



Collaborazione ai Programmi Internazionali per il Nucleare di IV Generazione

SCENARIO DI RIFERIMENTO

A seguito dell'incidente di Fukushima del 2011 e del referendum abrogativo su costruzione ed esercizio di centrali elettronucleari in Italia, sono state abbandonate le attività di ricerca per lo sviluppo di reattori nucleari fino alla generazione III+.

La ricerca è stata quindi incentrata esclusivamente sui reattori nucleari di IV generazione a spettro neutronico veloce poiché ad elevata sicurezza ed affidabilità, massimo utilizzo del potenziale energetico del combustibile e controllata gestione dei rifiuti radioattivi.

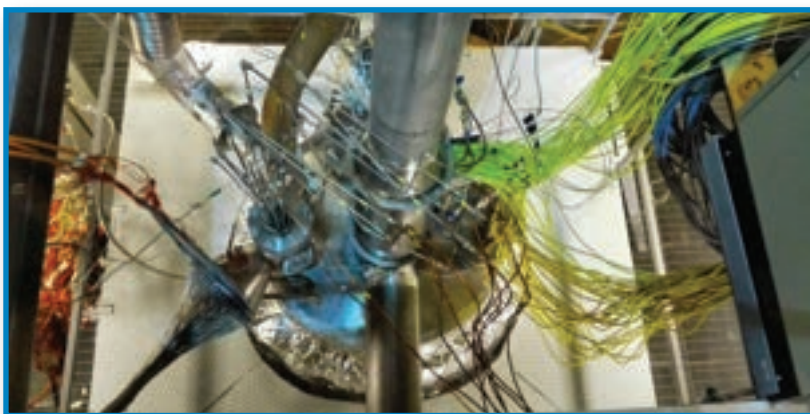
In particolare le attività hanno riguardato lo sviluppo e implementazione dei sistemi nucleari veloci refrigerati a piombo, **Lead cooled Fast Reactor (LFR)** e **Small Modular Reactor (SMR)**, su cui l'Italia detiene una posizione di leadership progettuale e tecnologica in Europa, attività che sono inquadrare nelle iniziative internazionali come la **Generation IV International Forum (GIF)** ed europee quali la **Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP)** e la **European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII)** alle quali il nostro Paese ha aderito.

In questo contesto, sia ENEA sia il sistema industriale italiano (es. Ansaldo Nucleare) e le Università (CIRTEN), sono focalizzati sullo sviluppo concettuale, sulla progettazione di dettaglio, e sulla ricerca tecnologica del DEMO-LFR ALFRED "Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator".

Le attività di R&S implementate, oltre che inserite in un più ampio contesto di iniziative europee (SNETP, ESNII, ESFRI, EERA), trovano continuità nei gruppi

di lavoro internazionali (IAEA, OECD-NEA, ESS) e negli accordi bilaterali che ENEA ha stipulato a livello internazionale (CEA - Francia; CASHIPS - Cina; SNU - Corea del Sud).

OBIETTIVI



Le attività di R&S sui sistemi nucleari di quarta generazione si sono focalizzate sui reattori veloci refrigerati a piombo - **Lead Cooled Fast Reactor (LFR)** - che riscuotono interesse in Europa e da parte dell'industria nazionale.

Nell'ambito del SET-PLAN, all'interno del quale si sviluppa l'Iniziativa Industriale Europea per il Nucleare Sostenibile (ESNII), e a cui partecipano Ansaldo Nucleare, ENEA e CIRTEN, è stato promosso il progetto relativo al DEMO LFR - ALFRED.

Facendo leva sulla progettualità acquisita dall'industria italiana, sul know-how e sulle infrastrutture di ricerca disponibili presso ENEA, sulla capacità multidisciplinare del CIRTEN, il progetto del DEMO ALFRED è stato ulteriormente sviluppato, è stato individuato il sito per la costruzione in Romania, ed è stato pianificato l'accesso ai fondi infrastrutturali europei per la fase di progettazione finale, ricerca e sviluppo nonché per la fase successiva di costruzione ed esercizio del DEMO ALFRED.

Le principali attività di ricerca e sviluppo implementate in supporto al reattore ALFRED, sono state quindi focalizzate sui i seguenti temi principali. **Progettazione di sistema e Analisi di Sicurezza.** Sviluppo e validazione di codici di calcolo per

l'analisi di sicurezza; supporto alla progettazione e analisi di sicurezza del combustibile nucleare; progettazione di dettaglio del nocciolo del dimostratore; studi di dinamica spaziale.

Qualifica Materiali strutturali e studi di fabbricazione. Caratterizzazione acciai e rivestimenti strutturali in condizioni di irraggiamento e corrosione da piombo.

Sviluppo Componenti e Sistemi Innovativi. Mediante l'ulteriore implementazione delle infrastrutture di ricerca presso ENEA, si è provveduto allo sviluppo e qualifica di componenti e sistemi innovativi rilevanti per lo sviluppo del reattore ALFRED.

Gli obiettivi di ricerca e sviluppo si pongono come obiettivo di medio termine quello di favorire il sistema di ricerca nucleare italiano per lo sviluppo di reattori di IV generazione (LFR) e SMR con relativo ciclo del combustibile, in termini di competenze, infrastrutture di ricerca, laboratori, processi di qualificazione, know-how.

Nel lungo termine si vogliono sfruttare le competenze e le infrastrutture di ricerca così sviluppate per partecipare alla progettazione, realizzazione ed operazione di un prototipo dimostrativo del reattore refrigerato a piombo e di sistemi nucleari di quarta generazione a ciclo chiuso in ambito ESNII e GIF.

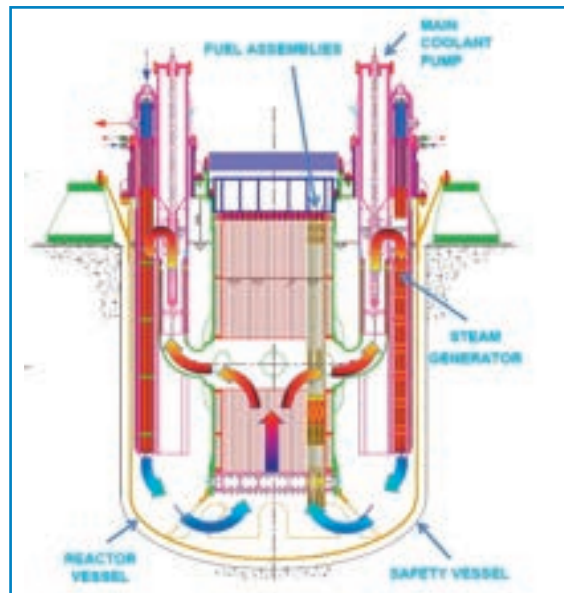
RISULTATI

Progettazione di sistema e analisi di sicurezza

I sistemi Gen. IV richiedono lo sviluppo di un ciclo del combustibile innovativo che contempli il bruciamento di attinidi minori. A tale scopo si sono avviati studi per il reperimento di dati nucleari accurati mediante esperienze in reattori di ricerca, finalizzate all'inferenza delle sezioni d'urto di attinidi minori. In questo contesto, e con il supporto della NEA, è stata avviata una collaborazione tra ENEA e CEA per lo studio di fattibilità di una campagna di irraggiamenti presso il reattore di ricerca RSV-TAPIRO, che si propone di produrre dati nucleari per spettro veloce.

Relativamente alla progettazione del nocciolo, dopo l'analisi critica della configurazione di ALFRED, si è pervenuti ad un nuovo arrangiamento in cui sono state corrette le criticità emerse. L'ultimo passo, necessario ad una configurazione di riferimento, consiste nella caratterizzazione neutronica della stessa.

Per quanto attiene all'analisi di sicurezza dei sistemi LFR, l'attività svolta ha previsto una revisione critica

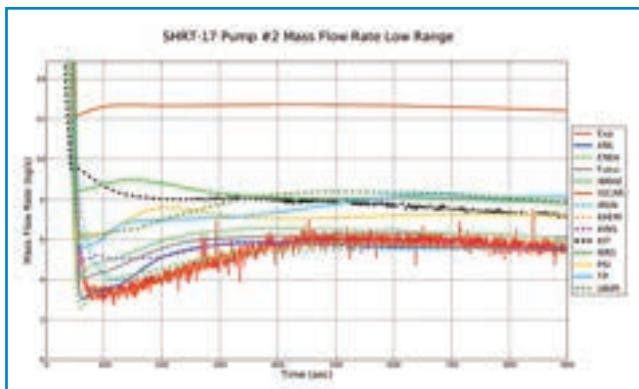
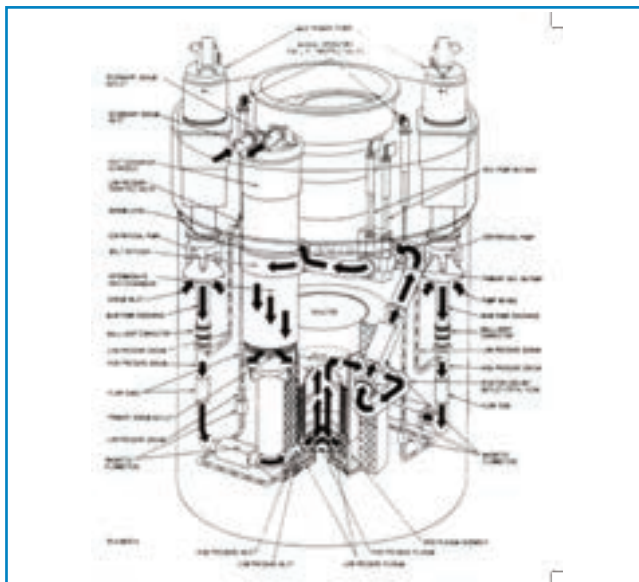


Sezione del sistema primario del reattore ALFRED



Reattore RSV-TAPIRO
(Centro Ricerche ENEA Casaccia)

e di aggiornamento di alcuni modelli fenomenologici del combustibile, in particolare la ridistribuzione del plutonio e il rilascio dei gas di fissione in condizioni di transitori di potenza (*burst release*). Per quanto riguarda la modellazione e l'analisi termo-meccanica delle barrette di combustibile, è stata effettuata un'analisi di performance delle barrette del reattore di riferimento, verificando il rispetto dei limiti di design preliminari ed eventuali criticità. I risultati di questo lavoro offrono indicazioni utili al progetto del reattore di riferimento e, in generale, al miglioramento della sicurezza intrinseca dei reattori a piombo. Per quanto riguarda lo sviluppo e validazione di un approccio e di modelli per la analisi di sicurezza dei reattori veloci di IV generazione, l'attività tecnica è stata *multi-physics* e *multi-scale* e ha tratto beneficio dalla disponibilità dei dati sperimentali misurati nel reattore EBR-II durante l'esecuzione dei test sperimentali.



Schema del reattore EBR-II e confronto fra dati sperimentali e analisi numeriche

L'attività ha richiesto uno sforzo sinergico di differenti competenze tecniche, dalla fisica del reattore, alla termoidraulica di sistema, alla fluidodinamica computazionale. Tutta l'attività svolta è stata presentata al "Third Research Coordination Meeting of the IAEA Coordinated Research Project on benchmark analyses of an EBR-II shutdown heat removal test", organizzato da ENEA e tenutosi a Bologna dal 23 al 27 marzo 2015.

Qualifica materiali strutturali e studi di fabbricazione

Il piombo e la lega eutettica piombo-bismuto ad alta temperatura sono molto corrosivi per gli acciai. Una tecnica per la protezione della corrosione per gli acciai inossidabili adottata si basa sul controllo dell'ossigeno disciolto nel metallo fuso: mantenendo la concentrazione di ossigeno intorno ad una certa soglia si mantiene uno strato di ossido superficiale di ferro e cromo che limita a valori trascurabili i tassi di dissoluzione dei componenti dell'acciaio. Il controllo della concentrazione dell'ossigeno

disciolto per la protezione dalla corrosione è però di difficile applicazione a reattori di potenza. L'attività sperimentale volta allo sviluppo di ricoperture per la protezione dei materiali strutturali da metallo liquido pesante, iniziata nei precedenti PAR, si è ora concentrata su due linee di attività, la prima su rivestimenti passivanti basati su leghe Fe-Cr-Al, la seconda su rivestimenti multistrato costituiti da un deposito intermedio di buffer basato su leghe FeCrAl e FeCrAlY e da un rivestimento esterno di Al_2O_3 .

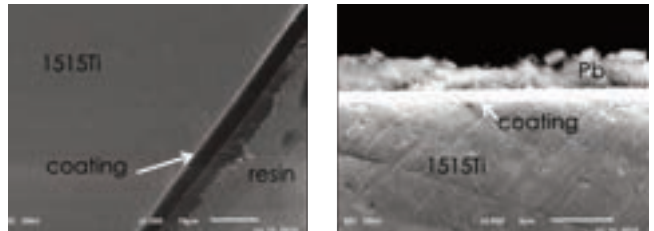


Foto al SEM di campioni ricoperti di allumina (senza buffer intermedio) mediante tecnica "Pulsed Laser Deposition" (IIT@POLIMI), esposti in piombo ad elevata temperatura. Non sono presenti fenomeni corrosivi

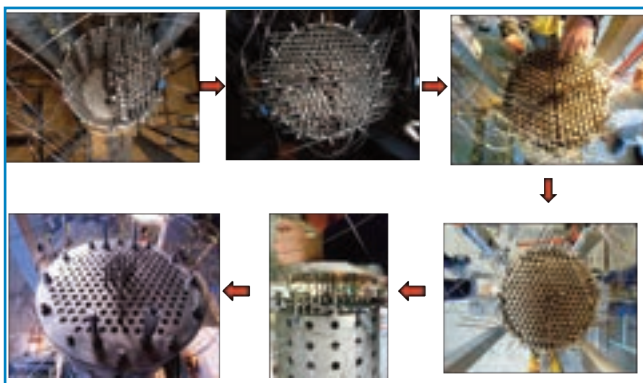
Presso il laboratorio di chimica del piombo del Centro Ricerche ENEA Brasimone si studia la corrosione in piombo statico di acciai di riferimento per sistemi LFR (austenitici 15-15Ti e 316L e ferritico/martensitico T91) e ricoprimenti di interesse (TiN, Ta e quelli a base di Al). Per il rivestimento in allumina realizzato mediante PLD sono state condotte due prove in piombo a 550 °C con basso ossigeno e per 1000 ore: la prima riguardante un mono-layer di PLD- Al_2O_3 (spessore 1 μm) e la seconda riguardante un double-layer con strato interno di FeCrSi (buffer layer, ottenuto con RF sputtering e spessore 0,4 μm) e strato esterno di PLD- Al_2O_3 (spessore 1 μm). Le prove non hanno mostrato fenomeni di corrosione o degradazione del rivestimento. Il rivestimento mono-layer di PLD- Al_2O_3 ha indicato inoltre scarsa bagnabilità da parte del piombo.

Sviluppo componenti e sistemi innovativi

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti presso il Centro Ricerche ENEA del Brasimone, si è proseguito con le attività di caratterizzazione del Generatore di Vapore (GV) del DEMO-LFR. Il lavoro svolto nella prima parte ha avuto lo scopo di sviluppare un modello RELAP5-3D della facility sperimentale CIRCE in cui è stata installata la sezione di prova HERO. Successivamente è stato avviato il

commissioning dell'impianto di prova HERO-CIRCE, mediante la realizzazione del circuito secondario ad acqua in pressione a 180 bar, con prove di circolazione in regime isoterma.

Relativamente alla sperimentazione termoidraulica a supporto dell'analisi di sicurezza, si è affrontato uno dei principali problemi di sicurezza del progetto di reattore nucleare refrigerato a metallo liquido, che consiste nella rottura dei tubi del generatore di vapore. Un altro aspetto rilevante è il fatto che tale evento potrebbe avere un impatto sul sistema di controllo della chimica del refrigerante primario, compromettendone l'affidabilità ed il buon funzionamento. Si è quindi progettata e predisposta l'implementazione di una nuova sezione di prova da installare sull'impianto LIFUS-5 del Brasimone per testare un sistema capace di identificare in tempo reale la presenza di una piccola rottura nel tubo del generatore di vapore.



Assemblaggio Sezione di Prova Impianto LIFUS-5

Relativamente al supporto numerico per la progettazione dei sistemi LFR, si è provveduto allo sviluppo e alla qualifica della tecnica di accoppiamento tra un codice di CFD e un codice termoidraulico di sistema.

Sono state effettuate simulazioni accoppiate con il codice di sistema RELAP5 utilizzando la metodologia "two way", già utilizzata per la simulazione di prove sperimentali eseguite sull'apparecchiatura NACIE (presso il Centro ENEA Brasimone). I risultati ottenuti del sistema accoppiato e del modello RELAP5 stand-alone mostrano un ottimo accordo con i dati sperimentali.

Per quanto attiene all'accoppiamento del codice di calcolo CATHARE e il codice di fluidodinamica computazionale FEM-LCORE tramite la piattaforma SALOME, sono stati eseguiti test di accoppiamento. Relativamente alla validazione del codice CATHARE2, e dato l'interesse verso i sistemi nucleari innovativi raffreddati a metallo liquido, è stata aperta una scheda di collaborazione tra ENEA e CEA che ha riguardato la modifica del codice termoidraulico di sistema CATHARE per simulare reattori raffreddati a metallo liquido pesante. In questo contesto ha avuto inizio l'attività di verifica e validazione del codice modificato attraverso il confronto con dati sperimentali provenienti dalla facility sudcoreana HELIOS, forniti all'interno del benchmark internazionale LACANES, in cui ENEA partecipa con il codice RELAP5, e dalla facility NACIE (ENEA Brasimone). Durante queste attività, CATHARE ha dimostrato buone capacità di simulazione sia in convezione forzata sia naturale.

Per quanto concerne le infrastrutture di ricerca ENEA, presso il Centro Ricerche Brasimone si è provveduto all'upgrade dell'impianto HELENA, permettendo l'uso continuativo senza interruzioni per il reintegro del livello di piombo dalla tenuta rotante della pompa di circolazione.

Relativamente all'impianto a metallo liquido pesante NACIE-UP, progettato con lo scopo di realizzare una "multipurpose facility" che possa supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo-bismuto fluente, si è provveduto ad un upgrade dell'esistente impianto NACIE, di cui rimane integro il vaso di espansione e tubazioni collegate, ed il circuito ausiliario a gas.

Infine, è stata realizzata la facility a metallo liquido pesante SOLIDX (SOLIDification eXperiment), con lo scopo di supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo fluente, investigando il fenomeno del congelamento del metallo liquido. La facility utilizza direttamente il piombo come fluido, lavorando quindi a temperature elevate a cavallo dei 330 °C (temperatura di congelamento).

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

Progetto B.3.1 – L.P.1: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

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