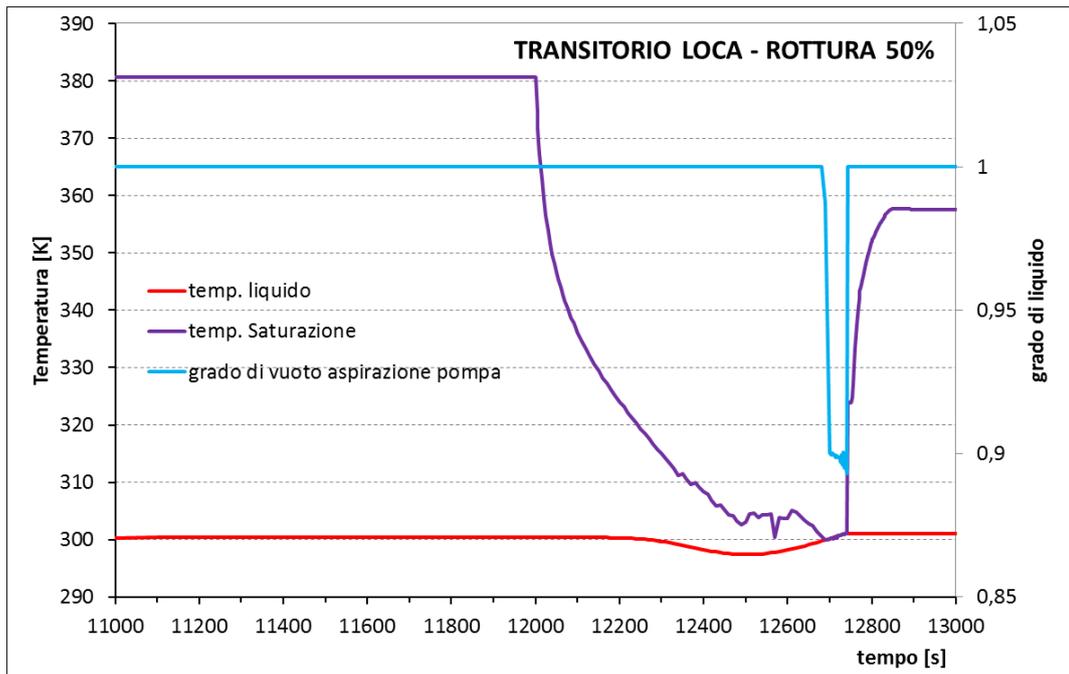


Figura 3.29 - Valore della temperatura del fluido nel volume di aspirazione della pompa primaria per il caso LOCA 50%

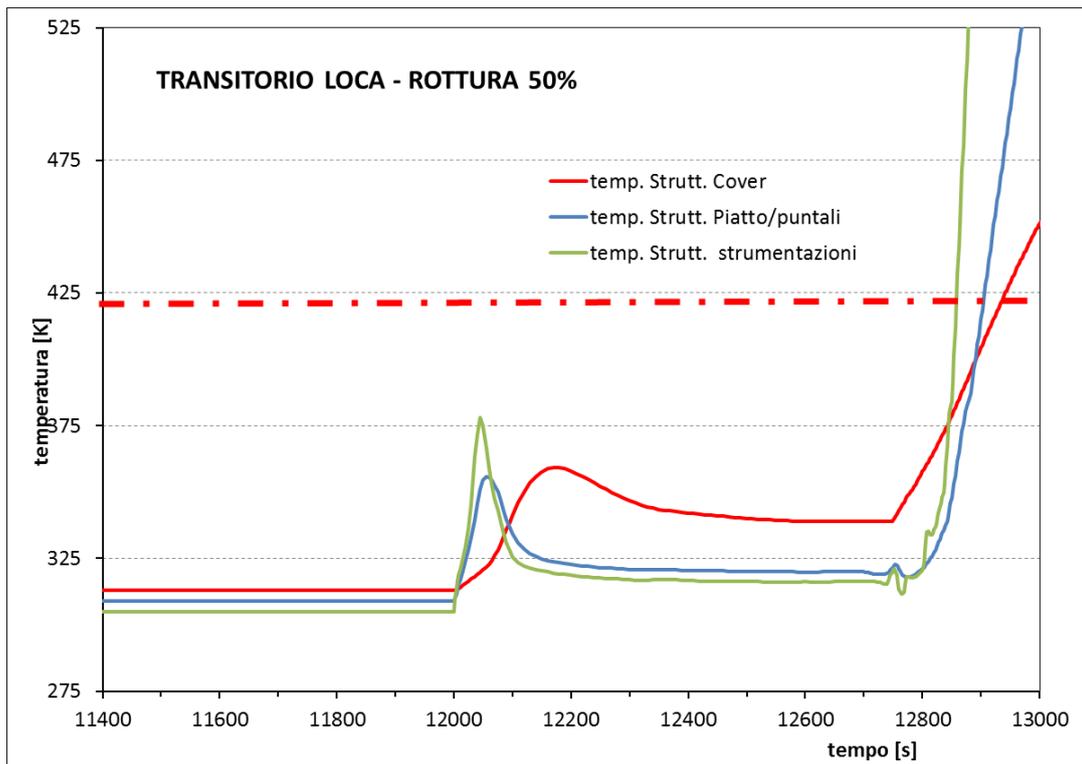


Figura 3.30 - Andamento della temperatura nelle strutture termiche cover, puntali-piatto, strumentazione per il caso LOCA 50%

3.4.4 ANALISI DEL TRANSITORIO OVERPOWER

Per quanto riguarda l'analisi dei transitori di overpower, l'evento incidentale inizia con l'aumento della potenza rilasciata nelle strutture termiche che schematizzano il sistema cover, puntali-piatto e strumentazione.

Come già detto la configurazione del sistema di produzione del fascio primario in SPES può essere oggetto di condizioni di instabilità che possono al più condurre ad un aumento della potenza depositata nel target di qualche percento rispetto al valore nominale. Tuttavia per motivi conservativi, si è voluto testare il comportamento del sistema di refrigerazione ipotizzando condizioni più gravose, cioè un incremento della potenza, rispetto ai 10 kW previsti in condizione di esercizio, pari al 10% e 100%.

L'aumento della potenza viene effettuata attraverso l'inserimento nell'input RELAP di opportune tabelle che all'istante $t=12000$ s consentono di simulare il verificarsi dell'incidente.

Anche in questo caso, sulla base dei risultati dell'analisi HAZOP, vengono inibiti i sistemi di sicurezza che porterebbero all'arresto dell'impianto.

3.4.4.1 Overpower 10%

L'evento incidentale inizia a $t=12000$ s con l'aumento della potenza depositata nel target, che si porta al valore finale di 11 kW, in un secondo.

Nella figura 3.31 vengono riportate le variabili di controllo che calcolano la potenza termica asportata nelle strutture termiche cover (cntrlvr 108), puntali-piatto (cntrlvr 107) e strumentazione (cntrlvr 109) e la potenza termica asportata nella struttura termica dello scambiatore di calore intermedio dal refrigerante primario (cntrlvr 730). Nello stesso grafico viene riportato l'andamento della potenza totale asportata dal sistema di refrigerazione del target.

Il transitorio si evolve molto lentamente a causa delle inerzie termiche dei

sistemi di refrigerazione, per cui dopo l'aumento a gradino della potenza nel target, le temperature nel sistema di refrigerazione aumentano molto lentamente come si può vedere nella figura 3.32. in cui sono mostrati gli andamenti delle temperature nelle strutture termiche del cover, puntali-piatto e strumentazione. Dopo un transitorio di circa 8000 secondi (circa 130 minuti), le temperature raggiungono una nuova condizione stazionaria, raggiungendo il valore massimo di circa 314 K per il cover, 311 K per il sistema puntali-piatto e, infine, 309 K per la strumentazione.

La regolazione della temperatura TT2 inizia quasi subito con l'apertura della valvola a tre vie VM3, come si può vedere nella figura 3.33, in cui viene riportata la portata nel valvola 712 e la variazione della relativa sezione normalizzata.

Quando si raggiungono le nuove condizioni stazionarie, la sezione normalizzata della srvlv 712 è pari a 0,55 garantendo una portata finale di 0,17 kg/s.

Nella figura 3.34 vengono mostrati gli andamenti delle temperature misurate in TT1 e TT2. Mentre la temperatura in TT1 aumenta lentamente, la temperatura TT2 non varia, risultando efficace la regolazione.

Questo si riflette in un piccolo incremento del salto termico nello scambiatore di calore lato secondario come si può vedere nella figura 3.35. Nella stessa figura viene riportato il salto termico del fluido lato primario che aumenta solo di 1°C.

Il sistema di refrigerazione consente di mantenere il target al di sotto dei valori limite descritti per il caso LOCA.

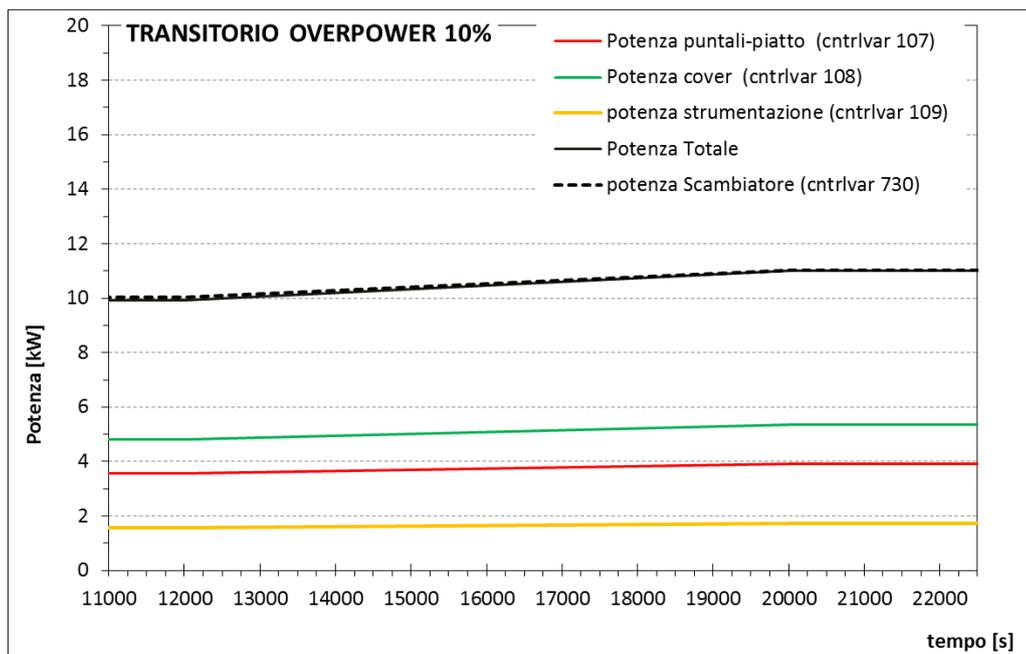


Figura 3.31 - Andamento delle potenze asportate nel sistema di refrigerazione cover, puntali-piatto e strumentazione, e della potenza asportata dal refrigerante primario nello scambiatore di calore intermedio per il caso overpower 10%

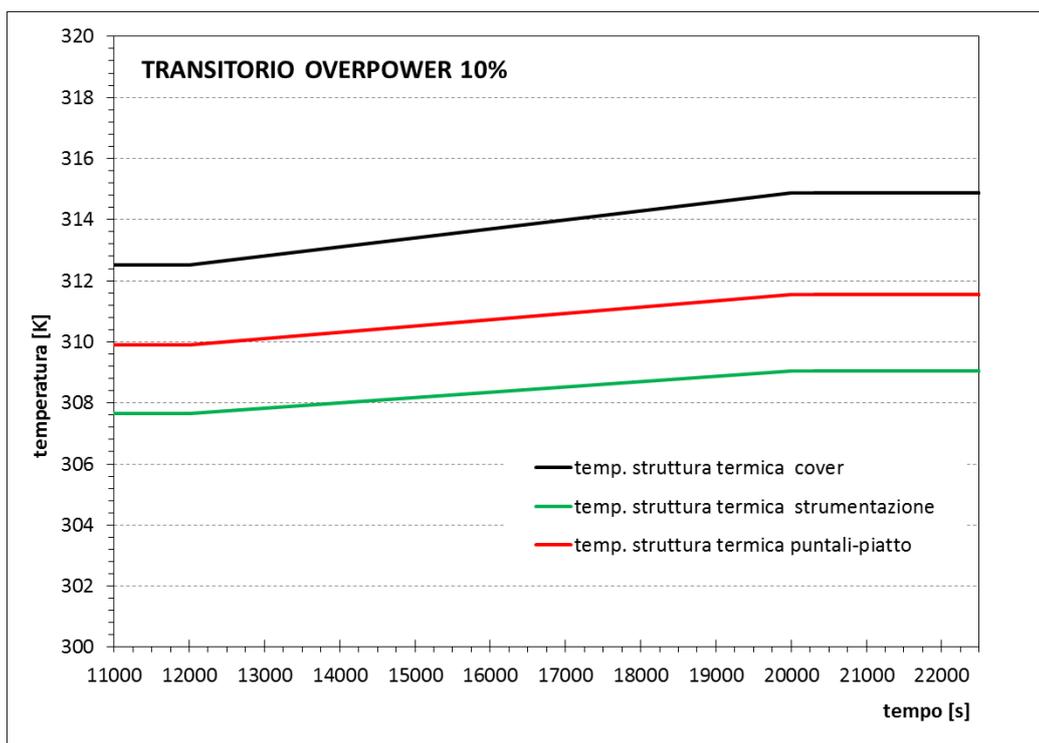


Figura 3.32 - Andamento delle temperature nelle strutture termiche del cover, puntali-piatto e strumentazione per il caso overpower 10%

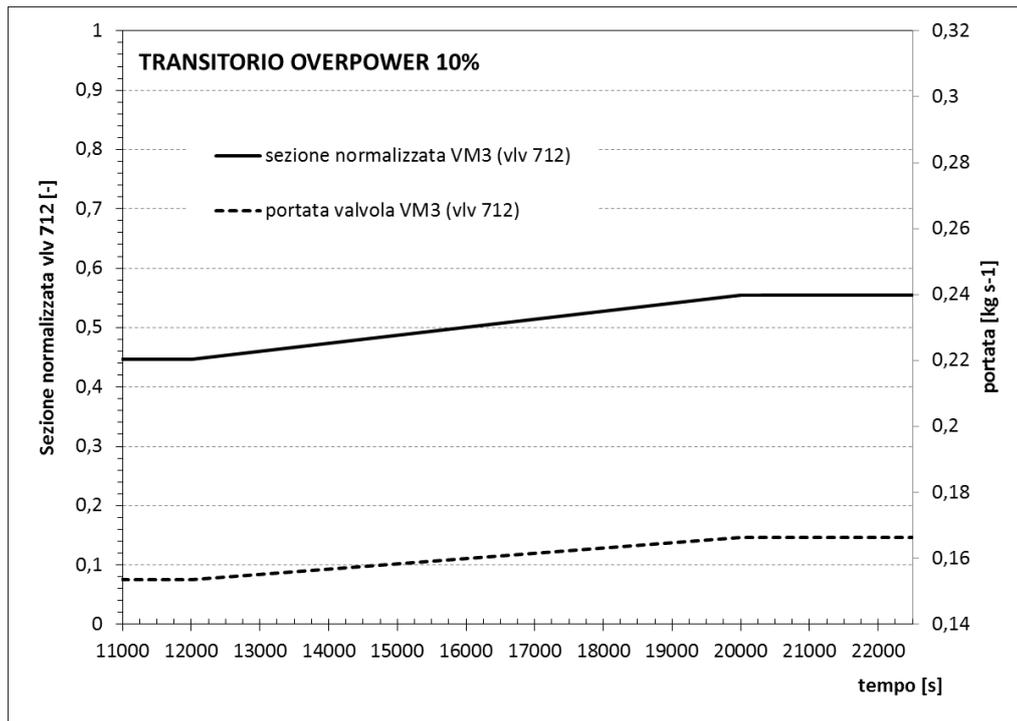


Figura 3.33-Andamento della portata nella valvola VM3, simulata con il componente vlv 712, e della relativa sezione normalizzata per il caso overpower 10%

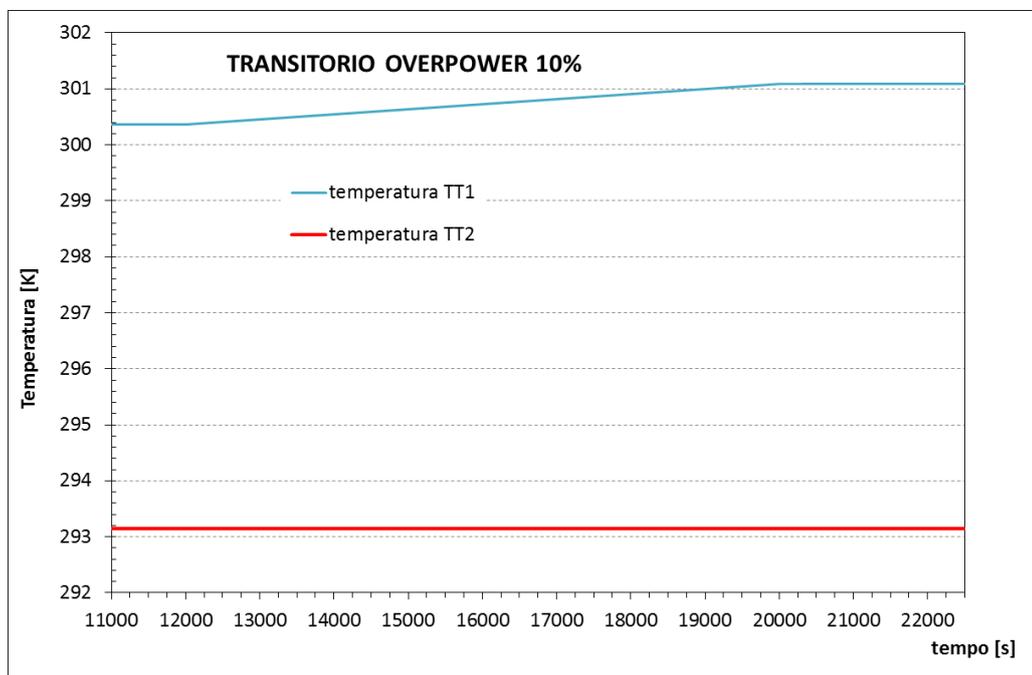


Figura 3.34 - Andamento delle temperature misurate in TT1 e TT2 per il caso overpower 10%

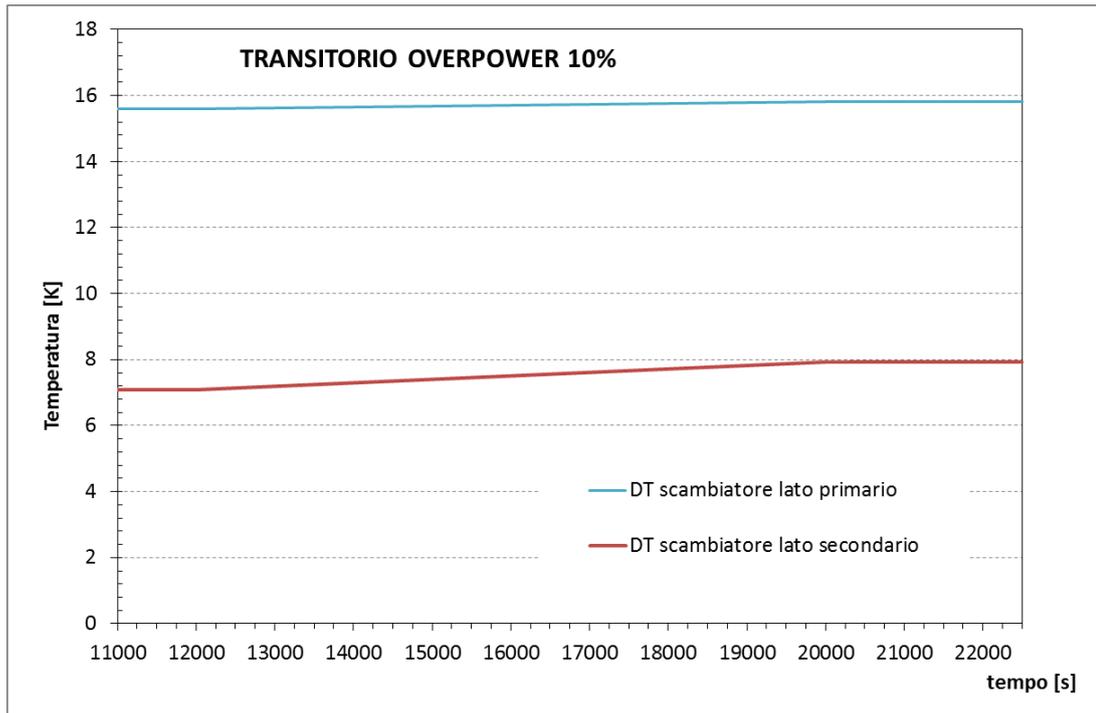


Figura 3.35 - Andamento dei salti termici nello scambiatore di calore lato primario e secondario per il caso overpower 10%

3.4.4.2 Overpower 100%

L'incidente inizia con il raddoppio della potenza depositata nel target (20 kW), dopo uno stazionario di 12000 secondi. Tale evento viene simulato con una rampa di potenza lineare crescente, della durata di un secondo.

Nella figura 3.36 vengono riportate le variabili di controllo che calcolano la potenza termica asportata nelle strutture termiche del cover (cntrlvr 108), puntali-piatto (cntrlvr 107) e strumentazione (cntrlvr 109) e quella asportata nello scambiatore di calore intermedio dal refrigerante primario (cntrlvr 730). Nello stesso grafico viene riportato l'andamento della potenza totale asportata dal sistema di refrigerazione del target.

Come si può vedere, rispetto al caso precedente, si ha un ritardo tra la potenza asportata nel sistema di refrigerazione del target e quella asportata dal refrigerante primario nello scambiatore intermedio di circa 300 s (5 minuti). Questo viene confermato dall'andamento delle temperature misurate in TT1 e TT2 (figura 3.37). L'aumento della temperatura in TT1 e, in modo meno significativo, in TT2 inizia all'istante $t = 12300$ s.

Contemporaneamente, come si può vedere nella figura 3.38, il valore della portata nella valvola regolatrice VM3 e la relativa sezione normalizzata cominciano ad aumentare. Il processo di regolazione, quando avviato, risulta essere molto efficace poiché la temperatura TT2 subisce un incremento rispetto al valore nominale di circa 0,4%, per tornare dopo 200 s al valore iniziale.

Quando si raggiungono le condizioni stazionarie, la sezione della srvvlv 712 è pari a circa il 92 % dell'area di passaggio totale, garantendo una portata finale di circa 0,28 kg/s.

Il ritardo della regolazione è dovuto alla particolare configurazione del circuito in cui il recipiente di 300 l si comporta da volano termico.

Nella figura 3.39 sono rappresentati gli andamenti delle temperature nelle strutture termiche del cover, puntali-piatto e strumentazione. Dopo un transitorio di circa 300 secondi, le temperature raggiungono una nuova condizione stazionaria, con valore massimo di 332 K per il cover, 326 K per il sistema puntali-piatto e, infine, 321 K per la strumentazione.

Si noti che prima del raggiungimento delle nuove condizioni stazionarie, le temperature nelle strutture termiche subiscono un lieve aumento a causa del piccolo aumento della temperatura TT2 dovuta alle inerzie termiche che riducono, anche se non in modo significativo, l'efficacia della regolazione della valvola VM3. Vale la pena sottolineare che, nonostante l'importanza dell'incidente, le temperature raggiunte nel sistema target risultano essere inferiori alla temperatura limite di 425 K.

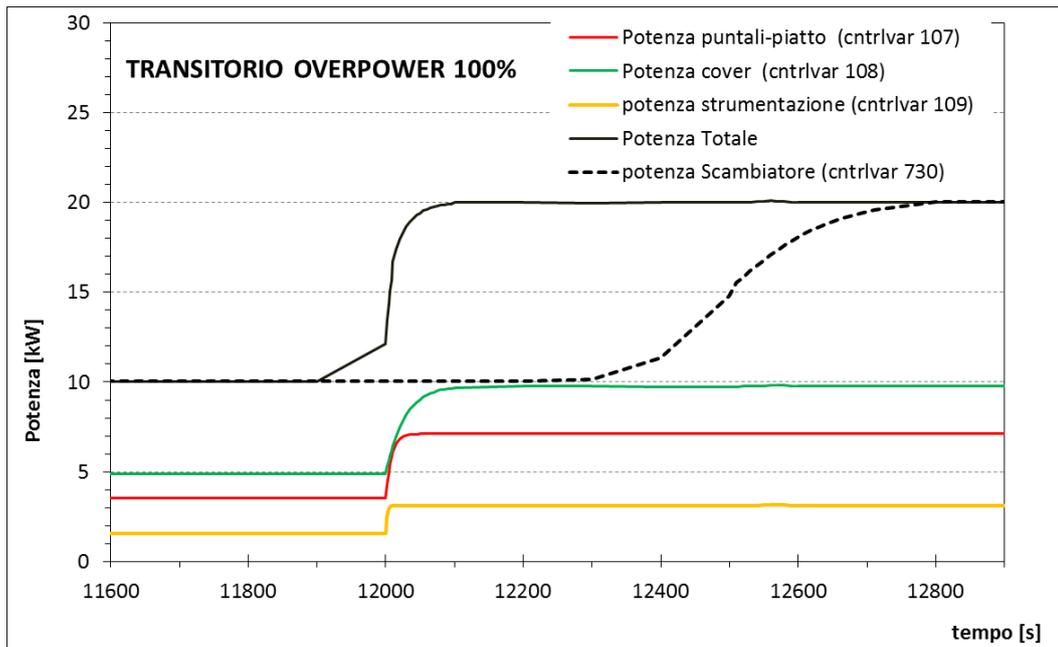


Figura 3.36 - Andamento delle potenze asportate nel sistema di refrigerazione cover, puntali-piatto e strumentazione, e della potenza asportata dal refrigerante primario nello scambiatore di calore intermedio per il caso overpower 100%

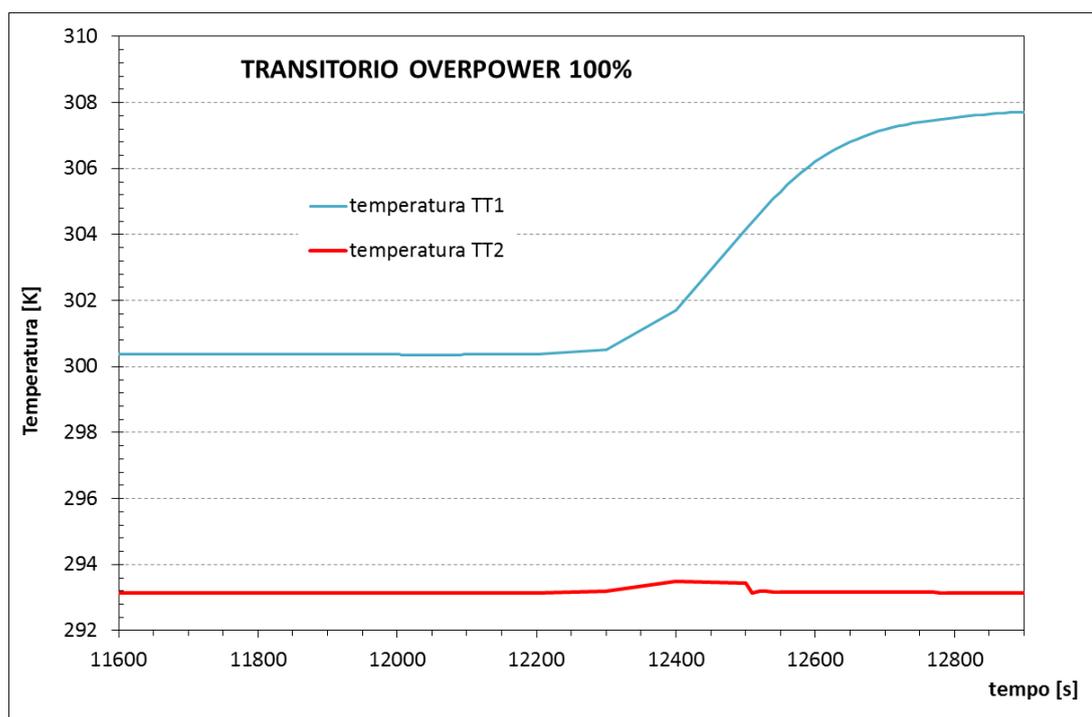


Figura 3.37 - Andamento delle temperature misurate in TT1 e TT2 per il caso overpower 100%

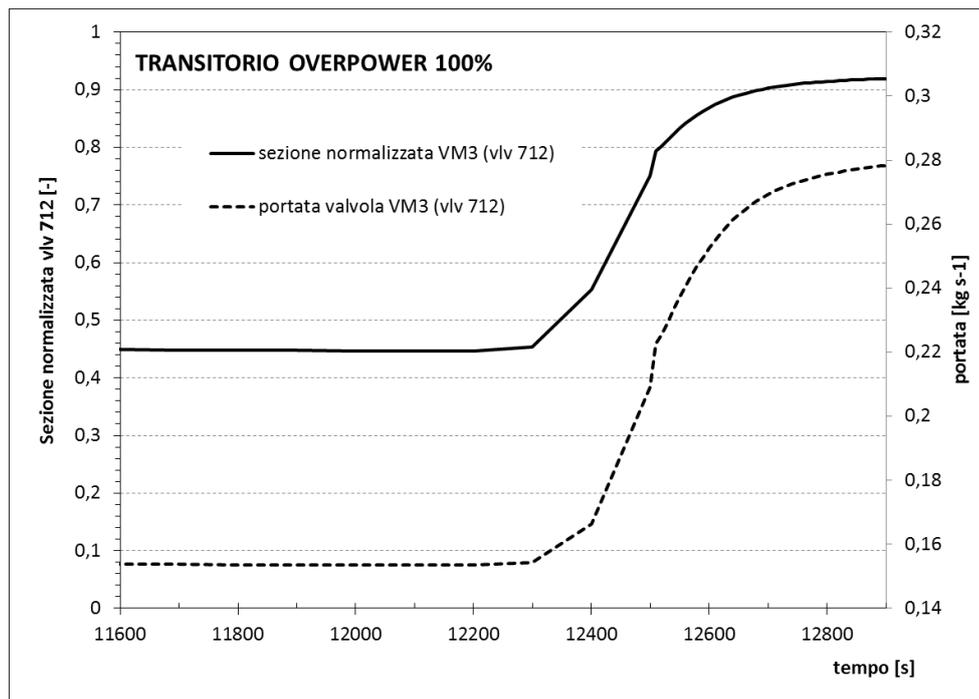


Figura 3.38 - Andamento della portata nella valvola VM3, simulata con il componente vlv 712, e della relativa sezione normalizzata per il caso overpower 100%

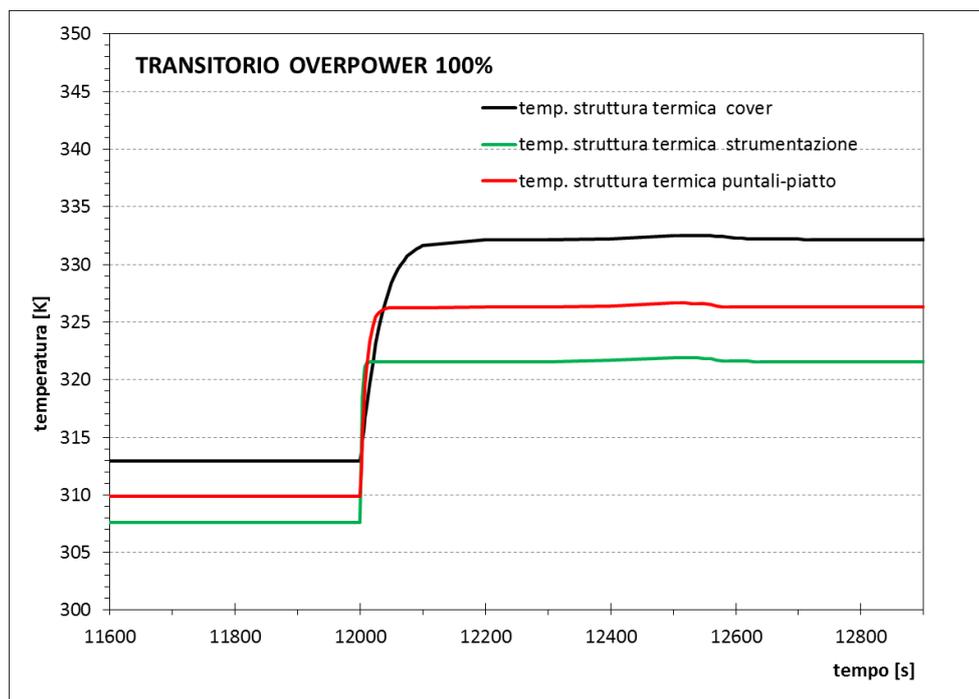


Figura 3.39 - Andamento delle temperature nelle strutture termiche del cover, puntali-piatto e strumentazione per il caso overpower 100%

CONCLUSIONI

L'attività di ricerca svolta nell'ambito del dottorato si è focalizzata sullo svolgimento di analisi di rischio riguardanti alcuni dei sistemi più importanti dal punto di vista del controllo e della sicurezza dell'impianto sperimentale SPES. In particolare, tenendo presente l'aspetto fortemente innovativo della facility, sono state utilizzate diverse tecniche di analisi del rischio, alcune delle quali sono state modificate con lo scopo di eliminare le lacune contenute nell'applicazione del metodo.

L'analisi sull'impianto di stoccaggio dei gas esausti RSRG effettuata con la tecnica fuzzy FMECA, modificata nell'ambito del lavoro di dottorato per migliorare la sua efficacia nella determinazione dell'ordinamento dei guasti più importanti, ha consentito di individuare alcuni modi di guasto critici per i componenti previsti nel progetto e per due distinte fasi operative, cioè:

- stoccaggio dei gas radioattivi durante i test sperimentali;
- scarico dei gas radioattivi al camino.

Per quanto riguarda la fase di stoccaggio i componenti più critici sono risultati il condensatore di olio C1 ed il sistema di regolazione della portata dei gas radioattivi. Un intervento migliorativo, in termini di controllo e sicurezza, potrebbe comprendere:

- l'inserimento di contenimento esterno del condensatore di olio C1 (cont_1 in figura 4.1), se tecnicamente fattibile;
- l'introduzione di una sonda di pressione a monte di VA, nella linea di scarico del VS (PS1 in figura 4.1).

Come per il condensatore di olio, anche per il filtro HEPA sarebbe opportuno introdurre un secondo contenimento, anche in questo se tecnicamente possibile (CONT_2 in figura 4.1).

Per quanto riguarda la perdita di integrità dei vessel di stoccaggio o del vaso di espansione VA, nel progetto dell'impianto RSRG è già previsto un doppio contenimento, per cui si è ritenuto non necessario prevedere

ulteriori accorgimenti migliorativi, essendo la probabilità di accadimento del doppio guasto (rottura di entrambe i contenimenti) altamente improbabile. In alternativa si potrebbe suggerire l'introduzione di un'altra sonda di pressione (PS3 in figura 4.1) per la misura della pressione tra i due contenimenti.

Dall'analisi è emerso che errori di misura delle sonde di pressione PSI_S1, PSI_S2, e PSI_S3 portano ad una errata stima dell'effettivo valore della pressione nel sistema di stoccaggio. Come accorgimento migliorativo si potrebbe suggerire di introdurre:

- una sonda di pressione a monte dei serbatoi di stoccaggio, lungo la linea di ingresso dei gas radioattivi (PS2 in figura 4.1);
- una sonda di pressione a valle dei serbatoi, lungo la linea che collega il sistema di stoccaggio con il camino (PS4 in figura 4.1).

Critico risulta essere il guasto del complesso valvole a monte del serbatoio S3. In particolare, la chiusura spuria di V1_S3 e la chiusura della valvola manuale VM1_S3 rendono indisponibile il serbatoio in caso di emergenza.

Per il primo modo di guasto le procedure di manutenzione programmata possono ridurre la probabilità di accadimento, mentre per il secondo malfunzionamento è necessario che nelle valvole manuali sia predisposto un indicatore che in modo chiaro consenta all'operatore di verificare lo stato "valvola aperta".

Per consentire un miglior isolamento del ramo di scarico posto a valle dei serbatoi, sarebbe opportuno inserire una valvola elettropneumatica prima della pompa di estrazione (V5 in figura 4.1). Questo accorgimento progettuale consentirebbe di mitigare eventuali malfunzionamenti delle valvole poste all'uscita dei recipienti di stoccaggio.

Più problematico è, invece, il guasto relativo alla perdite di gas verso l'esterno delle varie valvole. In questo caso si suggerisce di verificare le capacità di tenuta delle valvole prima del loro utilizzo nell'impianto,

oppure di controllare i dati affidabilistici forniti dal costruttore, scegliendo quelle soluzioni che riescono a garantire le migliori prestazioni.

È da notare che gli interventi migliorativi individuati per la fase operativa di stoccaggio hanno consentito di aumentare le prestazioni dell'impianto anche per la fase operativa di scarico dei gas al camino.

In particolare, l'introduzione del misuratore di pressione PS4 in figura 4.1 mitigherebbe l'errata misura in difetto delle sonde PSI_S1, PSI_S2, e PSI_S3, mentre l'introduzione della valvola V5 permetterebbe di isolare il sistema dei serbatoi dalla linea del camino in caso di malfunzionamenti delle valvole poste all'uscita di ciascun vessel.

Il guasto dovuto a misura spuria della sonda PSE_S3 risulta importante perché, nel caso di perdita di integrità del contenitore interno di S3, non viene segnalato all'operatore questa condizione particolarmente pericolosa, tenendo presente che S3 è il recipiente di sicurezza, utilizzato in caso di malfunzionamento degli altri due recipienti. Sarebbe opportuno valutare la possibilità di inserire un secondo misuratore di pressione, tenendo presente che la probabilità di accadimento del modo di guasto di misura spuria potrebbe essere aumentata a causa degli effetti della radioattività. Tuttavia, è da osservare che la non rilevabilità del guasto da parte dell'operatore è condizionata al guasto della sonda PSI_S3. Quindi, sarebbe necessario approfondire l'analisi con tecniche ad albero di guasto per la valutazione della probabilità di accadimento dell'evento nel suo complesso.

È da sottolineare che l'analisi fuzzy FMECA ha comportato la compilazione di circa cento schede, utilizzando il software Risk Analysis Database (RAD) messo a punto presso il DEIM dell'Università di Palermo. L'uso del RAD ha consentito di creare una tassonomia dei modi di guasto che potrà risultare utile nelle successive analisi di sicurezza da svolgere, ad esempio, con il supporto delle tecniche ad albero di guasto e ad albero degli eventi.

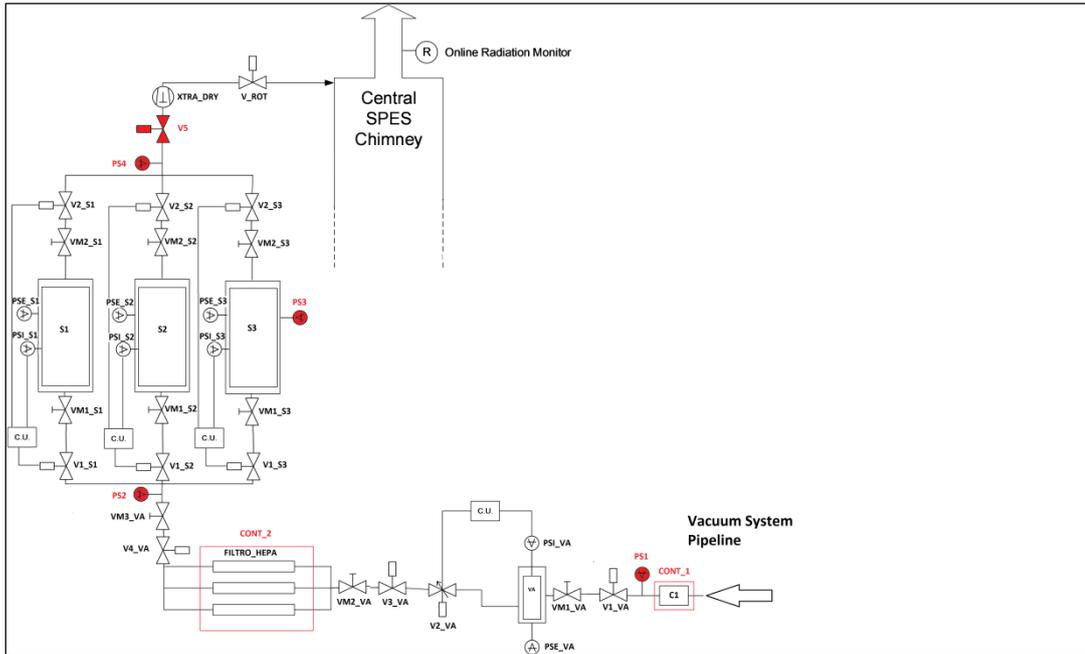


Figura 4.1 - Layout dell'impianto RSRG con in rosso le modifiche progettuali suggerite sulla base dei risultati ottenuti nella analisi fuzzy FMECA

Per quanto riguarda il sistema di refrigerazione del sistema target, di seguito si riportano i principali risultati ottenuti utilizzando un approccio integrato basato sulla metodologia HAZOP, che ha consentito di identificare alcuni eventi iniziatori di incidente, e la simulazione delle sequenze fenomenologiche coinvolte negli incidenti individuati attraverso il codice di calcolo termo-fluidodinamico avanzato RELAP5-3D.

La suddivisione della procedura di avviamento dell'impianto in tre fasi ha permesso di analizzare in maniera più dettagliata gli eventi iniziatori di incidente associati ai guasti dei componenti dell'impianto, individuandone le cause, i dispositivi di rivelazione e di protezione per diverse condizioni di esercizio.

Per la fase di ramp-up sono stati individuati due TE per il nodo in esame:

- mancanza di portata (indicato con TE_A1);
- aumento della pressione (indicato con TE_A2).

Le cause individuate per la mancanza di portata (TE_A1) sono principalmente:

- Chiusura spuria della valvola elettropneumatica VM1 o VM2;

- Valvola manuale chiusa (errore umano) sia a monte che a valle del nodo.

L'aumento della pressione TE_A2 potrebbe danneggiare il circuito idraulico nel sistema target. La causa è stata individuata nella chiusura spuria della VM1. Come intervento migliorativo per il controllo dei parametri fisici dell'impianto, si suggerisce l'introduzione di una seconda sonda di pressione, posizionata a valle del sistema target sulla linea di ritorno del refrigerante all'interno del locale A17, e prima di VM2.

Per la fase di accensione dei riscaldatori l'analisi ha permesso di individuare tre TE:

- portata nulla (TE_B1);
- aumento della temperatura (TE_B2);
- aumento della pressione (TE_B3).

Per il verificarsi del TE_B1, le cause identificate sono:

- chiusura spuria della valvole VM1 o VM2;
- blocco della valvola di non ritorno VR1 o VR2;
- grippaggio della pompa P10/1 o P10/2;
- perdita di refrigerante (Loss Of Coolant Accident) a monte del nodo.

Per il verificarsi del TE_B2, le cause identificate sono:

- chiusura spuria della valvole VM1 o VM2;
- blocco della valvola di non ritorno VR1 o VR2;
- perdita di refrigerante (LOCA) a monte del nodo;
- grippaggio della pompa P10/1 o P10/2
- malfunzionamento della valvola a tre vie VM3 che regola la portata nel circuito primario;
- misura errata delle sonde di temperatura TT1 e TT2.

Per il verificarsi del TE_B3 la causa e le conseguenze sono analoghe a quelle identificate nella fase precedente..

Infine, per la fase di beam-on sono stati individuati i seguenti TE

- assenza di portata (TE_C1);

- aumento della temperatura (TE_C2);
- aumento della pressione (TE_C3).

La criticità di questi eventi è particolarmente importante a causa del rischio radiologico ad essi associato per il possibile rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente in caso di danneggiamento del sistema target.

Le cause dei tre TE in parte coincidono con quelli identificati nella fase di ramp-up e avvio dei riscaldatori,

Per il verificarsi del TE_C2, si evidenziano le cause collegate alle variazioni della potenza generata nel target o all'errata regolazione di essa. Di particolare rilevanza sono risultati:

- perdita di refrigerante (LOCA) a monte del nodo;
- malfunzionamento della valvola a tre vie VM3 che regola la portata nel circuito primario;
- misura errata delle sonde di temperatura TT1 e TT2
- overpower di potenza nel target

Le analisi dei transitori termoidraulici tramite il codice di calcolo RELAP5-3D sono state eseguite per valutare la gravità di alcuni TE individuati con l'analisi HAZOP..

Sono stati simulati tre eventi di perdita di refrigerante (LOCA) con sezione di rottura pari all'1%, 10% e 50% e due eventi di overpower con aumento della potenza generata nel target pari al 10% e 100%.

Per quanto riguarda i LOCA, la rottura è stata ipotizzata nell'ingresso della struttura termica che schematizza il cover target. Questa ipotesi consente di esaminare la peggiore condizione dal punto di vista delle conseguenze, in quanto il cover è la sezione del target più sollecitata dal punto di vista termico.

Le condizioni peggiori si realizzano, come prevedibile, per il LOCA 50%: all'aumentare della rottura, la portata persa nel break aumenta e le fenomenologie che si sviluppano nei veri transitori si evolvono sempre più rapidamente.

In particolare, per il LOCA 1% il transitorio si conclude con l'arresto della pompa dopo circa 7500 s, a causa della presenza di vapore nel volume di aspirazione che causa malfunzionamenti del componente. Con l'arresto della pompa, la portata che fuoriesce dal break diminuisce rapidamente e le temperature delle strutture termiche incominciano ad aumentare rapidamente, superando il valore limite, pari a 423 K, dopo circa 7700 dopo l'inizio dell'evento incidentale (95 minuti). Si ha, quindi, un buon margine per la diagnosi del problema e l'avvio delle fasi di intervento e di emergenza.

Per il LOCA con rottura del 10% il transitorio si evolve in maniera analoga al caso 1%, ma le sequenze fenomenologiche si sviluppano più rapidamente. A causa della fuoriuscita della portata dal break si ha una redistribuzione delle portate all'ingresso del collettore ed una rapida diminuzione della pressione nel sistema. Al blocco della pompa, dopo il raggiungimento delle condizioni di saturazione all'aspirazione, segue una diminuzione della portata che fuoriesce dal break e un aumento delle temperature delle strutture termiche del target, che superano il valore limite di 423 K dopo circa 1200 s (20 minuti) dall'inizio dell'incidente. Anche in questo caso, si ha un buon margine per l'avvio delle procedure di emergenza.

Per il LOCA al 50%, il transitorio risulta essere più veloce e le condizioni di degrado del funzionamento della pompa si raggiungono dopo soli 12 minuti dall'inizio dell'evento incidentale. Nelle prime fasi del transitorio, la portata che fuoriesce dal break risulta maggiore della portata nominale erogata dalla pompa. Ciò è dovuto all'inversione delle portate nel sistema di refrigerazione del target. Successivamente, la portata del break si riduce stabilizzandosi intorno ad un valore pari al 70% del valore della portata nominale del refrigerante secondario. Le temperature nelle strutture termiche nel sistema di refrigerazione del cover, puntali-piatto e strumentazione aumentano rapidamente e superano la temperatura limite

di 423 K dopo circa 15 minuti dall'inizio del transitorio.

Si può quindi concludere che, anche nelle condizioni peggiori, il tempo disponibile per la diagnosi del problema e l'avvio delle operazioni di intervento da parte dell'operatore risulta essere sufficiente.

Per quanto riguarda l'overpower del 10% della potenza nominale, il transitorio si evolve molto lentamente a causa delle inerzie termiche dei sistemi di refrigerazione. Dopo un transitorio di circa 8000 secondi (circa 130 minuti), le temperature raggiungono una nuova condizione stazionaria, con un valore massimo di circa 314 K per il cover, 311 K per il sistema puntali-piatto e 309 K per la strumentazione. La regolazione della temperatura TT2 inizia quasi subito con l'apertura della valvola a tre vie VM3, mentre la temperatura in TT1 aumenta lentamente, la temperatura TT2 non varia, risultando efficace la regolazione. Il salto termico nello scambiatore di calore lato secondario, alla fine del transitorio, aumenta di circa 1 °C. Il sistema di refrigerazione consente di mantenere il target al di sotto dei valori limite descritti per il caso LOCA.

Per il caso di overpower del 100% si ha un ritardo tra la potenza asportata nel sistema di refrigerazione del target e quella asportata dal refrigerante primario nello scambiatore intermedio di circa 300 s (5 minuti): le temperature TT1 e TT2, infatti, incominciano ad aumentare dopo 300 s dall'inizio dell'evento incidentale.

Il ritardo della regolazione è dovuto alla particolare configurazione del circuito in cui il recipiente di 300 l si comporta da volano termico. Tuttavia, nonostante il ritardo, la regolazione risulta essere efficace. Infatti, la TT2 dopo un lieve incremento, si riporta al suo valore iniziale dopo circa 200 s (poco più di 3 minuti).

Le temperature delle strutture termiche dopo un transitorio di circa 300 secondi, raggiungono una nuova condizione stazionaria, con valore massimo di 332 K per il cover, 326 K per il sistema puntali-piatto e 321 K per la strumentazione, comunque inferiori alla temperatura limite di 425 K

BIGLIOGRAFIA

- [1] G. Prete, A. Covello, "SPES Technical Design Report", INFN-LNL 223 (2008). (http://www.lnl.infn.it/~spes/TDR2008/tech_design08_index.htm)
- [2] Relazione di tirocinio: "Utilizzo di software LabVIEW per la realizzazione dell'interfaccia operatore dell'apparato Front End del progetto SPES", C. Scudellaro (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova).
- [3] J. Vasquez, "Activity Report, January–May 2009", INFN-LNL.
- [4] Relazione di tirocinio: "Utilizzo di PLC nel progetto SPES: controllo di sequenze operazionali e di sicurezza dell'iniettore di fascio", D. Bof Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università degli Studi di Padova).
- [5] Adixen, Alcatel Vacuum Technology.
(<http://www.adixen.it/vacuum-pumps/high-vacuum-pumps,32,1,pla.html>)
- [6] Edwards, Vacuum Pumps and Abatement Technology.
(<http://www.edwardsvacuum.com/Products/View.aspx?sku=B71802020>)
- [7] G. Tudisco, "Generalità sui PLC", Corso di Sistemi Elettrici Automatici (ITI "A. Malignani", Udine).
- [8] C. Roncolato, M. Rossignoli, A. M. Porcellato, M. De Lazzari, A. Conte "The SPES project and the Design of the Recovery System for Radioactive Gases (RSRG)", AIV Associazione Italiana di Scienza e Tecnologia, XXII conference, Genova 20/05/2015
- [9] OREDA elencare tutti i testi specialistici utilizzati
- [10] L.C. Cadwallader, "Selected component failure rate values from fusion safety assessment tasks", INEEL/EXT-98-00892, September 1998
- [11] Bilal M. Ayyub, "Risk Analysis in Engineering and Economics", Chapman and Hall/CRC, 2 edition, March 18, 2014
- [12] G. Morana "Analisi di Sicurezza di Sistemi dell'impianto SPES", Tesi di dottorato in Energetica, Università degli Studi di Palermo, marzo 2014.

- [13] Gertman, D.I., Blackman, H.S., Marble, J.L., Byers, J.C., Smith, C.L. 2005. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method. NUREG/CR-6883.
- [14] Pfeiffer Vacuum, scheda tecnica, reperibile in:
<https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/valves/>
- [15] Pfeiffer Vacuum, scheda tecnica, reperibile in:
<https://www.pfeiffer-vacuum.com/productPdfs/PKZ10008.en.pdf>
- [16] Pfeiffer Vacuum, scheda tecnica, reperibile in:
<https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/measurement/>
- [17] VAT scheda tecnica reperibile in:
http://www.vatvalve.com/en/products/catalog/E/590_1_V
- [18] Monetti Alberto, Alberto Andrighetto, Javier Valiente, Fabiana Gramegna Preliminary report of the isotopes production of the SPES project, rapporto interno, reperibile in:
http://www.lnl.infn.it/~spes_target/home.php?dir=24031&view=details&orderby=Nome&order=asc&group=true
- [19] Lipol L S and Haq J 2011 Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations Int. J. Basic Appl. Sci. 5 74-82
- [20] Giardina, M., Castiglia F., Tomarchio, E., (2014) Risk assessment of component failure modes and human errors using a new FMECA approach: application in the safety analysis of HDR brachytherapy J. Radiol. Prot. 34, 891-914.
- [21] Bowles J B, Peláez C E 1995 Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis Reliability Engineering & System Safety 50 203-13.
- [22] De Finetti B 1970 Teoria Della Probabilità vol 2 (Torino: G Einaudi)
- [23] DOC_00000022_00_2014-06-23 - "Descrizione degli impianti di raffreddamento ad acqua degli apparati del locale A6 Bunker ISOL".
- [24] XM029PE_DST011_0 - Impianto refrigerazione target ISOL A6_feb2014_2; MG Progetti
- [25] Scheda tecnica pompa TRAVAINI reperibile in

www.pompetravaini.it/download/101006115419_Catalogo_TCK-TBK.pdf.

[26] Catalogo scambiatori a piastre saldobrasate CO.ME.T..

[27] Catalogo demineralizzatori ProMinent.

[28] Catalogo valvole e filtri INTERTUBI.

[29] Corain M, Giordani N, Osellame M, Medeossi F, Relazione di Calcolo e progetto di sistemi meccanici, "Analisi dei transitori di temperatura in condizioni di emergenza per l'impianto SPES, facoltà di ingegneria, Università di Padova"

APPENDICE

A1 Esempio di schede FMECA per l'impianto RSRG compilate con il software RAD

| N° Scheda | ST_SA001A - 1 | Gen. Index | 301 |  | | | | | | | | |
|----------------------------------|---|---------------------|---|---|---|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | serbatoio S3 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | Serbatoio in acciaio di emergenza a parete doppia | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Perdita dell'integrità meccanica | svuotamento | Cedimento meccanico | Riempimento di gas del contenimento esterno di S3 | | misuratore di pressione PSI_S3 AND misuratore di pressione PSE_S3 | | | 4,35E-02 | 3 | 4 | 5 | 60 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

| N° Scheda | ST_SA008 - 1 | Gen. Index | 227 |  | | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|---|---|---|---|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | Pompa di estrazione | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | piston vacuum pump | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Rottura | in funzione | Cablaggio danneggiato OR Cedimento meccanico OR Guasto al motore elettrico OR Guasto all'unità di controllo della pompa OR Guasto meccanico agli organi statorici OR rottura degli organi meccanici (pistoncini o valvole) | arresto delle operazioni di scarico dei gas | Blocco operazioni rilascio gas esausti dal camino | Allarme sul display dell'interfaccia HMI. OR Rivelatore di radioattività nel camino OR Misuratore di pressione PSI_S1/S2/S3 | Chiusura V_ROT AND V2_S1/V_S2/V2_S3 | | 7,07E-02 | 3 | 5 | 4 | 60 |
| | | | grave | accettabile | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 12 di 102

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--|---|--|--|--|---|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| N° Scheda | ST_SA008 - 3 | | Gen. Index | 232 | |  | | | | | | |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | Pompa di estrazione | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | piston vacuum pump | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Non avvio su richiesta | spenta | Assenza di alimentazione elettrica OR Connessione allo strumento danneggiata OR Guasto al motore Elettrico OR Guasto all'unità di controllo della pompa OR Guasto meccanico agli organi statorici | Blocco operazioni di rilascio gas esausti dal camino | Blocco operazioni di rilascio gas esausti dal camino | Allarme sul display dell'interfaccia HMI. OR rilevatore di radioattività nel camino OR Misuratore di pressione di PSI_S1 o PSI_S2 da | | | 1,89E-01 | 4 | 3 | 4 | 48 |
| | | | locale | compatibile | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 21 di 102

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|---|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| N° Scheda | ST_SA008 - 4 | | Gen. Index | 233 | |  | | | | | | |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | Pompa di estrazione | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | piston vacuum pump | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Stop spurio | in funzione | Connettori deteriorati OR Guasto all'unità di controllo della pompa OR Usura | Mancato svuotamento dei serbatoi S1 o S2 | Svuotamento dei serbatoi S1 o S2 compromesso | Misuratore di pressione PSI_S1/PSI_S2/PSI_S3 da svuotare OR rilevatore di radioattività del camino | | | 7,07E-02 | 3 | 3 | 5 | 45 |
| | | | accettabile | accettabile | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 22 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA011A - 1 | Gen. Index | 296 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | valvola manuale VM2_S3 | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|---|-----------------------------|---|--------------------------------|---------------------|--|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | valvola manuale a valle di S3 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| non viene aperta dall'operatore (errore umano) | aperta | Attuazione non idonea da parte dell'operatore | non è possibile svuotare S3 | arresto delle operazioni di scarico dei gas | misuratore di pressione PSI_S3 | | si suppone che durante le operazioni di manutenzione la valvola VM2_S2 venga lasciata chiusa | 2,64E-02 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 31 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA012A - 3 | Gen. Index | 292 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | valvola elettropneumatica V2_S3 | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|--|-----------------------------|---|--------------------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | valvola elettropneumatica a valle di S3 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Mancata apertura | chiusa | Malfunzionamento dell'attuatore pneumatico | non è possibile svuotare S3 | arresto delle operazioni di scarico dei gas | misuratore di pressione PSI_S3 | | | 1,04E-02 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 35 di 102

| N° Scheda | ST_SA012A - 4 | | Gen. Index | 294 | |  | | | | | | |
|---|--|--|--|---|--------------------------------|---|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | valvola elettropneumatica V2_S3 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | valvola elettropneumatica a valle di S3 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Chiusura spuria | aperta | Malfunzionamento dell'attuatore pneumatico | non è possibile svuotare il serbatoio S3 | arresto delle operazioni di scarico dei gas | misuratore di pressione PSI_S3 | | | 1,58E-03 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |
| RAD ver3.25 - FMECA Analysis | | | | | | | | | | | | |
| Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare | | | | | | | | | | | | |
| Pagina 36 di 102 | | | | | | | | | | | | |

| N° Scheda | ST_SA014A - 1 | | Gen. Index | 268 | |  | | | | | | |
|---|--|--------------------------------------|--|---|-----------------------|---|---|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio di gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | Misuratore di pressione PSI_S1 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | sonda di pressione interna S1 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| errata misura (in difetto) | svuotamento | segnali spuri OR Calibrazione errata | la pressione nel serbatoio è maggiore del set point di pressione | il serbatoio non viene svuotato completamente | | | Sarebbe opportuno prevedere un misuratore di pressione nella linea di scarico | 3,50E-02 | 3 | 5 | 7 | 90 |
| | | | AND il serbatoio non viene svuotato completamente | medio | | | | | | | | |
| RAD ver3.25 - FMECA Analysis | | | | | | | | | | | | |
| Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare | | | | | | | | | | | | |
| Pagina 40 di 102 | | | | | | | | | | | | |

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA014A - 3 | Gen. Index | 312 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | Misuratore di pressione PSI_S1 | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|---------------------|---|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | sonda di pressione interna S1 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| errata misura (in eccesso) | svuotamento | segnali spurii OR Calibrazione errata | la pressione nel serbatoio è minore del set point di pressione | Completo svuotamento del serbatoio S1 | | | Sarebbe opportuno prevedere un misuratore di pressione nella linea di scarico | 3,50E-02 | 3 | 2 | 7 | 42 |
| | | | lieve | lieve | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
 Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 42 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA015A - 1 | Gen. Index | 319 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | Misuratore di pressione PSE_S1 | | | | | | | | | | | |
|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | sonda di pressione interapedine S1 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| misura spuria | svuotamento | segnali spurii OR Calibrazione errata | allarme spurio per rottura della parete interna del serbatoio | | | | | 3,50E-02 | 3 | 3 | 7 | 63 |
| | | | medio | medio | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
 Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 44 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA016A - 1 | Gen. Index | 302 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | Misuratore di pressione PSI_S2 | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--|--|---|-----------------------|---------------------|---|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | sonda di pressione interna S2 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| errata misura (in difetto) | svuotamento | segnali spuri OR Calibrazione errata | la pressione nel serbatoio è maggiore del set point di pressione | il serbatoio non viene svuotato completamente | | | Sarebbe opportuno prevedere un misuratore di pressione nella linea di scarico | 3,50E-02 | 3 | 5 | 7 | 70 |
| | | | medio | medio | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 46 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA016A - 3 | Gen. Index | 313 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | Misuratore di pressione PSI_S2 | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--|--|---------------------------------------|-----------------------|--|---|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | sonda di pressione interna S2 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| errata misura (in eccesso) | svuotamento | segnali spuri OR Calibrazione errata | la pressione nel serbatoio è minore del set point di pressione | Completo svuotamento del serbatoio S2 | | ridondanza dei misuratori di pressione | Sarebbe opportuno prevedere un misuratore di pressione nella linea di scarico | 3,50E-02 | 3 | 2 | 7 | 42 |
| | | | medio | medio | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 48 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA017A - 1 | Gen. Index | 320 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | Misuratore di pressione PSE_S2 | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------------------|--|---|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | Sonda di pressione intercapedine S2 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| misura spuria | svuotamento | segnali spuri OR Calibrazione errata | allarme spurio per rottura della parete interna del serbatoio | | | | | 3,50E-02 | 3 | 3 | 7 | 63 |
| | | | | medio | medio | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 51 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA018A - 1 | Gen. Index | 303 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio di gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | Misuratore di pressione PSI_S3 | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--|--|---|-----------------------|---------------------|---|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | Sonda di pressione interna S3 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| errata misura (in difetto) | svuotamento | segnali spuri OR Calibrazione errata | la pressione nel serbatoio è maggiore del set point di pressione | il serbatoio non viene svuotato completamente | | | Sarebbe opportuno prevedere un misuratore di pressione nella linea di scarico | 3,50E-02 | 3 | 5 | 7 | 105 |
| | | | | | medio | medio | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 53 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA018A - 3 | Gen. Index | 314 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | Misuratore di pressione PSI_S3 | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|--|---|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | Sonda di pressione interna S3 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| errata misura (in eccesso) | svuotamento | segnali spuri OR Calibrazione errata | la pressione nel serbatoio è minore del set point di pressione | Completo svuotamento del serbatoio S3 | | ridondanza dei misuratori di pressione | Sarebbe opportuno prevedere un misuratore di pressione nella linea di scarico | 3,50E-02 | 3 | 2 | 7 | 42 |
| | | | medio | medio | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 55 di 102

| | | | |
|----------------------------|--|------------|-----|
| N° Scheda | ST_SA019A - 1 | Gen. Index | 321 |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | |



| Componente | Misuratore di pressione PSE_S3 | | | | | | | | | | | |
|----------------|------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | sonda di pressione interapedine S3 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| misura spuria | svuotamento | segnali spuri OR Calibrazione errata | allarme spurio per rottura della parete interna del serbatoio | | | | | 3,50E-02 | 3 | 3 | 7 | 63 |
| | | | medio | medio | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 57 di 102

| | | | | | |
|----------------------------|--|--|------------|-----|--|
| N° Scheda | ST_SA021 - 1 | | Gen. Index | 249 | |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | |


**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO**

| Componente | Valvola manuale VM2_S1 | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|--|-------------------------------------|--------------------------------|--|--|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | Valvola manuale in uscita serbatoio S1 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| non viene aperta dall'operatore (errore umano) | aperta | Attuazione non idonea da parte dell'operatore | non è possibile svuotare il serbatoio S1 | stop alle operazioni di svuotamento | misuratore di pressione PSI_S1 | ispezioni periodiche OR manutenzioni ordinarie AND check periodico dell'impianto | si suppone che durante le operazioni di manutenzione la valvola VM2_S1 venga lasciata chiusa | 3,16E-02 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 63 di 102

| | | | | | |
|----------------------------|--|--|------------|-----|--|
| N° Scheda | ST_SA022 - 1 | | Gen. Index | 250 | |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | |


**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO**

| Componente | Valvola manuale VM2_S2 | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|-----------------------------|---|--------------------------------|---------------------|--|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Descrizione | Valvola manuale in uscita serbatoio S2 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| non viene aperta dall'operatore (errore umano) | aperta | Attuazione non idonea da parte dell'operatore | non è possibile svuotare S2 | arresto delle operazioni di scarico dei gas | misuratore di pressione PSI_S2 | | si suppone che durante le operazioni di manutenzione la valvola VM2_S2 venga lasciata chiusa | 2,64E-02 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 65 di 102

| N° Scheda | ST_SA121 - 4 | Gen. Index | 263 |  | | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|---|--------------------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | valvola elettropneumatica V2_S1 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | valvola elettropneumatica in uscita del serbatoio S1 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Chiusura spuria | aperta | Malfunzionamento dell'attuatore pneumatico | non è possibile svuotare il serbatoio S1 | arresto delle operazioni di scarico dei gas | misuratore di pressione PSI_S1 | | | 1,58E-03 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 80 di 102

| N° Scheda | ST_SA121 - 5 | Gen. Index | 264 |  | | | | | | | | |
|------------------------------|--|--|--|---|--------------------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | valvola elettropneumatica V2_S1 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | valvola elettropneumatica in uscita del serbatoio S1 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Mancata apertura a richiesta | chiusa | Malfunzionamento dell'attuatore pneumatico | non è possibile svuotare il serbatoio S1 | arresto delle operazioni di scarico dei gas | misuratore di pressione PSI_S1 | | | 1,04E-02 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 81 di 102

| N° Scheda | ST_SA122 - 3 | Gen. Index | 291 |  | | | | | | | | |
|------------------------------|--|--|--|---|--------------------------------|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | valvola elettropneumatica V2_S2 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | valvola elettropneumatica in uscita del serbatoio S2 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Mancata apertura a richiesta | chiusa | Malfunzionamento dell'attuatore pneumatico | non è possibile svuotare il serbatoio S2 | arresto delle operazioni di scarico dei gas | misuratore di pressione PSI_S2 | | | 1,04E-02 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 84 di 102

| N° Scheda | ST_SA122 - 4 | Gen. Index | 293 |  | | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|-----------------------------------|---|--------------------------------|--|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | valvola elettropneumatica V2_S2 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | valvola elettropneumatica in uscita del serbatoio S2 | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Chiusura spuria | aperta | Malfunzionamento dell'attuatore pneumatico | non è possibile svuotare il serS2 | arresto delle operazioni di scarico dei gas | misuratore di pressione PSI_S2 | isolamento del componente e sostituzione OR manutenzioni ordinarie | | 1,58E-03 | 1 | 4 | 6 | 24 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

Pagina 85 di 102

| N° Scheda | ST_SA203 - 1 | | Gen. Index | 265 | |  | | | | | | |
|---|---|--|---|---|--|---|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | valvola elettropneumatica V_ROT | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | valvola elettropneumatica a valle della pompa di estrazione | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Mancata apertura alla richiesta del PLC | chiusa | Malfunzionamento dell'attuatore pneumatico | non è possibile svuotare i serbatoi di stoccaggio | arresto delle operazioni di scarico dei gas | Misuratore di pressione PSI_S1/ PSI_S2/ PSI_S3 | | | 1,04E-02 | 1 | 5 | 6 | 30 |
| | | | compatibile | accettabile | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

| N° Scheda | ST_SA203 - 2 | | Gen. Index | 266 | |  | | | | | | |
|----------------------------|---|--|---|--|--|---|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | valvola elettropneumatica V_ROT | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | valvola elettropneumatica a valle della pompa di estrazione | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Chiusura spuria | aperta | Malfunzionamento dell'attuatore pneumatico | non è possibile svuotare i serbatoi di stoccaggio | arresto delle operazioni di scarico dei gas e di riduzione della pressione del sistema | Misuratore di pressione PSI_S1/ PSI_S2/ PSI_S3 | Blocco della pompa | | 1,58E-03 | 1 | 5 | 6 | 30 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |

RAD ver3.25 - FMECA Analysis
Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare

| | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---------------------|---|---|---|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| N° Scheda | ST_SA401 - 3 | Gen. Index | 267 |  | | | | | | | | |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio dei gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | Serbatoio S1 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | Serbatoio in acciaio a doppia parete | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Perdita dell'integrità meccanica | svuotamento | Cedimento meccanico | Riempimento di gas del contenimento esterno di S1 | | misuratore di pressione PSI_S1 AND misuratore di pressione PSE_S1 | | | 4,35E-02 | 3 | 4 | 5 | 60 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |
| <p>RAD ver3.25 - FMECA Analysis Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare</p> | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---------------------|---|---|---|---------------------|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| N° Scheda | ST_SA402 - 1 | Gen. Index | 300 |  | | | | | | | | |
| Sistema | RSRG - Recovery System for Radioactive Gases | | | | | | | | | | | |
| Descrizione del sistema | stoccaggio di gas esausti di SPES | | | | | | | | | | | |
| Fase operativa del sistema | scarico gas esausti in atmosfera | | | | | | | | | | | |
| Componente | serbatoio S2 | | | | | | | | | | | |
| Descrizione | serbatoio in acciaio a parete doppia (componenteridondante) | | | | | | | | | | | |
| Modo di guasto | Fase operativa | Cause | Effetti Locali | Effetti sull'impianto | metodi di rivelazione | Misure per Mitigare | osservazioni | Tasso di guasto | OCC | SEV | DET | RPN |
| Perdita dell'integrità meccanica | svuotamento | Cedimento meccanico | Riempimento di gas del contenimento esterno di S1 | | misuratore di pressione PSI_S2 AND misuratore di pressione PSE_S2 | | | 4,35E-02 | 3 | 4 | 5 | 60 |
| | | | grave | grave | | | | | | | | |
| <p>RAD ver3.25 - FMECA Analysis Sviluppatori: P. Buffa - S.F. Greco, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, sez. Nucleare</p> <p style="text-align: right;">Pagina 100 di 102</p> | | | | | | | | | | | | |

A2 Schede analisi Hazop fase di ramp-up

| SCHEDA HAZOP P 1 | | | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|---|---|---|---|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione minore del valore nominale & Incremento della pressione sulla linea (tramite valvola di laminazione?) | I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Sulla base degli allarmi e sulla lettura dei dati l'operatore può decidere di intervenire | Si prevede l'introduzione di una valvola di laminazione a valle della pompa (non rappresentata in layout) & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione in linea oltre PP4 | |

| SCHEDA HAZOP P 2 | | | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|---|---|---|---|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione maggiore del valore nominale & Incremento della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) | I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Sulla base degli allarmi e sulla lettura dei dati l'operatore può decidere di intervenire | Si prevede l'introduzione di una valvola di laminazione a valle della pompa (non rappresentata in layout) & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione in linea oltre PP4 | |

| SCHEDA HAZOP P 3 | | | | | | | |
|--|-----------|---|---|---|--|---|-------|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM1 | Aumento della pressione a monte della valvola & Diminuzione della portata | PP4 rivela un aumento della pressione & I flussimetri rivelano una diminuzione o annullamento della portata & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC fa scattare gli allarmi in funzione del valore della pressione rilevata da PP4 e della portata rivelata dai flussimetri | L'operatore decide di interrompere la fase di ramp-up & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione a monte di VM1 | TE_A2 |
| | | Blocco totale della valvola VM1 | Aumento brusco della pressione a monte della valvola & Nessuna portata | | I flussimetri rilevano portata nulla & Il PLC fa scattare gli allarmi visivi e sonori | L'operatore decide di interrompere la fase di ramp-up & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione a monte di VM1 | |

| SCHEDA HAZOP P 4 | | | | | | | |
|--|-----------|-----------------------------------|---|--|---|---|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola VM2 | Aumento della pressione a monte della valvola & Diminuzione della portata | PP4 rivela un aumento della pressione & I flussometri rivelano una portata minore della portata nominale & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC fa scattare gli allarmi in funzione del valore della pressione rilevata da PP4 | L'operatore decide di interrompere la fase di ramp-up & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione a monte di VM1 | |
| | | Blocco totale della valvola VM2 | Aumento brusco della pressione a monte della valvola & Nessuna portata | | I flussometri rilevano portata nulla & Il PLC fa scattare gli allarmi | L'operatore decide di interrompere la fase di ramp-up & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione a monte di VM1 | |

| SCHEDA HAZOP P 5 | | | | | | | | | |
|---|-----------|--|---|---|--------------------------------------|---|-----|--------------------------------------|--|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/ RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP | | |
| MINORE DI | PRESSIONE | Chiusura di una delle valvole manuali a valle della pompa P10/1 (o P10/2) (errore umano) | Assenza di portata nel target & Pressione a valle della pompa non aumenta (PP4 non rileva l'aumento di pressione) | Il misuratore di pressione PP4 non rileva alcun aumento di pressione & I flussimetri rilevano portata nulla & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC spegne la pompa P10/1 (P10/2) | Nel caso di spegnimento della pompa P10/1 non viene attivata la P10/2 in quanto per avviare il fascio tutte le valvole manuali devono essere nella giusta posizione | | | |
| | | Chiusura della valvola manuale V1 (V2) (errore umano) | Assenza di portata nella linea di mandata & Pompa P10/1 (P10/2) in cavitazione | | | | | Il PLC spegne la pompa P10/1 (P10/2) | In fase di ramp-up, a seguito dello spegnimento DI p10/1 dovuto ad un evento incidentale non viene attivata la P10/2 |
| | | Chiusura della valvola manuale V3 (V4) (errore umano) | Aumento di pressione nella linea di alimentazione & Assenza di portata nella linea di mandata | | | | | | |

| SCHEDA HAZOP P 6 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|------------------------------|---|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR1 | Riduzione della portata sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & PP4 rileva una pressione minore della nominale | Il PLC spegne la pompa P10/1 | La pompa P10/2 non interviene nella fase di ramp-up | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR1 | Nessuna portata sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano l'assenza della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | | | |

| SCHEDA HAZOP P 7 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|--|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR2 | Riduzione della portata sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & PP4 rileva una pressione minore della nominale | Il PLC spegne la pompa P10/2 | La valvola si trova nella linea di ridondanza. Tale linea viene utilizzata in caso di guasto della pompa P10/1 nella fase di beam-on. Nella fase di ramp-up la procedura prevede il controllo anche di tale linea. | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR2 | Assenza di portata sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una assenza della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC disattiva la pompa P10/2 in seguito all'assenza di portata rilevata dai flussometri | | |

| SCHEDA HAZOP P 8 | | | | | | | |
|--|-----------|------------------------------|--|---|---------------------------------|---|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Grippaggio della pompa P10/1 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC disattiva la pompa P10/1 | Nella fase di ramp-up è opportuno verificare che entrambe le linee di alimentazione e pompe siano funzionanti | |
| | | Grippaggio della pompa P10/2 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC disattiva la pompa P10/2 | | |

SCHEDA HAZOP P 9

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|---|---|---|---|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/1 | Perdita di liquido dalla pompa & riduzione della portata | Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & I flussometri rilevano una diminuzione della portata | Il PLC spegne la pompa P10/1 e ferma la fase di ramp-up | In caso di «LOCA» la pompa potrebbe non garantire la portata nominale al target e al nodo | |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/1 | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & I flussometri rilevano una diminuzione della portata | | | |
| | | Perdita di liquido verso l'esterno nello scambiatore di calore a piastre | | | | | |

SCHEDA HAZOP P 10

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|--|---|--|----------|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco totale di una valvola manuale a monte di PP4 (V4/V3, V5, V7, V9, V10, V11) | Nessuna portata & La pressione non aumenta | Il misuratore PP4 rileva un non aumento di pressione & I flussometri rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | |
| | | Apertura anomala della valvola V8 | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sul target | Il misuratore PP4 rileva un valore di pressione inferiore al valore nominale & I flussometri rilevano una portata minore della nominale | L'operatore decide di intervenire sulla base dei segnali e degli allarmi del PLC | | |

| SCHEDA HAZOP P 11 | | | | | | | |
|--|-----------|--|---|---|--|----------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco totale di una valvola manuale a valle di PP4 e prima del target (V13) | Nessuna portata & La pressione a monte del target aumenta | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | |

| SCHEDA HAZOP P 12 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|----------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Blocco totale di una valvola manuale a valle del target e di PP4 (V14) | Nessuna portata & La pressione aumenta a monte della valvola (incluso il target) | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | |

| SCHEDA HAZOP P 13 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|----------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco totale di una valvola manuale a valle di PP4 e prima del nodo1 (V15, V17) | Nessuna portata nel nodo & La pressione a monte del target aumenta | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri F1 e F2 rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | |

| SCHEDA HAZOP P 14 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|----------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Blocco totale di una valvola manuale a valle di PP4 e dopo il nodo1 (V16, V18) | Nessuna portata & La pressione aumenta a monte della valvola (incluso il nodo) | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri F1 e F2 rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | |

| SCHEDA HAZOP P 15 | | | | | | | |
|--|-----------|--|---|---|--|----------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Blocco totale di una valvola in uno dei circuiti refrigeranti del target paralleli al circuito contenente il nodo1 (V19, V20, V21, V22, V23, V24, V25 e V26) | Maggiore portata nel nodo & La pressione a monte del target aumenta | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri F3 e F4 o F5 e F6 rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | |

| SCHEDA HAZOP G 1 | | | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|---|---|---|---|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione minore del valore nominale & Incremento della pressione sulla linea (tramite valvola di laminazione?) | I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Sulla base degli allarmi e sulla lettura dei dati l'operatore può decidere di intervenire | Si prevede l'introduzione di una valvola di laminazione a valle della pompa (non rappresentata in layout) & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione in linea oltre PP4 | |

| SCHEDA HAZOP G 2 | | | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|---|---|---|---|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PORTATA | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al DCS una pressione maggiore del valore nominale & Incremento della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) | I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Sulla base degli allarmi e sulla lettura dei dati l'operatore può decidere di intervenire | Si prevede l'introduzione di una valvola di laminazione a valle della pompa (non rappresentata in layout) & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione in linea oltre PP4 | |

SCHEDA HAZOP G 3

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|---|---|--|---|-----|
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM1 | Aumento della pressione a monte della valvola & Diminuzione della portata | PP4 rivela un aumento della pressione & I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC fa scattare gli allarmi in funzione del valore della pressione rilevata da PP4 e della portata rilevata dai flussimetri | L'operatore decide di interrompere la fase di ramp-up & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione a monte di VM1 | |

SCHEDA HAZOP G 3.1

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---------------------------------|--|--|---|---|-------|
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola VM1 | Aumento brusco della pressione a monte della valvola | PP4 rivela un aumento della pressione & I misuratori del flusso F1 e F2 rivelano un annullamento della portata & Scattano i dispositivi di allarme | I flussometri rilevano portata nulla & Il PLC fa scattare gli allarmi visivi e sonori | L'operatore decide di interrompere la fase di ramp-up & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione a monte di VM1 | TE_A1 |

| SCHEDA HAZOP G 4 | | | | | | | |
|--|-----------|---|---|--|---|---|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM2 | Aumento della pressione a monte della valvola | PP4 rivela un aumento della pressione & I misuratori del flusso F1 e F2 rivelano un annullamento della portata & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC fa scattare gli allarmi in funzione del valore della pressione rilevata da PP4 | L'operatore decide di interrompere la fase di ramp-up & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione a monte di VM1 | |

| SCHEDA HAZOP G 4.1 | | | | | | | |
|--|-----------|---------------------------------|--|--|--|---|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola VM2 | Aumento brusco della pressione a monte della valvola | PP4 rivela un aumento della pressione & I misuratori del flusso F1 e F2 rivelano un annullamento della portata & Scattano i dispositivi di allarme | Il flussimetri in ingresso ed in uscita del target rilevano portata nulla & Il PLC fa scattare gli allarmi | L'operatore decide di interrompere la fase di ramp-up & Si suggerisce l'introduzione di un misuratore di pressione a monte di VM1 | TE_A1 |

| SCHEDA HAZOP G 5 | | | | | | | | |
|---|-----------|--|---|---|--------------------------------------|---|--|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/ RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP | |
| NULLA | PORTATA | Chiusura di una delle valvole manuali a valle della pompa P10/1 (o P10/2) (errore umano) | Assenza di portata nel target & Pressione a valle della pompa non aumenta (PP4 non rileva l'aumento di pressione) | Il misuratore di pressione PP4 non rileva alcun aumento di pressione & I flussimetri rilevano portata nulla & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC spegne la pompa P10/1 (P10/2) | Nel caso di spegnimento della pompa P10/1 non viene attivata la P10/2 in quanto per avviare il fascio tutte le valvole manuali devono essere nella giusta posizione | TE_A1 | |
| | | Chiusura della valvola manuale V1 (V2) (errore umano) | Assenza di portata nella linea di mandata & Pompa P10/1 (P10/2) in cavitazione | | | Il PLC spegne la pompa P10/1 (P10/2) | In fase di ramp-up, a seguito dello spegnimento di P10/1 dovuto ad un evento incidentale non viene attivata la P10/2 | TE_A1 |
| | | Chiusura della valvola manuale V3 (V4) (errore umano) | Aumento di pressione nella linea di alimentazione & Assenza di portata nella linea di mandata | | | Il PLC spegne la pompa P10/1 (P10/2) | In fase di ramp-up, a seguito dello spegnimento di P10/1 dovuto ad un evento incidentale non viene attivata la P10/2 | TE_A1 |

| SCHEDA HAZOP G 6 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|------------------------------|---|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR1 | Riduzione della portata sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & PP4 rileva una pressione minore della nominale | Il PLC spegne la pompa P10/1 | La pompa P10/2 non interviene nella fase di ramp-up | |

| SCHEDA HAZOP G 6.1 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|---|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola di non ritorno VR1 (valvola non si apre) | Nessuna portata sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una assenza della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC disattiva la pompa P10/1 in seguito all'assenza di portata rilevata dai flussometri | La pompa P10/2 non interviene nella fase di ramp-up | TE_A1 |

| SCHEDA HAZOP G 7 | | | | | | | |
|--|-----------|--|---|---|------------------------------|--|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola di non ritorno VR2 | Assenza di portata sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano l'assenza della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC spegne la pompa P10/2 | La valvola si trova nella linea di ridondanza. Tale linea viene utilizzata in caso di guasto della pompa P10/1 nella fase di beam-on. Nella fase di ramp-up la procedura prevede il controllo anche di tale linea. | TE_A1 |

| SCHEDA HAZOP G 7.1 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|--|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR2 | Riduzione della portata sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & PP4 rileva una pressione minore della nominale | Il PLC disattiva la pompa P10/2 in seguito all'assenza di portata rilevata dai flussometri | La valvola si trova nella linea di ridondanza. Tale linea viene utilizzata in caso di guasto della pompa P10/1 nella fase di beam-on. Nella fase di ramp-up la procedura prevede il controllo anche di tale linea. | |

| SCHEDA HAZOP G 8 | | | | | | | |
|--|-----------|------------------------------|--|---|---------------------------------|--|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Grippaggio della pompa P10/1 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC disattiva la pompa P10/1 | Nella fase di ramp-up è opportuno verificare che entrambe le linee siano funzionanti | |
| | | Grippaggio della pompa P10/2 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC disattiva la pompa P10/2 | | |

| SCHEDA HAZOP P 9 | | | | | | | |
|---|-----------|---|---|---|---|--|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1) : FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/1 | Perdita di liquido dalla pompa & riduzione della portata | Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & I flussometri rilevano una diminuzione della portata | il PLC spegne la pompa P10/1 e ferma la fase di ramp-up | In caso di «LOCA» la pompa potrebbe non garantire la portata nominale al target e al nodo. Sulla base dell'entità della perdita si può verificare la condizione di portata nulla nel nodo e nel target | TE_A1 |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole o giunzione a valle della pompa P10/1 | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & I flussometri rilevano una diminuzione della portata | | | |
| | | Perdita di liquido verso l'esterno nello scambiatore di calore a piastre | | | | | |

SCHEDA HAZOP G 10

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|--|---|--|----------|-------|
| NULLA | PORTATA | Blocco totale di una valvola manuale a monte di PP4 (V4/V3, V5, V7, V9, VA0, V11) | Nessuna portata & La pressione non aumenta | Il misuratore PP4 rileva un non aumento di pressione & I flussometri rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | TE_A1 |

SCHEDA HAZOP G 10.1

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------------|---|--|----------|-----|
| MINORE DI | PORTATA | Apertura anomala della valvola V8 | Riduzione della pressione sul target | Il misuratore PP4 rileva un valore di pressione inferiore al valore nominale & I flussometri rilevano una portata minore della nominale | L'operatore decide di intervenire sulla base dei segnali e degli allarmi del PLC | | |

SCHEDA HAZOP G 11

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|--|---|--|----------|-------|
| NULLA | PORTATA | Blocco totale di una valvola manuale a valle di PP4 e prima del target (V13) | Nessuna portata & La pressione a monte della valvola | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | TE_A1 |

SCHEDA HAZOP G 12

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|--|---|--|----------|-------|
| NULLA | PORTATA | Blocco totale di una valvola manuale a valle di PP4 e dopo il target (V14) | Nessuna portata & La pressione aumenta a monte della valvola (incluso il target) | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | TE_A1 |

| SCHEDA HAZOP P 13 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|----------|-------|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale di una valvola manuale a valle di PP4 e prima del nodo1 (V15, V17) | Nessuna portata nel nodo & La pressione a monte del target aumenta | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri F1 e F2 rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | TE_A1 |

| SCHEDA HAZOP P 14 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|----------|-------|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale di una valvola manuale a valle di PP4 e dopo il nodo1 (V16, V18) | Nessuna portata & La pressione aumenta a monte della valvola (incluso il nodo) | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri F1 e F2 rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | TE_A1 |

| SCHEDA HAZOP P 15 | | | | | | | |
|--|-----------|--|---|---|--|----------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO 1): FASE OPERATIVA BEAM OFF/RAMP-UP E RISCALDATORI SPENTI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PORTATA | Blocco totale di una valvola in uno dei circuiti refrigeranti del target paralleli al circuito contenente il nodo1 (V19, V20, V21, V22, V23, V24, V25 e V26) | Maggiore portata nel nodo & La pressione a monte del target aumenta | Il misuratore PP4 rileva un aumento di pressione & I flussometri F3 e F4 o F5 e F6 rilevano una portata nulla | Il PLC disattiva la pompa e l'operatore ferma la fase di ramp-up | | |

A3 Schede analisi Hazop fase di accensione dei riscaldatori

| SCHEDA HAZOP P 1 | | | | | | | |
|---|-----------|----------------------------|---|--|---|---|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione minore del valore nominale & Incremento della pressione e diminuzione della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) | I misuratore di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano una variazione di temperatura & I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | PLC ferma la fase di ramp-up | Anche in fase di ramp-up occorre fermare l'impianto se i valori di portata si discostano dal valore nominale. L'operatore deve essere addestrato per interpretare correttamente i segnali | |
| | | | | I misuratore di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano una variazione di temperatura & I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Il regolatore RT interviene sulla valvola a tre vie V3M modificando la portata del primario & Il PLC ferma l'impianto | Si suggerisce l'introduzione di un'ulteriore sonda di pressione nel circuito | |

| SCHEDA HAZOP P 2 | | | | | | | |
|---|-----------|---|---|---|--|---|-------|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM1 | Aumento della pressione nel target & Diminuzione della portata & Aumento della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola | |
| | | Blocco totale della valvola VM1 | Aumento brusco della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura all'uscita del target | I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola | TE_B3 |

SCHEDA HAZOP P 3

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|---|---|--|---|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM2 | Diminuzione della portata & Aumento della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a monte della valvola | |
| | | Blocco totale della valvola VM2 | diminuzione brusca della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura all'uscita del target | | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a monte della valvola | |

SCHEDA HAZOP P 4

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|--|--|--|---|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR1 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rivelano una diminuzione della portata & Il misuratore di temperatura TT4, TT6 e TT8 rivelano un aumento della temperatura | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | La pompa P10/2 potrebbe essere attivata per garantire comunque l'asportazione della potenza termica del target. E' chiaro che una volta rilevato il guasto e spenti i riscaldatori il PLC blocca l'impianto | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR1 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rivelano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | La pompa P10/2 potrebbe essere attivata per garantire comunque l'asportazione della potenza termica del target. E' chiaro che una volta rilevato il guasto e spenti i riscaldatori il PLC blocca l'impianto | |

| SCHEDA HAZOP P 5 | | | | | | | |
|---|-----------|--|--|--|--|--|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR2 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di temperatura TT4, TT6 e TT8 rilevano un aumento della temperatura | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | Solo in caso di avvio della linea ridondante | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR2 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | | |

| SCHEDA HAZOP P 6 | | | | | | | |
|---|-----------|---|---|--|---|---|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Grippaggio della pompa centrifuga P10/1 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la P10/2 dopo aver spento i riscaldatori | Poiché occorre comunque asportare la potenza termica al target è opportuno attivare la P10/2 e solo in un secondo momento spegnere l'impianto | |
| | | Grippaggio della pompa centrifuga P10/2 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC blocca il ramp-up | | |

SCHEDA HAZOP P 7

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---------------------------|---|--|---|----------|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Calibrazione errata di P4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione maggiore del valore nominale & Diminuzione della pressione e aumento della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Diminuzione della temperatura nel target | I misuratore di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano una variazione di temperatura & I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Il PLC agisce sulla valvola a 3 vie V3M del primario regolando la portata allo scambiatore di calore & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | | |
| | | | | | Il PLC spegne i riscaldatori e quindi ferma la fase di ramp-up | | |

SCHEDA HAZOP P 8

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|---|---|--|---|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/1 | Perdita di liquido dalla pompa & riduzione della portata | Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante | Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne i riscaldatori e avvia la pompa P10/2 | | |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole o giunzione a valle della pompa P10/1 e a monte del nodo | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura del fluido nel target | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussometri rilevano una diminuzione della portata & TT4, TT6, TT8 rilevano un aumento della temperatura & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC avvia il trip della pompa, spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | In caso di «LOCA» la pompa potrebbe non garantire la portata nominale al target e al nodo | |
| | | Perdita di liquido verso l'esterno nello scambiatore di calore a piastre | | | il PLC spegne i riscaldatori e e quindi spegne l'impianto | | |

| SCHEDA HAZOP G 1 | | | | | | | |
|---|-----------|----------------------------|--|--|--|--|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione minore del valore nominale & Diminuzione della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione) & Diminuzione della temperatura dell'acqua del secondario all'uscita dello scambiatore di calore | Il misuratore di temperatura TT2 rileva una variazione di temperatura & I flussimetri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme Il misuratore di temperatura TT2 rileva una variazione di temperatura & I flussimetri rilevano una variazione di portata | Il PLC ferma la fase di ramp-up Il regolatore interviene sulla valvola a tre vie VM modificando la portata del primario & Il PLC spegne eventualmente i riscaldatori e ferma il rump-up sulla base dei segnali di TT3, TT4, TT5, TT6, TT7 e FF1, FF2, FF3, FF4, FF5, FF6 | Anche in fase di ramp-up occorre fermare l'impianto de i valori di portata si discostano dal valore nominale. L'operatore deve essere addestrato per interpretare correttamente i dati Si suggerisce l'introduzione di un'ulteriore sonda di pressione nel circuito | |

| SCHEDA HAZOP G 2 | | | | | | | |
|---|-----------|---|--|---|--|---|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM1 | Aumento della pressione nel target & Diminuzione della portata & Aumento della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola | |

| SCHEDA HAZOP G 2.1 | | | | | | | |
|---|-----------|---------------------------------|---|---|--|---|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola VM1 | Aumento brusco della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola | TE_B1 |

SCHEDA HAZOP G 3

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|---|---|--|----------|-----|
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM2 | Diminuzione della portata & Aumento della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | TT4 rileva un aumento della temperatura all'uscita dal target & I misuratori del flusso FF1 e FF2 rivelano una diminuzione della portata & PLC blocca le operazioni di ramp-up | | |

SCHEDA HAZOP G 3.1

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---------------------------------|---|---|--|----------|-------|
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola VM2 | diminuzione brusca della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una portata nulla & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | | TE_B1 |

| SCHEDA HAZOP G 4,1 | | | | | | | |
|---|-----------|--|---|---|--|--|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola di non ritorno VR1 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante all'uscita dal target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | La pompa P10/2 potrebbe essere attivata per garantire comunque l'asportazione della potenza termica del target. E' chiaro che una volta rilevato il guasto e spenti i riscaldatori il PLC blocchi l'impianto | TE_B1 |

| SCHEDA HAZOP G 4 | | | | | | | |
|---|-----------|--|--|--|--|--|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR1 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di temperatura TT4, TT6 e TT8 rilevano un aumento della temperatura | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | La pompa P10/2 potrebbe essere attivata per garantire comunque l'asportazione della potenza termica del target. E' chiaro che una volta rilevato il guasto e spenti i riscaldatori il PLC blocchi l'impianto | |

| SCHEDA HAZOP G 5 | | | | | | | |
|---|-----------|--|--|--|--|--|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR2 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di temperatura TT4, TT6 e TT8 rilevano un aumento della temperatura | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | Solo in caso di avvio della linea ridondante | |

| SCHEDA HAZOP G 5,1 | | | | | | | |
|---|-----------|--|--|---|--|--|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola di non ritorno VR2 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | Solo in caso di avvio della linea ridondante | TE_B1 |

| SCHEMA HAZOP G 6 | | | | | | | |
|---|-----------|---|---|--|---|---|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Grippaggio della pompa centrifuga P10/1 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la P10/2 dopo aver spento i riscaldatori | Se il grippaggio è permanente e la pompa si blocca non vi è portata nella linea. Inoltre, poiché occorre comunque asportare la potenza termica al target è opportuno attivare la P10/2 e solo in un secondo momento spegnere l'impianto | TE_B1 |
| | | Grippaggio della pompa centrifuga P10/2 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC blocca il ramp-up | | TE_B1 |

| SCHEMA HAZOP G 7 | | | | | | | |
|---|-----------|---------------------------|---|--|--|----------|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PORTATA | Calibrazione errata di P4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione maggiore del valore nominale & Diminuzione della pressione e aumento della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Diminuzione della temperatura nel target | I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano una variazione di temperatura & I flussimetri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Il PLC agisce sulla valvola a 3 vie V3M del primario regolando la portata allo scambiatore di calore & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il ramp-up | | |
| | | | | | Il PLC spegne i riscaldatori e quindi ferma la fase di ramp-up | | |

| SCHEDA HAZOP G 8 | | | | | | | |
|---|-----------|--|---|---|---|---|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/1 | Perdita di liquido dal bichiere della pompa & Riduzione del livello del refrigerante nel serbatoio | Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante | Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne i riscaldatori e avvia la pompa P10/2 | | |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/1 e a monte del nodo | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura del fluido nel target | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & TT4, TT6, TT8 rilevano un aumento della temperatura & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC avvia il trip della pompa, spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | In caso di «LOCA» la pompa potrebbe non garantire la portata nominale al target e al nodo | TE_B1 |
| | | Perdita di liquido verso l'esterno nello scambiatore di calore a piastre | | | Il PLC spegne i riscaldatori e quindi spegne l'impianto | | TE_B1 |

| SCHEDA HAZOP T 1 | | | | | | | |
|---|-------------|---------------------------|---|--|---|--|-----|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Calibrazione errata di P4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione minore del valore nominale & Diminuzione della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione & Diminuzione della temperatura dell'acqua del secondario all'uscita dello scambiatore di calore | Il misuratore di temperatura TT2 rileva una variazione di temperatura & I flussimetri rilevano una variazione di portata & Scatta allarm | Il PLC ferma la fase di ramp-up | Anche in fase di ramp-up occorre fermare l'impianto se i valori di portata si discostano dal valore nominale. L'operatore deve essere addestrato per interpretare correttamente i dati | |
| | | | | Il misuratore di temperatura TT2 rileva una variazione di temperatura & I flussimetri rilevano una variazione di portata | Il regolatore interviene sulla valvola a tre vie VM modificando la portata del primario & Il PLC spegne eventualmente i riscaldatori e ferma il rump-up sulla base dei segnali di TT3, TT4, TT5, TT6, TT7, e FF1, FF2, FF3, FF4, FF5, FF6 | Si suggerisce l'introduzione di un'ulteriore sonda di pressione nel circuito | |

| SCHEDA HAZOP T 2 | | | | | | | |
|---|-------------|---|---|---|--|---|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica a VM1 | Aumento della pressione nel target & Diminuzione della portata & Aumento della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola | |
| | | Blocco totale della valvola VM1 | Aumento brusco della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura all'uscita del target | | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola | TE_B2 |

| SCHEDA HAZOP T 3 | | | | | | | |
|---|-------------|---|--|---|--|---|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica a VM2 | Diminuzione della portata & Aumento della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a monte della valvola | |
| | | Blocco totale della valvola VM2 | Diminuzione brusca della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata | I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC blocca le operazioni di ramp-up | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a monte della valvola | TE_B2 |

| SCHEMA HAZOP T 4 | | | | | | | |
|---|-------------|--|--|--|--|---|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR1 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | Il misuratore di temperatura TT3 rileva un aumento della temperatura & Il flussimetro FF1 rileva una diminuzione della portata | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | La pompa P10/2 potrebbe essere attivata per garantire comunque l'asportazione della potenza termica del target. E' chiaro che una volta rilevato il guasto e spenti i riscaldatori il PLC blocca l'impianto | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR1 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | La pompa P10/2 potrebbe essere attivata per garantire comunque l'asportazione della potenza termica del target. E' chiaro che una volta rilevato il guasto e spenti i riscaldatori il PLC blocca l'impianto | TE_B2 |

| SCHEMA HAZOP T 5 | | | | | | | |
|---|-------------|--|--|--|--|--|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR2 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di temperatura TT4, TT6 e TT8 rilevano un aumento della temperatura | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | Solo in caso di avvio della linea ridondante | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR2 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I Flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva un non aumento della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | | TE_B2 |

| SCHEDA HAZOP T 6 | | | | | | | |
|---|-------------|---|---|--|---|---|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Grippaggio della pompa centrifuga P10/1 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la P10/2 dopo aver spento i riscaldatori | Se il grippaggio è permanente e la pompa si blocca non vi è portata nella linea. Inoltre, poiché occorre comunque asportare la potenza termica al target è opportuno attivare la P10/2 e solo in un secondo momento spegnere l'impianto | TE_B2 |
| | | Grippaggio della pompa centrifuga P10/2 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura sul target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6, TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC blocca il ramp-up | | TE_B2 |

| SCHEDA HAZOP T 7 | | | | | | | |
|---|-------------|---------------------------|---|--|---|----------|-----|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | TEMPERATURA | Calibrazione errata di P4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione maggiore del valore nominale & Diminuzione della pressione e aumento della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Diminuzione della temperatura nel target | I misuratore di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano una variazione di temperatura & I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Il PLC agisce sulla valvola a 3 vie VM del primario regolando la portata allo scambiatore di calore & Il PLC spegne i riscaldatori e ferma il ramp-up | | |
| | | | | | Il PLC spegne i riscaldatori e quindi ferma la fase di ramp-up | | |

| SCHEDA HAZOP T 8 | | | | | | | |
|---|-------------|--|---|---|---|---|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/1 | Perdita di liquido dal bicchiere della pompa & Riduzione del livello del refrigerante nel serbatoio | Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante | Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne i riscaldatori e avvia la pompa P10/2 | | TE_B2 |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/1 e a monte del nodo | | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & TT4, TT6, TT8 rilevano un aumento della temperatura & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC avvia il trip della pompa, spegne i riscaldatori e ferma il rump-up | In caso di «LOCA» la pompa potrebbe non garantire la portata nominale al target e al nodo | TE_B2 |
| | | Perdita di liquido verso l'esterno nello scambiatore di calore a piastre | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura del fluido nel target | | Il PLC spegne i riscaldatori e quindi spegne l'impianto | | TE_B2 |

| SCHEDA HAZOP T 9 | | | | | | | |
|---|-------------|---|---|--|--|----------|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Guasto della valvola miscelatrice a tre vie V3M | Malfunzionamento o dello scambiatore con conseguente aumento della temperatura del refrigerante lato secondario all'uscita dello stesso scambiatore | TT2, TT3, TT5, TT7 rilevano un aumento della temperatura del refrigerante & Il PLC fa scattare l'allarme | Il PLC spegne i riscaldatori e quindi ferma il rump-up | | TE_B2 |

| SCHEDA HAZOP T 10 | | | | | | | |
|---|-------------|---|---|---|--|--|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Corrosione dei tubi dello scambiatore di calore | Aumento della temperatura del fluido all'uscita dello scambiatore e all'ingresso del target | TT2, TT3, TT5, TT7 rilevano un aumento della temperatura del refrigerante | Il regolatore apre la valvola a tre vie VM | Il regolatore regola la portata del circuito primario con la valvola a tre vie VM. Quando la regolazione non è più sufficiente è opportuno mantenere o sostituire lo scambiatore | TE_B2 |

SCHEDA HAZOP T 11

TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-------------|--------------------------------|---|---|--|----------|-----|
| MINORE DI | TEMPERATURA | Operazione spuria di TT1 e TT2 | Errata regolazione della portata del primario per mezzo di V3M & Diminuzione della temperatura nella linea e ingresso del target | TT2, TT3, TT5, TT7 rilevano una diminuzione della temperatura del refrigerante & Scatta il dispositivo d'allarme | Il PLC spegne i riscaldatori e quindi l'impianto | | |

SCHEDA HAZOP T 12

TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|-------------|-------------|--------------------------------|---|--|--|----------|-------|
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Operazione spuria di TT1 e TT2 | Errata regolazione della portata del primario per mezzo di V3M & Aumento della temperatura nella linea e ingresso del target | TT2, TT3, TT5, TT7 rilevano un aumento della temperatura del refrigerante & Scatta il dispositivo d'allarme | Il PLC spegne i riscaldatori e quindi l'impianto | | TE_B2 |

A4 Schede analisi Hazop fase di beam-on

| SCHEDA HAZOP P 1 | | | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|--|--|---|--|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione minore del valore nominale & Incremento della pressione e diminuzione della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Aumento della temperatura dell'acqua del secondario all'uscita dello scambiatore di calore | Il misuratore TT3, TT5 e TT7 rilevano un aumento della temperatura & I flussimetri rivelano una variazione di portata & scatta allarme | PLC spegne il fascio se i valori di ingresso della temperatura e di portata superano un valore di sicurezza | E' opportuno individuare il range di temperatura, pressione e portata superato il quale il PLC spegne il fascio (sicurezza). | |
| | | | | Il misuratore TT3, TT5 e TT7 rilevano un aumento della temperatura & I flussimetri rivelano una variazione di portata | Il regolatore RT interviene sulla valvola a tre vie VM3 modificando la portata del primario | E' opportuno individuare il range di temperatura, pressione e portata entro cui effettuare il controllo | |

| SCHEDA HAZOP P 2 | | | | | | | |
|--|-----------|----------------------------|---|--|--|---|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione maggiore del valore nominale & Diminuzione della pressione e aumento della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Diminuzione della temperatura nel target | I misuratore di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano una variazione di temperatura & I flussometri rivelano una variazione di portata & Scatta allarme | Il PLC agisce sulla valvola a 3 vie VM3 del primario regolando la portata allo scambiatore di calore | Si suppone che la sonda di pressione dia valori errati di pressione durante la fase di beam on. Sarebbe opportuno inserire un'altra sonda di pressione nell'impianto. | |
| | | | | | PLC spegne il fascio se i valori di temperatura e portata superano i valori di sicurezza | | |

SCHEDA HAZOP P 3

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|-------------|-----------|---|---|---|--|---|-------|
| MAGGIORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM1 | Aumento della pressione nel target & Diminuzione della portata & Aumento della temperatura del refrigerante all'uscita del target | PP4 rivela un aumento della pressione & I misuratori di flusso in ingresso ed in uscita del target rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura in uscita del target (TT4, TT6 e TT8) rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC spegne il fascio se vengono superati i valori massimi di temperatura e/o minimi di portata nel target (sicurezza) | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1 | |
| | | Blocco totale della valvola VM1 | Aumento brusco della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura nel target | PP4 rivela un aumento della pressione & I misuratori di flusso FF1, FF2, FF3, FF4, FF5 e FF6 rivelano una diminuzione della portata & Scattano i dispositivi di allarme | PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1 | TE_C3 |

SCHEDA HAZOP P 4

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|--|--|---|--|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM2 | Diminuzione della portata & Aumento della temperatura nel target | PP4 rivela un aumento di pressione & I misuratori di flusso rivelano una diminuzione della portata & Il misuratore di temperatura TT4, TT6 e TT8 rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1 per individuare univocamente la valvola bloccata | |
| | | Blocco totale della valvola VM2 | diminuzione brusca della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura nel target | PP4 rivela un aumento di pressione & I misuratori di flusso rivelano una diminuzione brusca della portata & Scattano i dispositivi di allarme | PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1 per individuare univocamente la valvola bloccata | |

SCHEDA HAZOP P 5

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|--|---|---|--|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR1 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | PP4 rivela una diminuzione della pressione & I misuratori di temperatura in uscita del target rilevano un aumento della temperatura del refrigerante & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la pompa P10/2 PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno definire una procedura per l'avvio della seconda pompa (P10/2) prima di interrompere il fascio | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR1 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I flussimetri rilevano una assenza della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la pompa P10/2 PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno definire una procedura per l'avvio della seconda pompa (P10/2) prima di interrompere il fascio | |

SCHEDA HAZOP P 6

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|--|--|--|----------|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR2 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante nel target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & PP4 rileva una pressione minore della nominale | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne il fascio | | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR2 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante nel target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne il fascio | | |

| SCHEDA HAZOP P 7 | | | | | | | |
|--|-----------|---|---|---|--|--|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Grippaggio della pompa centrifuga P10/1 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura nel target | I flussimetri rileva una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6 e TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 | Poiché occorre asportare la potenza termica al target è opportuno comunque attivare la P10/2 | |
| | | | | | Il PLC spegne il fascio | | |
| | | Grippaggio della pompa centrifuga P10/2 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura sul target | Flussimetro FF1 rileva una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT3 rivela un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne il fascio | | |

| SCHEDA HAZOP P 8 | | | | | | | |
|--|-----------|--|---|---|--|----------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PRESSIONE | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/1 | Perdita di liquido dal bicchiere della pompa & Riduzione del livello del refrigerante nel serbatoio | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I rilevatori di radioattività rivelano un aumento della radioattività | Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne il fascio e avvia la pompa P10/2 | | |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/1 e a monte del nodo | | | | | |
| | | Perdita di liquido verso l'esterno nello scambiatore di calore a piastre | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura del fluido nel target | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne il fascio | | |

SCHEDA HAZOP P 9

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|---|---|---|----------|-----|
| MINORE DI | PRESSIONE | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/2 | Perdita di liquido dal bicchiere della pompa & Riduzione del livello del refrigerante nel serbatoio | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I rilevatori di radioattività rilevano un aumento della radioattività | Scattano i sistemi di allarme & il PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | | |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/2 e a monte del nodo | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura del fluido nel target | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Scattano i sistemi di allarme & il PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | | |

SCHEDA HAZOP G 1

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|-------------|-----------|----------------------------|--|--|---|--|-----|
| MAGGIORE DI | PORTATA | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione minore del valore nominale & Incremento della pressione e diminuzione della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Aumento della temperatura dell'acqua del secondario all'uscita dello scambiatore di calore | Il misuratore TT3, TT5 e TT7 rilevano un aumento della temperatura & I flussimetri rivelano una variazione di portata & scatta allarme | PLC spegne il fascio se i valori di ingresso della temperatura e di portata superano un valore di sicurezza | E' opportuno individuare il range di temperatura, pressione e portata superato il quale il PLC spegne il fascio (sicurezza). | |
| | | | | Il misuratore TT3, TT5 e TT7 rilevano un aumento della temperatura & I flussimetri rivelano una variazione di portata | Il regolatore RT interviene sulla valvola a tre vie VM3 modificando la portata del primario | E' opportuno individuare il range di temperatura, pressione e portata entro cui effettuare il controllo | |

| SCHEDA HAZOP G 2 | | | | | | | |
|---|-----------|----------------------------|---|--|--|---|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FFASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | PORTATA | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione maggiore del valore nominale & Diminuzione della pressione e aumento della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Diminuzione della temperatura nel target | I misuratore di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano una variazione di temperatura & I flussometri rilevano una variazione di portata & Scatta allarme | Il PLC agisce sulla valvola a 3 vie VM3 del primario regolando la portata allo scambiatore di calore PLC spegne il fascio se i valori di temperatura e portata superano i valori di sicurezza | Si suppone che la sonda di pressione dia valori errati di pressione durante la fase di beam on. Sarebbe opportuno inserire un'altra sonda di pressione nell'impianto. | |

| SCHEDA HAZOP G 3 | | | | | | | |
|--|-----------|---|--|---|--|---|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM1 | Aumento della pressione nel target & Diminuzione della portata & Aumento della temperatura all'uscita del target | PP4 rivela un aumento della pressione & I flussometri rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura in uscita dal target rilevano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC spegne il fascio se vengono superati i valori massimi di temperatura e/o minimi di portata nel target (sicurezza) | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola. VM1. E' inoltre opportuno individuare una portata limite al di sotto del quale il PLC spegne il fascio | |

| SCHEDA HAZOP G 3.1 | | | | | | | |
|--|-----------|---------------------------------|---|---|----------------------|--|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola VM1 | Aumento brusco della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura all'uscita del target | I misuratori di flusso rivelano una portata nulla & Scattano i dispositivi di allarme | PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1 per individuare univocamente la valvola bloccata | TE_C1 |

SCHEDA HAZOP G 4

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|--|--|--|--|-----|
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM2 | Diminuzione della portata & Aumento della temperatura nel target | PP4 rivela un aumento di pressione & I misuratori del flusso rivelano una diminuzione della portata & TT4, TT6 e TT8 rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1 per individuare univocamente la valvola bloccata | |

SCHEDA HAZOP G 4.1

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---------------------------------|--|--|--|---|-------|
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola VM2 | diminuzione brusca della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata | I misuratori del flusso FF1 e FF2 rivelano una diminuzione della portata & TT4 rileva un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | FF1 e FF2 rilevano la brusca perdita di portata & PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1 | TE_C1 |

SCHEDA HAZOP G 5

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|--|--|---|---|-------|
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola di non ritorno VR1 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante nel target | I flussimetri rilevano una assenza della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la pompa P10/2 PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno definire una procedura secondo la quale il PLC dovrebbe comunque avviare la seconda pompa (P10/2) prima di interrompere il fascio | TE_C1 |

SCHEDA HAZOP G 5.1

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|--|--|--|---|---|-----|
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR1 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | PP4 rivela una diminuzione della pressione & I misuratori di temperatura in uscita del target rilevano un aumento della temperatura & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la pompa P10/2 PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno definire una procedura secondo la quale il PLC dovrebbe comunque avviare la seconda pompa (P10/2) prima di interrompere il fascio | |

| SCHEDA HAZOP G 6 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|---|--|----------|-----|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR2 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante nel target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6 e TT8 rilevano un aumento della temperatura | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & IL PLC spegne il fascio | | |

| SCHEDA HAZOP G 6.1 | | | | | | | |
|--|-----------|--|--|--|--|----------|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| NULLA | PORTATA | Blocco totale della valvola di non ritorno VR2 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I flussimetri rilevano una assenza della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & IL PLC spegne il fascio | | TE_C1 |

SCHEDA HAZOP G 7

PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-----------|---|---|---|--|--|-------|
| MINORE DI | PORTATA | Grippaggio della pompa centrifuga P10/1 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura nel target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6 e TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 | Poiché occorre asportare la potenza termica al target è opportuno comunque attivare la P10/2 | TE_C1 |
| | | Grippaggio della pompa centrifuga P10/2 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura nel target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6 e TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC spegne il fascio | | TE_C1 |

| SCHEDA HAZOP G 8 | | | | | | | |
|--|-----------|--|---|---|--|--|---|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Usura del bicchiere della pompa centrifuga P10/1 | Perdita di liquido dal bicchiere della pompa & Riduzione del livello del refrigerante nel serbatoio | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I rilevatori di radioattività rilevano un aumento della radioattività | Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne il fascio e avvia la pompa P10/2 | L'usura del bicchiere del giunto magnetico può avvenire a causa dell'erosione/corrosione da parte del fluido. Può portare a perdite di liquido all'interno del supporto e poi verso l'esterno. La vasca di contenimento permette che il liquido refrigerante non si disperda e possa essere agevolmente raccolto | TE_C1 |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/1 e a monte del nodo | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura del fluido nel target | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC spegne il fascio | Nel caso di LOCA, non è garantita la portata in linea poiché le pompe non sono regolabili. | TE_C1 |
| | | Perdita di liquido verso l'esterno nello scambiatore di calore a piastre | | | | | Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne il fascio |

| SCHEDA HAZOP G 9 | | | | | | | |
|--|-----------|--|---|---|---|----------|-------|
| PORTATA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | PORTATA | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/2 | Perdita di liquido dal bicchiere della pompa & Riduzione del livello del refrigerante nel serbatoio | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I rilevatori di radioattività rilevano un aumento della radioattività | Scattano i sistemi di allarme & il PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | | TE_C1 |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/2 e a monte del nodo | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura del fluido nel target | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Scattano i sistemi di allarme & il PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | | |

SCHEDA HAZOP T 1

PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|-------------|-------------|----------------------------|--|--|---|--|-----|
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione minore del valore nominale & Incremento della pressione e diminuzione della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Aumento della temperatura dell'acqua del secondario all'uscita dello scambiatore di calore | Il misuratore TT3, TT5 e TT7 rilevano un aumento della temperatura & I flussimetri rivelano una variazione di portata & scatta allarme | PLC spegne il fascio se i valori di ingresso della temperatura e di portata superano un valore di sicurezza | E' opportuno individuare il range di temperatura, pressione e portata superato il quale il PLC spegne il fascio (sicurezza). | |
| | | | | Il misuratore TT3, TT5 e TT7 rilevano un aumento della temperatura & I flussimetri rivelano una variazione di portata | Il regolatore RT interviene sulla valvola a tre vie VM3 modificando la portata del primario | E' opportuno individuare il range di temperatura, pressione e portata entro cui effettuare il controllo | |

SCHEDA HAZOP T 2

TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|------------|-------------|----------------------------|---|--|--|--|-----|
| MINORE DI | TEMPERATURA | Calibrazione errata di PP4 | La sonda PP4 segnala al PLC una pressione maggiore del valore nominale & Diminuzione della pressione e aumento della portata sulla linea (tramite valvola di regolazione?) & Diminuzione della temperatura nel target | I misuratore di temperatura TT4, TT6, TT8 rilevano una variazione di temperatura & I flussometri rivelano una variazione di portata & Scatta allarme | Il PLC agisce sulla valvola a 3 vie VM3 del primario regolando la portata allo scambiatore di calore PLC spegne il fascio se i valori di temperatura e portata superano i valori di sicurezza | Si suppone che la sonda di pressione dia valori errati di pressione durante la fase di beam on. Sarebbe opportuno inserire un'altra sonda di pressione nell'impianto | |

SCHEDA HAZOP T 3

TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|-------------|-------------|---|--|---|--|---|-------|
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM1 | Aumento della pressione nel target & Diminuzione della portata & Aumento della temperatura nel target | I misuratori del flusso rivelano una diminuzione della portata & i misuratori di temperatura in uscita del target rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC spegne il fascio se vengono superati i valori massimi di temperatura e/o minimi di portata nel target (sicurezza) | E' opportuno individuare una temperatura limite al di sopra della quale il PLC spegne il fascio | |
| | | Blocco totale della valvola VM1 | Aumento brusco della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura nel target | I misuratori del flusso rivelano una brusca diminuzione della portata & Scattano i dispositivi di allarme | PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1 | TE_C2 |

SCHEDA HAZOP T 4

TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|-------------|-------------|---|--|---|---|---|-------|
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Blocco parziale della valvola elettropneumatica VM2 | Diminuzione della portata & Aumento della temperatura Nel target | PP4 rivela un aumento della pressione & I flussometri rivelano una diminuzione della portata & I misuratori di temperatura in uscita dal target rivelano un aumento della temperatura & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1per individuare univocamente la valvola bloccata | |
| | | Blocco totale della valvola VM2 | Diminuzione brusca della pressione nel target & Diminuzione brusca della portata & Aumento brusco della temperatura Nel target | PP4 rivela un aumento della pressione & I flussometri rivelano una diminuzione della portata & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno inserire un misuratore di pressione a valle della valvola VM1per individuare univocamente la valvola bloccata | TE_C2 |

SCHEDA HAZOP T 5

TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|-------------|-------------|--|--|---|---|---|-------|
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR1 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante nel target | I misuratori di temperatura in uscita del target rilevano un aumento della temperatura & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la pompa P10/2 PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno definire una procedura secondo la quale il PLC dovrebbe comunque avviare la seconda pompa (P10/2) prima di interrompere il fascio | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR1 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante sul target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC attiva la pompa P10/2 PLC spegne il fascio | Sarebbe opportuno definire una procedura secondo la quale il PLC dovrebbe comunque avviare la seconda pompa (P10/2) prima di interrompere il fascio | TE_C2 |

SCHEDA HAZOP T 6

TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON

| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
|-------------|-------------|--|--|--|--|---|-------|
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Blocco parziale della valvola di non ritorno VR2 | Riduzione della portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante nel target | I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & PP4 rileva una pressione minore della nominale & TT4, TT6 e TT8 rilevano un aumento della temperatura | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne il fascio | In questa scheda si ipotizza l'attivazione della seconda pompa in seguito al guasto della P10/1 | |
| | | Blocco totale della valvola di non ritorno VR2 | Nessuna portata sulla linea e sul target & aumento della temperatura del refrigerante nel target | Il flussimetro FF1 rileva una assenza della portata & Il misuratore di pressione PP4 rileva una diminuzione della pressione | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne il fascio | In questa scheda si ipotizza l'attivazione della seconda pompa in seguito al guasto della P10/1 | TE_C2 |

| SCHEDA HAZOP T 7 | | | | | | | |
|--|-------------|---|---|---|---|---|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Grippaggio della pompa centrifuga P10/1 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura nel target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6 e TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/1 & Il PLC avvia la pompa P10/2 Il PLC spegne il fascio | Poiché occorre comunque asportare la potenza termica al target è opportuno attivare la P10/2 e solo in un secondo momento spegnere l'impianto | |
| | | Grippaggio della pompa centrifuga P10/2 | Riduzione della portata e della pressione sulla linea e sul target & aumento della temperatura nel target | I flussimetri rilevano una riduzione della portata & PP4 rileva una diminuzione della pressione & TT4, TT6 e TT8 rivelano un aumento della temperatura del refrigerante | Il PLC avvia il trip della pompa P10/2 & Il PLC spegne il fascio | | TE_C2 |

| SCHEDA HAZOP T 8 | | | | | | | |
|---|-------------|--|--|---|---|---|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/1 | Perdita di liquido dal bicchiere della pompa & Riduzione del livello del refrigerante nel serbatoio | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I rilevatori di radioattività rivelano un aumento della radioattività | I misuratori di livello rilevano una diminuzione del livello del liquido nel serbatoio & Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne il fascio e avvia la pompa P10/2 | In base all'entità della perdita le sonde di temperatura potrebbero non avvertire inizialmente un aumento della temperatura all'uscita del target | TE_C2 |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/1 e a monte del nodo | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura nel target | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Il PLC avvia il trip della pompa & il PLC spegne il fascio Scattano i sistemi di allarme & il PLC spegne il fascio | Nel caso di LOCA, non è garantita la portata in linea poiché le pompe non sono regolabili. | |
| | | Perdita di liquido verso l'esterno nello scambiatore di calore a piastre | | | | | |

| SCHEDA HAZOP T 9 | | | | | | | |
|--|-------------|--|---|---|---|----------|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Usura o danneggiamento dell'isolamento idraulico della pompa centrifuga P10/2 | Perdita di liquido dal bicchiere della pompa & Riduzione del livello del refrigerante nel serbatoio | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I rilevatori di radioattività rilevano un aumento della radioattività | Scattano i sistemi di allarme & il PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | | |
| | | Perdita di fluido refrigerante verso l'esterno da una delle valvole a valle della pompa P10/2 e a monte del nodo | Riduzione della portata & Riduzione della pressione sulla linea & Aumento della temperatura del fluido nel target | Il misuratore PP4 rileva una diminuzione della pressione & I flussimetri rilevano una diminuzione della portata & Gli indicatori di livello del serbatoio indicano un abbassamento del livello del refrigerante & Scattano i dispositivi di allarme | Scattano i sistemi di allarme & il PLC avvia il trip della pompa e spegne il fascio | | TE_C2 |

| SCHEDA HAZOP TT10 | | | | | | | |
|--|-------------|---|--|--|-------------------------|--------------------------------------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | TEMPERATURA | Guasto della valvola miscelatrice a tre vie VM3 | Diminuzione della temperatura all'uscita dello scambiatore | TT2, TT3, TT5, TT7 rileva una temperatura differente rispetto alla nominale & Scatta l'allarme | Il PLC spegne il fascio | La pompa non può regolare la portata | |

| SCHEDA HAZOP TT11 | | | | | | | |
|--|-------------|---|--|--|-------------------------|--------------------------------------|-----|
| PRESSIONE IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Guasto della valvola miscelatrice a tre vie VM3 | aumento della temperatura all'uscita dello scambiatore | TT2, TT3, TT5, TT7 rileva una temperatura differente rispetto alla nominale & Scatta l'allarme | Il PLC spegne il fascio | La pompa non può regolare la portata | |

| SCHEMA HAZOP T 12 | | | | | | | |
|---|-------------|---|---|---|--|--|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM OFF-RAMP-UP E RISCALDATORI ACCESI | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Corrosione dei tubi e/o delle piastre dello scambiatore di calore | Aumento della temperatura del fluido all'uscita dello scambiatore e all'ingresso del target | I misuratori di temperatura TT2, TT3, TT5 e TT7 rilevano un aumento della temperatura | Il regolatore RT apre la valvola a tre vie VM3 | Il regolatore RT regola la portata del circuito primario con la valvola a tre vie VM3. Quando la regolazione non è più sufficiente è opportuno mantenere o sostituire lo scambiatore | TE_C2 |

| SCHEMA HAZOP T 13 | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------------------------|--|---|--------------------------|----------|-----|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MINORE DI | TEMPERATURA | Operazione spuria del rivelatore TT2 | Errata regolazione della VM3 & Diminuzione della temperatura nella linea e ingresso del target | I misuratori TT3, TT5, TT7 rilevano una temperatura d'ingresso al target diversa da quella nominale & Scatta il dispositivo d'allarme | Il PLC spegne i l fascio | | |

| SCHEMA HAZOP T 14 | | | | | | | |
|--|-------------|--------------------------------------|--|---|--------------------------|----------|-----|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Operazione spuria del rivelatore TT2 | Errata regolazione della VM3 & Aumento della temperatura nella linea e ingresso del target | I misuratori TT3, TT5, TT7 rilevano una temperatura d'ingresso al target diversa da quella nominale & Scatta il dispositivo d'allarme | Il PLC spegne i l fascio | | |

| SCHEMA HAZOP T 14 | | | | | | | |
|--|-------------|----------------------|---|--|--|--|-------|
| TEMPERATURA IN CAMERA TARGET (NODO1): FASE OPERATIVA BEAM ON | | | | | | | |
| DEVIAZIONE | PARAMETRO | CAUSE | CONSEGUENZE | STRUMENTI DI RIVELAZIONE | PROTEZIONE | COMMENTI | TOP |
| MAGGIORE DI | TEMPERATURA | Overpower nel target | Aumento della temperatura nel target dovuto all'aumento di potenza depositata e/o generata nel target | I misuratori TT4, TT6, TT8 rilevano una temperatura d'uscita dal target diversa da quella nominale & Scatta il dispositivo d'allarme | Il PLC spegne i l fascio La valvola a tre vie VM33 regola la portata dello scambiatore primario per asportare la potenza del primario | In base all'entità dell'overpower il PLC regola o spegne il fascio | TE_C2 |