



## Nucleare da fissione Reattori di quarta generazione

### Scenario di riferimento

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

**Sostenibilità.** Il piombo è un refrigerante che presenta ottime proprietà nucleari e che rende possibile l'esercizio di un reattore nucleare a spettro "duro". Ciò conferisce al nocciolo una lunga durata ed una elevata efficienza nell'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 consente una drastica riduzione di scorie ad elevata radiotossicità.

**Economicità.** I sistemi LFR sono ideati e progettati per essere semplici. Il piombo infatti 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 (GV) direttamente nel sistema primario. Ciò comporta una notevole semplificazione impiantistica che riduce 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, consentono di ottenere elevati standard di sicurezza e affidabilità durante l'esercizio. L'utilizzo del piombo inoltre favorisce 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. Il combustibile ad ossidi misti, contenente nel lungo termine attinidi minori, è del tutto inefficace 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.

### Obiettivi

L'obiettivo principale è sostenere lo sviluppo tecnologico dei sistemi nucleari di quarta generazione, in particolare LFR, che riscuote interesse in Europa. Le attività implementate riguardano:

- sviluppo e validazione codici di calcolo;
- progettazione e implementazione di nuove infrastrutture e laboratori;
- sviluppo e qualifica componenti e sistemi prototipici;
- qualifica materiali strutturali.



### Risultati

#### Laboratorio per la termo-fluidodinamica dei metalli liquidi

Si è provveduto alla definizione e implementazione di un laboratorio di misura per la caratterizzazione dei metalli liquidi, acquisendo strumentazione prototipica e avviando azioni tese alla qualifica di componenti prototipici quali il GV del DEMO-LFR.

In particolare si è progettata e realizzata la apparecchiatura TxP “Test for Powder” dedicata alla caratterizzazione sperimentale del singolo elemento del GV.

Nell’ambito degli studi sulla sicurezza del reattore LFR, si sono implementate attività di supporto per la caratterizzazione dell’interazione metallo liquido-acqua, che può avvenire in situazioni incidentali nei GV-LFR. L’apparecchiatura sperimentale LIFUS-5 è stata aggiornata per consentire di effettuare esperimenti affidabili e di elevata qualità. Attività numeriche di supporto alle prossime campagne sperimentali sono state effettuate col codice SIMMER-III, simulando il comportamento del GV-LFR.

### Sviluppo tecnologie

In tale contesto è stato revisionato il progetto concettuale dell’impianto a piombo fluente HELENA, sia per prevederne l’esercizio con un tenore di ossigeno disciolto molto basso (< 10<sup>-8</sup> wt%), sia per revisionare il progetto della pompa centrifuga. Si è infatti deciso di sviluppare una girante in acciaio ricoperta in Ta.

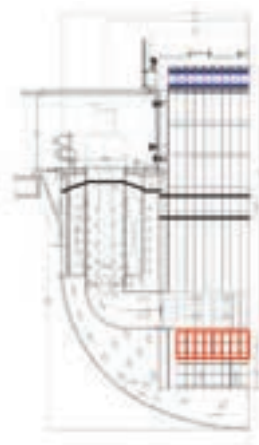
Per quanto riguarda la qualifica dello scambiatore di calore per la rimozione del calore di decadimento (DHR), si è provveduto alla implementazione di strumentazione aggiuntiva sull’impianto a metallo liquido pesante CIRCE-ICE, per la completa caratterizzazione del prototipo di DHR da 800 kW.

L’upgrade realizzato sull’impianto CIRCE, oltre alla qualifica del DHR, permetterà di realizzare importanti esperimenti per la caratterizzazione dello scambio termico in pin bundle refrigerati a metallo liquido pesante, sia in regime di circolazione stazionaria che transitoria (incidentale).

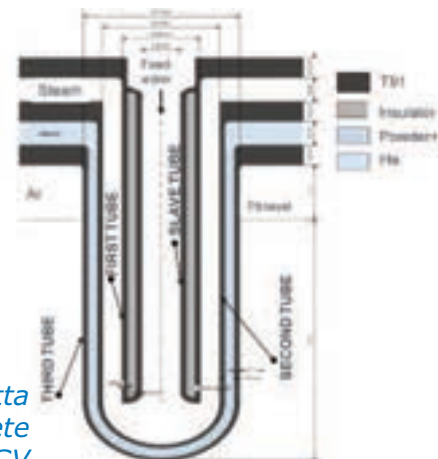
Si è inoltre progettato un pin bundle per misure di scambio termico e perdite di carico in regime di convezione mista o circolazione naturale, che caratterizzano il comportamento del nocciolo LFR in condizioni di transitori incidentali. Il pin bundle sarà installato sulla facility a metallo liquido NACIE, su cui sono stati già avviati gli interventi di upgrade.

Tra le attività concernenti il supporto ai sistemi SFR “Sodium cooled Fast Reactor”, si è supportata la realizzazione di un sistema di dissipazione del calore di decadimento degli elementi di combustibile esauriti, che propone l’inserimento di un circuito intermedio a sali fusi. Si è quindi effettuata la progettazione termo-fluidodinamica e meccanica di una sezione di prova rappresentante uno dei tubi alettati proposti per lo smaltimento passivo del calore della piscina di decadimento.

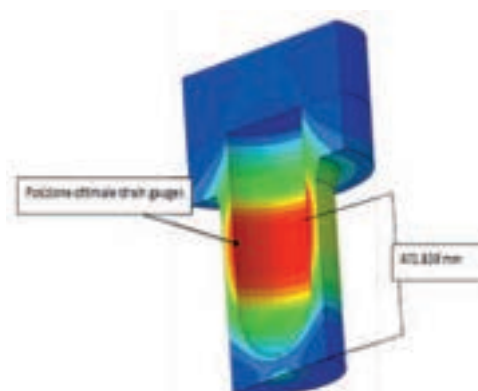
Sempre in supporto ai sistemi SFR, si è proceduto allo studio di fattibilità di un piccolo impianto a sodio, avendo come obiettivo primario l’esecuzione di test di shock termici.



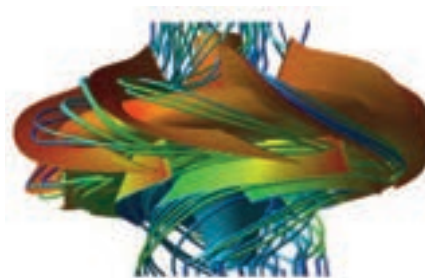
Reattore LFR, ELSY



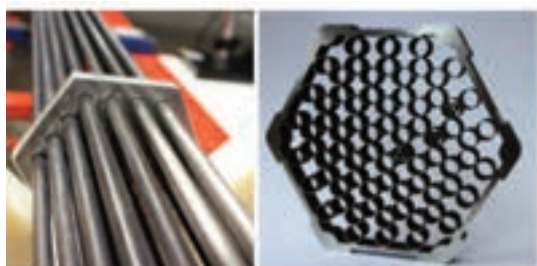
Tubo a baionetta a doppia parete per GV



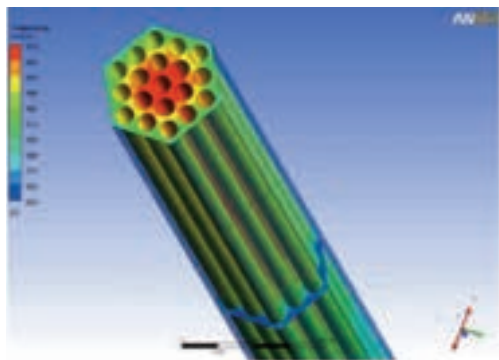
Calcolo della posizione ottimale per l’installazione degli estensimetri nel vessel di LIFUS-5



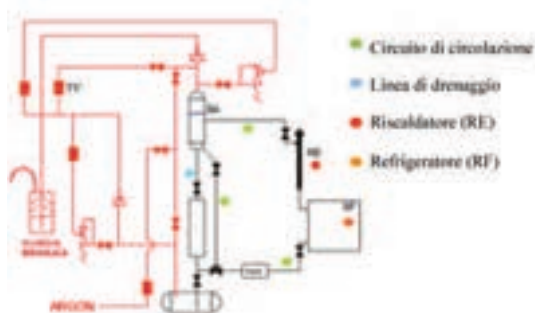
Analisi fluidodinamica della palettatura della pompa centrifuga per l’impianto HELENA operante in piombo fluente



*Fuel Pin Bundle impianto CIRCE-ICE e spacer grid modificata per installazione della strumentazione*



*NACIE pin bundle, refrigerato a metallo liquido pesante in circolazione naturale (0.1 m/s)*



*Schema impianto a sodio per studio di shock termici*



*Macchina per test di trazione su provini ad elevata temperatura*

### **Sviluppo di materiali innovativi**

Sono state realizzate specifiche attività sperimentali per la caratterizzazione e la qualifica dei materiali strutturali, anche mediante l'acquisizione di nuove attrezzature di laboratorio e la certificazione di quelle già esistenti. Tra le varie attività implementate vi è l'effettuazione di test su campioni non irraggiati con lo scopo di definire un database di confronto per la caratterizzazione degli effetti da danneggiamento neutronico sulle proprietà termo-meccaniche dei materiali strutturali. I test di riferimento sotto irraggiamento e in piombo sono in fase di realizzazione nell'ambito dell'esperimento LEXURII.

Tra gli studi avviati sui materiali strutturali si è implementata anche una attività concernente lo sviluppo di materiali ceramici compositi. L'attività di ricerca ha riguardato lo sviluppo di processi di fabbricazione per la messa a punto di diverse tipologie di composito a matrice ceramica a fibra lunga per la realizzazione di componenti nucleari. In collaborazione con FN SpA, che dispone di un impianto per CVI "Chemical Vapour Infiltration", e di un forno per PIP "Polymer Infiltration Pyrolysis", si sono realizzati pannelli in composito a matrice ceramica.

Dai pannelli realizzati sono stati ottenuti dei provini per la successiva caratterizzazione fisico-meccanica.

Per la caratterizzazione di materiali e componenti si è implementata inoltre una tecnica basata sulle misure di diffusione neutronica ai piccoli angoli (SANS: small-angle neutron scattering). Applicata agli acciai strutturali, permette di valutarne la resistenza negli impianti e migliorarne le prestazioni.

Infine, si è prodotta una trattazione dei vari criteri di danno tipici di reattori nucleari e dei modelli costitutivi. Si sono inoltre prodotte simulazioni agli elementi finiti (CAST3M) del comportamento strutturale di alcuni componenti (vessel). Le analisi condotte in campo non lineare mostrano un comportamento del tutto diverso a seconda degli acciai modellati (ad es. ratcheting per componenti in AISI 316).

### **Tecnologie chimiche**

L'attività consiste nell'implementazione di tecnologie chimiche in supporto allo sviluppo dei sistemi nucleari innovativi. Si è in prodotta una revisione per le procedure e metodiche di cleaning per strutture operanti in metallo liquido con la relativa gestione dei residui liquidi e solidi derivanti.

In supporto ai sistemi SFR, grande importanza assumono gli studi sulla permeazione del trizio. Il trizio diffonde attraverso i materiali strutturali alle temperature operative e conseguentemente può essere rilasciato in ambiente. Al fine di studiare ed analizzare possibili accorgimenti necessari per ridurre l'entità dei rilasci di tri-

zio in ambiente è stato sviluppato un codice di calcolo in linguaggio MATLAB (SFR-TPC), il quale viene utilizzato per valutare i rilasci di trizio in ambiente.

### Sviluppo e validazione di modelli avanzati per la progettazione di reattori di IV generazione

L'attività si è incentrata sullo sviluppo e l'implementazione di modelli fisici e modelli numerici, con lo scopo di qualificare e caratterizzare i codici di calcolo. Per quanto riguarda le analisi di sistema, si è sviluppato e validato il codice di sistema CATHARE modificato per il trattamento dei metalli liquidi pesanti, attraverso il confronto con dati sperimentali disponibili. In parallelo si è proceduto allo sviluppo del codice FEM-LCORE per lo studio della termoidraulica 3D di sistemi a metallo liquido. Nel codice sono stati implementati nuovi modelli di turbolenza, e condotte alcune tipiche simulazioni (flow-blockage) ottenendo ottimi risultati.

Relativamente alle attività di neutronica e cinetica del nocciolo, si è elaborato un modello di DEMO che ha considerato l'accoppiamento tra la parte neutronica e quella termoidraulica, per descrivere adeguatamente il comportamento della dinamica di nocciolo.

Relativamente alla neutronica è proseguita l'attività di sviluppo e validazione del modulo ERANOS/KIN3D, appositamente sviluppato per l'analisi di cinetica neutronica di sistemi critici veloci. KIN3D è stato testato valutando il livello di reattività nei sistemi GODIVA (reattore veloce sperimentale presso LANL-USA) e GUINEVERE (facility a potenza zero presso SCK•CEN, Belgio). I risultati ottenuti indicano l'affidabilità del codice per la simulazione dei transitori di sorgente prescelti.

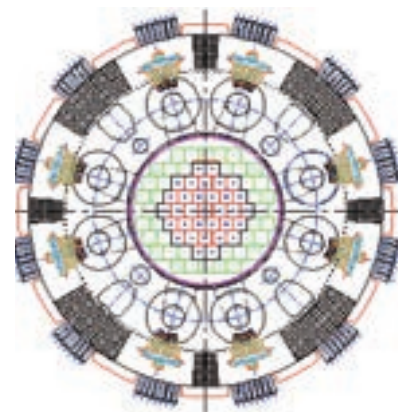
È stata inoltre sviluppata una metodologia per l'analisi delle quantità integrali misurate nelle esperienze di benchmark e della relativa correlazione con quelle relative al reattore di riferimento, mediante il calcolo di opportuni coefficienti di sensitività.

Per quanto riguarda la concettualizzazione del nocciolo del DEMO, l'attività ha riguardato la revisione critica della configurazione esistente. È stato ricontestualizzato l'obiettivo di dimostrazione tralasciando l'obiettivo di elevata fluenza neutronica. Questa semplificazione permette di alleggerire i criteri di progetto di DEMO privilegiando la circolazione naturale e progettando quindi un reattore capace di rispondere in modo autonomo ed efficiente a qualsivoglia condizione incidentale (post-Fukushima).

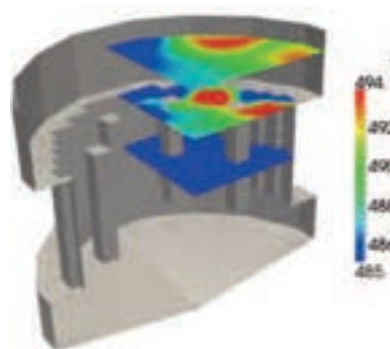
Parallelamente è stato sviluppato e validato un simulatore per l'analisi della dinamica del sistema, che com-

prenda, oltre al nocciolo, anche il generatore di vapore, la pompa primaria e la piscina del reattore.

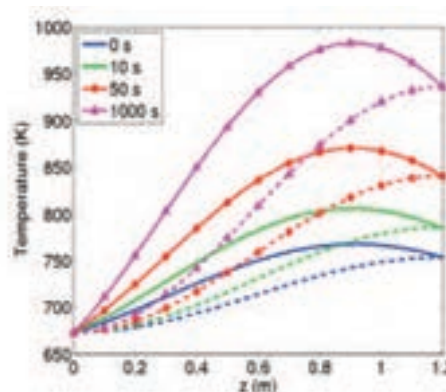
Infine per quanto riguarda la validazione del codice di sistema RELAP5 quando applicato ai sistemi a gas, si è proceduto all'implementazione dell'impianto sperimentale HEFUS-3, permettendo di ottenere portate di elio fino a 1000 g/s e 70 bar, e una migliore mappatura dei parametri fisici. Si sono quindi simulati casi di arresto del sistema di circolazione e la perdita totale della portata dell'elio a causa della rottura di un componente. I risultati sperimentali sono stati utilizzati per l'implementazione del modello di calcolo ai fini di ampliare il database di validazione del codice di calcolo.



Sezione mediana del DEMO-LFR



Modellazione del nocciolo LFR mediante il codice FEM-LCORE e profilo di temperatura in un elemento di combustibile (flow-blockage)



Distribuzione assiale delle T di combustibile e piombo a seguito di una inserzione di reattività di 100 pcm

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

**Progetto 1.3, Linea progettuale 3:** Reattori di quarta generazione

**Referente:** P. Meloni, [paride.meloni@enea.it](mailto:paride.meloni@enea.it)

M. Tarantino, [mariano.tarantino@enea.it](mailto:mariano.tarantino@enea.it)