



## Collaborazione ai Programmi Internazionali per il Nucleare di IV Generazione

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

Nell'ambito dell'iniziativa europea ESNII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative, SET-PLAN), si è rilanciato in Europa lo sviluppo tecnologico di sistemi nucleari veloci di quarta generazione. Tra questi, particolare interesse rivestono i sistemi refrigerati a sodio (SFR – ASTRID) o a metallo liquido pesante (LFR – ALFRED, ADS – MYRRHA), in fase di progettazione avanzata. I sistemi nucleari di quarta generazione devono rispondere ai seguenti requisiti:

- sostenibilità, ovvero massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi;
- economicità, ovvero basso costo del ciclo di vita dell'impianto e livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici;
- sicurezza e affidabilità, bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore e ampia tolleranza anche a gravi errori umani, escludendo qualsivoglia scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito;
- resistenza alla proliferazione e protezione fisica tali da rendere non conveniente il furto o la produzione non dichiarata di materiale nucleare o l'uso illecito della tecnologia e da assicurare un'aumentata protezione contro attacchi terroristici.

In tale contesto, l'impegno italiano è focalizzato ai sistemi LFR – Lead cooled Fast Reactor (anche del tipo SMR – Small Modular Reactor) nella configurazione a piscina integrata, poiché potenzialmente soddisfano tutti i requisiti introdotti per i sistemi nucleari di quarta generazione. L'uso di un refrigerante chimicamente compatibile con aria e acqua, con ottime proprietà intrinseche di schermaggio delle ra-

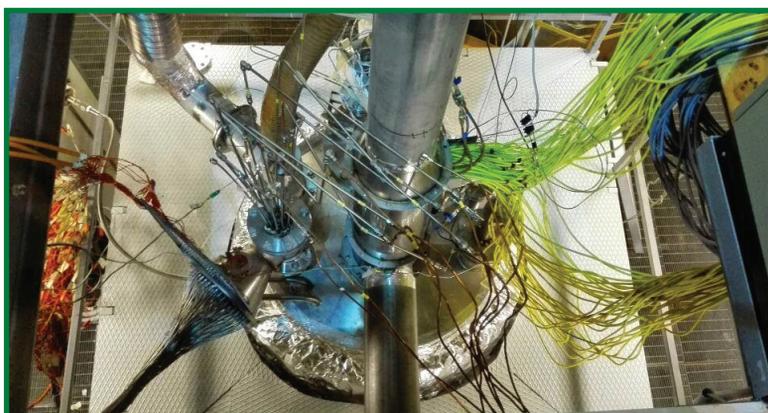
diazioni e di ritenzione dei prodotti di fissione tipicamente responsabili della contaminazione ambientale in caso di incidente severo, e operante a bassa pressione, permette di aumentare sensibilmente la protezione fisica della popolazione residente nelle zone limitrofe alla installazione nucleare, riducendo

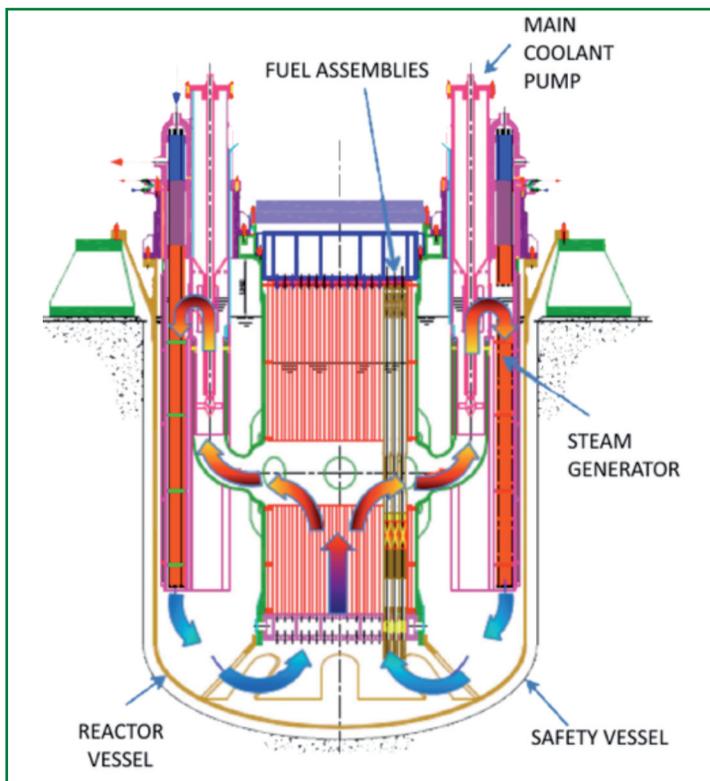
inoltre la necessità di robusti e complessi sistemi di protezione contro eventi catastrofici (anche terroristici).

### OBIETTIVI

Le attività di ricerca sono focalizzate sulla tecnologia dei reattori a piombo sia in

una prospettiva futura di sviluppo del nucleare, sia per l'interesse e le competenze espresse dall'industria Italiana. L'obiettivo principale è quindi il supporto alle attività di ricerca e sviluppo finalizzate alla costruzione del reattore dimostrativo a piombo, di concezione ENEA-ANSALDO, denominato ALFRED. Sono state individuate tre macro aree di intervento, tutte afferenti allo sviluppo dei reattori di IV generazione e dei sistemi SMR refrigerati a piombo, che rappresentano altrettanti ambiti di criticità per ALFRED. La prima macro area di intervento è denominata "progettazione di sistema e analisi di sicurezza". Il progetto di un sistema LFR di grande o di piccola taglia (ALFRED, SMR-Lead), deve rispondere ai tre requisiti fondamentali di sicurezza, sostenibilità ed economicità per essere accettato e attuato. La seconda macro area ricade nell'area dei materiali e studi di fabbricazioni, ed è principalmente dedicata a esplorare l'applicabilità di differenti tecnologie di protezione dei materiali strutturali quando proposti per la realizzazione di guaine di combustibile per reattori refrigerati a piombo. La terza macro





*Sezione del vessel del reattore ALFRED con indicazione dei componenti principali*

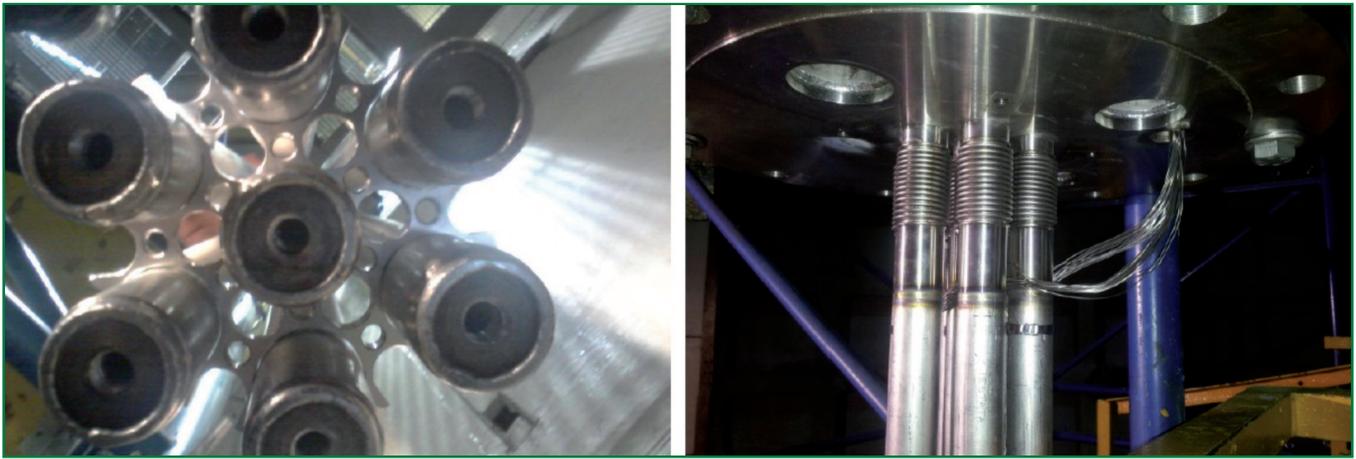
area, afferente alla termoidraulica del refrigerante, ha carattere teorico-sperimentale e viene condotta con gli impianti di prova (NACIE, CIRCE, HELENA, LECOR) del centro Brasimone. Le attività si articolano su: preparazione delle esperienze, conduzione delle prove, analisi numerica dei risultati, messa a punto dei metodi di calcolo. In sintesi gli obiettivi proposti sono:

- qualifica e caratterizzazione sperimentale di componenti critici e strumentazione prototipica; realizzazione di campagne sperimentali per la validazione di modellistica e codici di calcolo;
- sviluppo e validazione di codici di calcolo per l'analisi termo-fluidodinamica; progettazione di dettaglio del nocciolo del dimostratore; studi di dinamica spaziale; progettazione del sistema primario e dei sistemi di rimozione del calore;
- caratterizzazione di acciai e rivestimenti strutturali in condizioni di irraggiamento e corrosione da piombo;
- implementazione di infrastrutture di ricerca (HELENA), e aggiornamento di infrastrutture esistenti (CIRCE, NACIE, LECOR); implementazione del laboratorio di termoidraulica dei metalli liquidi per la completa caratterizzazione dei refrigeranti per sistemi nucleari veloci;
- studi e sperimentazione in supporto alla progettazione del combustibile nucleare per reattori veloci, interazione refrigerante-combustibile-camicia.

## **RISULTATI**

### **Progettazione di sistema e analisi di sicurezza**

Relativamente alla progettazione del nocciolo LFR e all'utilizzo del reattore TAPIRO in supporto a ciò, nella precedente annualità si è provveduto allo sviluppo e la validazione del modello Monte Carlo dettagliato del reattore TAPIRO. Il modello è stato utilizzato come strumento di progettazione di esperienze in supporto alle attività Generation IV sui Reattori Veloci a Piombo. Si è quindi provveduto alla progettazione di una facility per misure di trasporto neutronico in Piombo nel reattore TAPIRO. È stata eseguita la validazione della metodologia di calcolo perturbativo GPT implementata nel codice ERANOS attraverso il confronto con i risultati ottenuti con metodi diretti, è stata iniziata un'attività avente come scopo la validazione e integrazione di una procedura di calcolo già esistente (modulo MECCYCO) per calcoli perturbativi lineari nel campo dei nuclidi e, successivamente, la implementazione delle procedure di calcolo per calcoli perturbativi nel campo non-lineare neutroni/nuclidi. Relativamente alla progettazione del nocciolo del DEMO LFR, scopo del lavoro è stata l'individuazione e l'analisi di possibili soluzioni alle criticità dell'attuale progetto di nocciolo, così come evidenziate da una preliminare revisione critica del progetto stesso, per compilare una lista di opzioni e raccomandazioni che servano all'impostazione di una nuova fase di progettazione del nocciolo di tale reattore. Relativamente agli studi preliminari di tecniche di monitoraggio del nocciolo di ALFRED è stato effettuato uno studio preliminare di tecniche di monitoraggio del nocciolo volto alla valutazione della possibilità di inserire rivelatori neutronici all'interno del vessel di ALFRED, in prossimità del nocciolo, col duplice scopo di monitorare il livello integrale di flusso neutronico quando il reattore opera in regime di potenza, dando così un segnale ridondante a quello del sistema tradizionale di rivelatori posti ex-vessel, tipicamente impiegato nei reattori veloci; mappare la distribuzione spaziale del flusso neutronico, per rivelare prontamente possibili distorsioni di questo, dunque comandare – ove necessario – l'intervento del sistema di protezione del reattore prima che siano superati i limiti di sicurezza del nocciolo. Sono stati approfonditi gli studi sul rilascio e migrazione dei prodotti di fissione allo scopo di effettuare una stima di grandezze termodinamiche non note ma necessarie per effettuare una prima valutazione della composizione del sistema combustibile-refrigerante all'equilibrio termodinamico



*Viste di dettaglio delle sezioni di prova di HERO*

mediante un codice basato sulla minimizzazione dell'energia libera di Gibbs. A tale scopo sono stati utilizzati due diversi approcci: quello basato sui metodi semi-empirici è risultato di più diretta applicazione, mentre quello basato sul metodo DFT (Density Functional Theory) ha consentito di ottenere risultati, finora, solo in fase gas.

### **Materiali e fabbricazioni**

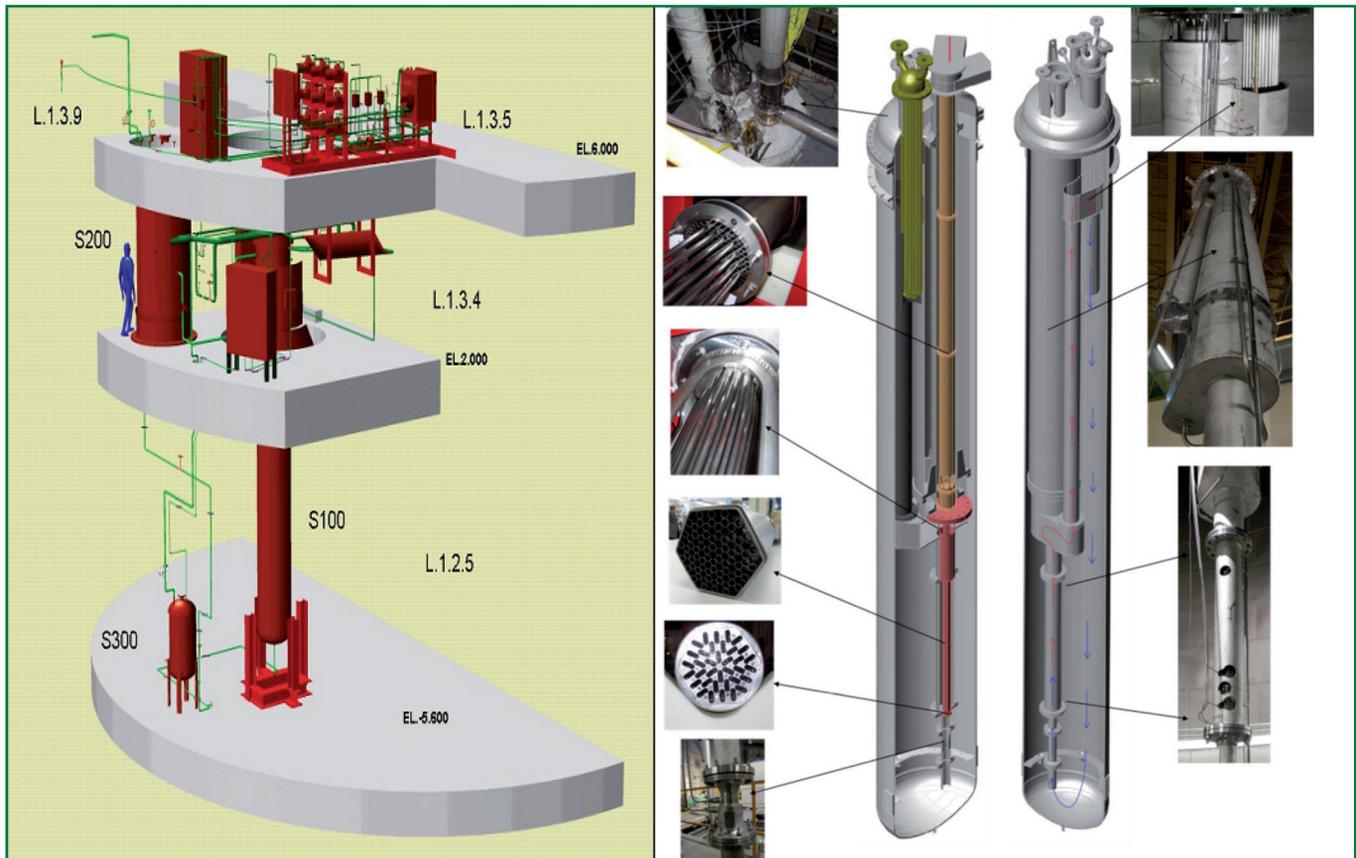
Nel PAR2013 sono stati qualificati i rivestimenti messi a punto nelle annualità precedenti attraverso caratterizzazioni meccaniche, prove di ciclaggio termico, prove di diffusione isoterma e prove di irraggiamento. Riguardo agli acciai strutturali per applicazioni nucleari, grande interesse assumono gli acciai doppio stabilizzati (Ti, Nb) che hanno dimostrato grande stabilità al rigonfiamento e alla deformazione anelastica. Sono state effettuate prove di corrosione in piombo stagnate, sono stati in primo luogo esaminati al microscopio SEM diversi campioni di acciai ricoperti con tecnica PVD. I ricoprimenti (TiN, FeAl e FeCrAl) sono stati realizzati dal CSM (Centro Sviluppo Materiali, Roma). I substrati ricoperti sono gli acciai 15-15Ti(Si), AISI316L e T91. L'analisi è stata effettuata per valutare la qualità del ricoprimento prima di effettuare prove di corrosione in piombo liquido. In secondo luogo, due campioni di acciaio austenitico 15-15Ti(Si) nudo e due campioni di 15-15Ti(Si) ricoperto con TiN sono stati esposti in piombo liquido in condizioni di alto ossigeno disciolto alla temperatura di 550 °C e per 2000 ore, analizzando la composizione della matrice metallica. La scelta di utilizzare gli acciai ricoperti con TiN è dovuta al fatto che, fra tutti i ricoprimenti prodotti mediante PVD, il TiN è risultato essere il più omogeneo e compatto dall'osservazione al SEM.

### **Termoidraulica del refrigerante**

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, si è progettato e realizzato uno scambiatore di calore prototipo con tubi a baionetta a doppia parete (HERO - Heavy liquid mEtal - pReSSurized water cOoled tube) da installare nella facility CIRCE presso il CR Brasimone. La sezione di prova è stata montata su CIRCE ed è concepita per essere uno strumento di supporto allo sviluppo del generatore di vapore di ALFRED e alla validazione di codici principalmente di tipo termoidraulica di sistema grazie ad una accurata selezione della strumentazione.

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termofluidodinamica si è inoltre avviato un filone di ricerca sull'investigazione analitico - sperimentale dell'interazione metallo liquido acqua in supporto alla caratterizzazione di generatori di vapore per sistemi LFR, in sinergia con progetti europei quali LEADER e MAXSIMA del VII Programma Quadro Euratom, a cui l'ENEA partecipa attivamente. L'attività consiste nella progettazione delle prove sperimentali di interazione su larga scala tra leghe di piombo e acqua in pressione (fino a 16 bar), anche mediante modifiche e aggiornamenti dell'impianto CIRCE dell'ENEA Brasimone e una definizione delle condizioni operative e prevede anche l'esecuzione di simulazioni di pre- e post-test con codici in grado di simulare dinamiche multi-fluido e multifase a più campi di velocità.

La metodologia di calcolo accoppiata tra codici di sistema - codici CFD (in particolare tra RELAP5 e Ansys Fluent) sviluppata nell'ambito dell'accordo di programma, è stata utilizzata per la simulazione di un test sperimentale in circolazione naturale eseguito sull'apparecchiatura sperimentale NACIE. La simulazione effettuata riproduce il transitorio descritto sia



*Impianto CIRCE con viste di dettaglio*

mediante l'uso del codice di sistema RELAP5 sia mediante l'applicazione della metodologia di calcolo accoppiata RELAP5/Fluent. I risultati ottenuti sia dal calcolo RELAP che dal calcolo accoppiato sono stati confrontati con i risultati sperimentali mostrando un buon accordo con differenze inferiori al 2% riguardo alle temperature in ingresso e in uscita dello scambiatore di calore (HX) e in ingresso e uscita della sezione scaldante (FPS).



*Griglia spaziatrice dell'elemento di combustibile del sistema*

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente*

*Progetto B.3.1 – L.P.2: Collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione*

*Referente: M. Tarantino, mariano.tarantino@enea.it*