

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Nuovo nucleare da fissione Reattori di quarta generazione

Scenario di riferimento

Tra le tecnologie nucleari più promettenti proposte dal GENERATION IV International Forum (GIF), ricoprono un ruolo molto importante i reattori veloci refrigerati a piombo (Lead cooled Fast Reactor, LFR), poiché soddisfano potenzialmente tutti i requisiti introdotti per i sistemi nucleari di IV generazione:

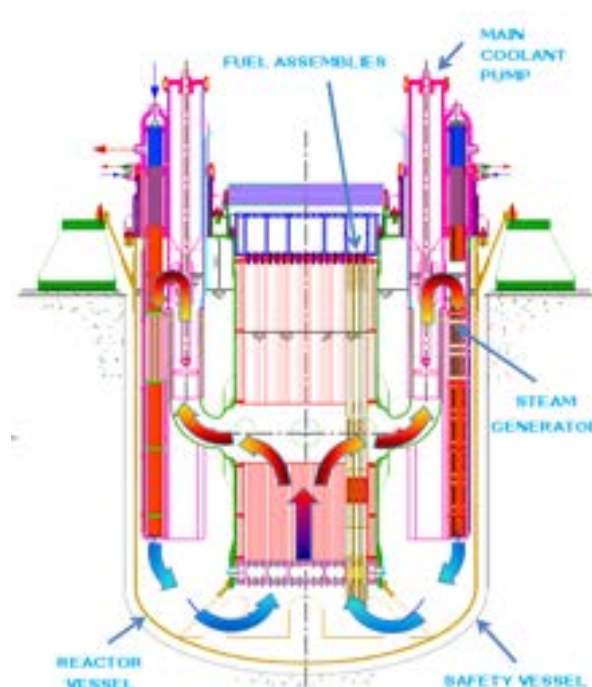
Sostenibilità - Il piombo presenta ottime proprietà nucleari, che consentono l'esercizio di un reattore nucleare a spettro "veloce", una lunga durata al nocciolo e una elevata efficienza di utilizzo del combustibile, di molto superiore agli attuali sistemi nucleari. Il flusso neutronico veloce permette inoltre di operare con un ciclo del combustibile "chiuso", che comporta una drastica riduzione di scorie a elevata radiotossicità.

Economicità - I sistemi LFR sono ideati e progettati per essere semplici. Il piombo non interagisce chimicamente con aria e acqua, e ha una bassa tensione di vapore. Ciò consente di realizzare sistemi a bassa pressione e di installare il generatore di vapore direttamente nel sistema primario, con una notevole semplificazione impiantistica e una riduzione di complessità, dimensioni e costi di impianto.

Sicurezza e affidabilità - I sistemi LFR, grazie alle caratteristiche termodinamiche del piombo e alle ottime capacità di intrappolare i prodotti di fissione anche volatili e di schermare le radiazioni gamma, sono caratterizzati da elevati standard di sicurezza e affidabilità durante l'esercizio. L'utilizzo del piombo favorisce, inoltre, l'asportazione della potenza di decadimento in regime di circolazione naturale, permettendo una sensibile semplificazione dei sistemi di protezione.

Resistenza alla Proliferazione e Protezione Fisica - Negli LFR viene utilizzato combustibile a ossidi misti, contenente nel lungo termine

attinidi minori che lo rendono inutilizzabile per la produzione di plutonio weapon-grade. Inoltre, le proprietà neutroniche del piombo permettono di progettare noccioli a lunga vita che sono inutilizzabili per la produzione di plutonio.



Reattore DEMO-LFR, ALFRED (Ansaldo Nucleare)

Obiettivi

L'obiettivo del progetto è sostenere lo sviluppo tecnologico dei sistemi nucleari di quarta generazione refrigerati a piombo con ciclo del combustibile chiuso, che riscuote particolare interesse in Europa (SNETP - SRA). Le attività implementate riguardano:

- progettazione di sistema
- materiali strutturali e fabbricazioni
- termoidraulica del refrigerante
- analisi di sicurezza.

Risultati

Progettazione di sistema

La progettazione di sistema ha riguardato essenzialmente l'implementazione di modelli di calcolo per la termoidraulica, la neutronica e la cinetica spaziale di nocciolo.

È proseguito lo sviluppo di un codice di neutronica e termoidraulica accoppiate (FRENETIC), finalizzato all'analisi cinetica spaziale di un nocciolo LFR.

È stata avviata una sistematica attività di validazione e di sviluppo del codice ERANOS e il suo utilizzo sulla base della metodologia GPT (Generalized Perturbation Theory) per calcoli perturbativi generalizzati.

Per la simulazione termoidraulica di reattori refrigerati a piombo si è lavorato sull'ottimizzazione e l'estensione dell'utilizzo del codice di calcolo FEM-LCORE.

Per il reattore DEMO-LFR è stata realizzata una nuova concettualizzazione del nocciolo, giungendo alla configurazione AFRODITE (Advanced lead-cooled Fast Reactor Oriented to the Demonstration of Innovative Technologies) che sembra soddisfare tutti gli obiettivi di dimostrazione, rispettando al contempo tutti i vincoli fissati ex-novo, coerentemente con l'obiettivo di semplificare le richieste tecnologiche per accelerare la realizzabilità del reattore.

Materiali strutturali e fabbricazioni

Considerato che uno dei maggiori punti deboli per lo sviluppo e implementazione dei sistemi LFR è l'individuazione di appropriati materiali strutturali, si è promosso un cambio di strategia per il reattore DEMO-LFR, che prevede l'utilizzo di materiali strutturali già qualificati per applicazioni nucleari in reattori veloci e lo sviluppo di sistemi di protezione contro la corrosione in piombo.

Attualmente l'acciaio di riferimento per la guaina del combustibile è il 15-15 Ti mod (Si), sviluppato e qualificato dal CEA per i reattori a sodio. Per incrementare le caratteristiche di resistenza alla corrosione si sono sviluppati e realizzati ricoprimenti di Fe-Al, Fe-Cr-Al, TiN mediante tecnica PVD (Physical Vapor Deposition).

Per lo sviluppo di rivestimenti protettivi per materiali strutturali è stata acquisita una macchina per la Detonation Spray, che

permette di realizzare, accoppiata alla tecnica PVD, coating multilayer.

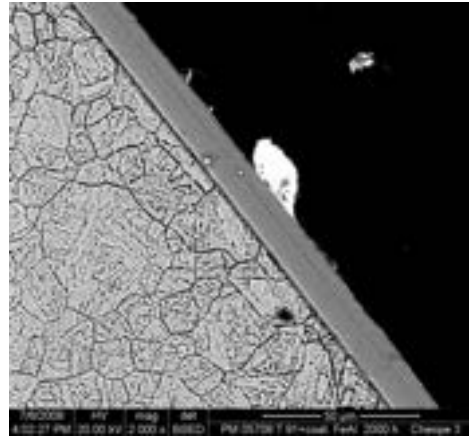
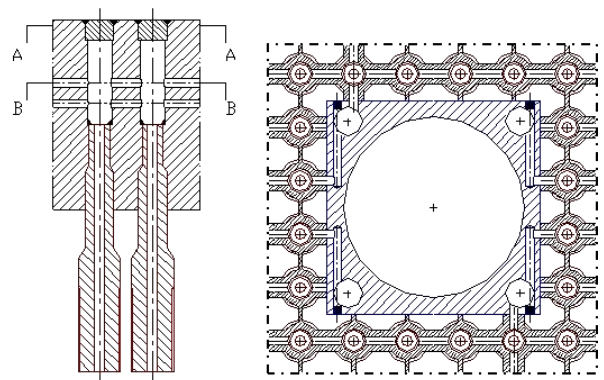


Immagine SEM di provino di T91 rivestito con coating di FeAl (PVD) ed esposto in piombo a 550 °C per 2000 h

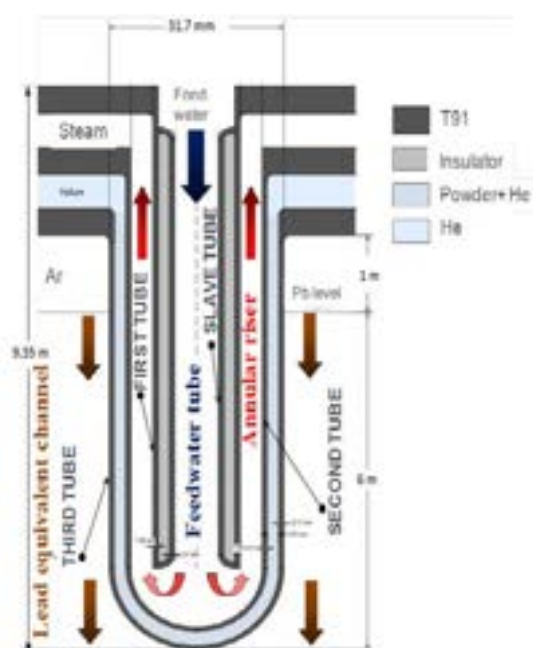
Nell'ambito delle attività di progettazione di elementi di combustibile innovativi per sistemi LFR si è reso necessario associare alle attività progettuali anche studi approfonditi di fabbricabilità delle soluzioni proposte. A tale scopo si è elaborata una specifica tecnica relativa allo studio di fattibilità di alcuni dettagli di elementi di combustibile. Considerando un fascio di barrette di tipo "vented" (ovvero liberate dalla presenza di "gas di fissione" interno) su reticolo quadrato con griglie spaziatrici e senza scatola esterna, si è studiata la connessione delle singole barrette alla griglia di piede che necessita di una verifica preliminare della sua fattibilità con capacità di tenuta.



Concettualizzazione elemento di combustibile "vented" per sistemi LFR con reticolo quadrato

Termoidraulica del refrigerante

Sono state condotte attività di caratterizzazione di generatori di vapore (GV) prototipici per sistemi LFR. Considerando la soluzione proposta per l'impianto DEMO-LFR ALFRED, che prevede l'utilizzo di tubi a baionetta a doppia parete con interposta intercapedine conduttiva, si è realizzata una serie di analisi parametriche sulle prestazioni del sistema. Le simulazioni realizzate hanno supportato la progettazione della facility HERO (Heavy liquid metal - pressurized water cooled tube facility), impianto sperimentale che ospiterà il tubo a baionetta del GV di ALFRED per le fasi di sperimentazione in piombo.



Schema concettuale del tubo a baionetta del GV del DEMO-LFR ALFRED

Nell'ambito delle attività di caratterizzazione del prototipo di DHR da 800 kW installato sull'impianto CIRCE in configurazione ICE (Centro Ricerche ENEA Brasimone), sono state realizzate diverse sessioni sperimentali. Sono state realizzate prove a piena potenza con lo scopo di ottenere informazioni utili in termini di portata di refrigerante, accoppiamento termico fra sorgente termica e pozzo di calore, prestazioni di componenti prototipici. Si sono poi realizzate simulazioni sperimentali di alcuni scenari incidentali relativi ai sistemi LFR, ottenendo utili informazioni e dati per la comprensione e l'analisi del comportamento

incidentale di tali sistemi. È stata realizzata una analisi numerica che ha supportato la re-definizione e il miglioramento della sezione di prova ICE, sviluppando un accoppiamento fra codice di sistema (RELAP5) e codice CFD (Fluent) di tipo elementare (one-way).

Per quanto concerne la realizzazione di prove di scambio termico in regime di circolazione mista, si è realizzata una serie di interventi sull'impianto NACIE, tra cui la progettazione e l'avvio della realizzazione del fuel pin bundle da 250 kW, l'installazione di un sistema di regolazione e controllo potenza, e la installazione di uno scambiatore di calore. In preparazione degli esperimenti sono state realizzate analisi numeriche di pre-test, mediante il codice di sistema RELAP5, anche accoppiato a un codice di CFD.



Particolare del fuel pin bundle installato nell'impianto CIRCE in configurazione ICE

Si è, inoltre, provveduto alla progettazione, realizzazione e installazione dell'impianto a piombo denominato HELENA. L'impianto sarà utilizzato anche per prove di scambio termico e perdite di carico in fuel pin bundle refrigerati a piombo in regime di circolazione forzata.



Pompa di circolazione centrifuga impianto HELENA e girante ricoperta in Tantalio

Analisi di sicurezza

Per il controllo della chimica del refrigerante è di fondamentale importanza disporre di un sistema di regolazione e controllo del tenore di ossigeno disciolto e quindi di sonde a ossigeno che ne permettano il monitoraggio nel metallo liquido.

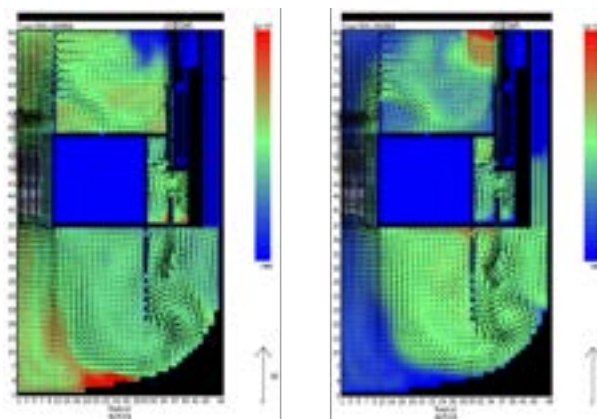
Si è quindi provveduto a progettare e realizzare sonde per piombo basate sulla tecnologia delle celle elettrolitiche a ossido di zirconio, da qualificare presso gli impianti sperimentali del Centro Ricerche ENEA del Brasimone.

Ai fini della valutazione degli incidenti severi che portano al danneggiamento del combustibile, si sono realizzati studi analitici relativi all'interazione tra il combustibile e il refrigerante.

Relativamente al rilascio e migrazione dei prodotti di fissione si è identificata una apposita metodologia per la valutazione del tasso di rilascio dei prodotti di fissione dal combustibile irraggiato (termine sorgente) di un sistema LFR, che prevede l'utilizzo di un metodo di analisi statistico basato su codici Monte Carlo, accoppiato con codici di fuel-pin-performance basati su modelli semi-empirici.

Si sono inoltre analizzati numericamente possibili scenari incidentali sui sistemi LFR, con l'obiettivo di identificare e supportare future attività di ricerca e sviluppo. A tale scopo si sono individuati preliminarmente i seguenti scenari incidentali:

Perdita di integrità del nocciolo - L'attività ha avuto come obiettivo la verifica di sicurezza di un sistema nucleare veloce refrigerato a piombo a seguito di un evento incidentale che comporti la parziale o completa distruzione del nocciolo. Mediante il codice SIMMER-III, si è modellato il reattore MYRRHA simulando un transitorio di "fuel dispersion". I risultati prodotti hanno messo in evidenza l'importanza di una corretta e accurata valutazione delle forze di galleggiamento e di trascinamento che agiscono sul combustibile disperso, sottolineando il ruolo predominante della porosità del combustibile.



Distribuzione delle particelle di combustibile a seguito di un evento di core degradation (porosità fuel 5% e 10%)

Perdita di refrigerazione - Si è creato e validato un dominio di calcolo semplificato per codici CFD che ha come obiettivo l'analisi della mutua interazione fra diversi elementi di combustibile a seguito della parziale o completa perdita di portata di refrigerazione. Si è evidenziato come gli elementi di combustibile aperti mostrino una minore sensibilità al fenomeno.

Parziale congelamento del sistema primario - Si è creato e validato un dominio di calcolo semplificato per codici CFD che permetta di investigare il comportamento termoidraulico del sistema primario a seguito di un repentino ed esteso congelamento del metallo liquido fluente attraverso il generatore di vapore.

Valutazione delle interazioni fluido-struttura nei sistemi LFR - Scopo dello studio è stata la valutazione preliminare degli effetti strutturali (in termini di risposta globale del sistema) indotti da un terremoto di riferimento sui componenti "safety relevant" di un sistema nucleare LFR.

Area di ricerca: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto 1.3.1 - LP3: Nuovo nucleare da fissione – Reattori di quarta generazione

Referente: Mariano Tarantino, mariano.tarantino@enea.it

Novembre 2012

Documenti tecnici e aggiornamenti disponibili sul sito ENEA: www.enea.it