



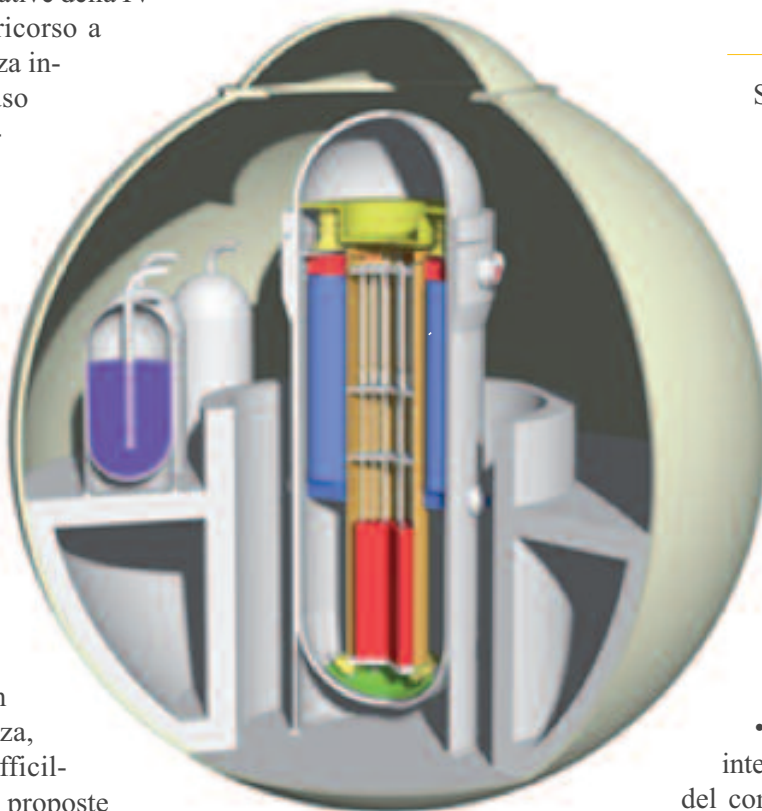
## Nucleare da fissione Reattori evolutivi

### Scenario di riferimento

La classe dei “reattori evolutivi” ha l’obiettivo di garantire la competitività economica e l’affidabilità dell’energia nucleare da fissione con requisiti di sicurezza superiori rispetto ai reattori attualmente in esercizio. I progetti evolutivi sono quindi generalmente basati sulla ben conosciuta tecnologia dei reattori ad acqua (WCR) che rende attuabile la loro implementazione nel medio termine, così da configurarsi come un ponte verso le tecnologie innovative della IV Generazione (LFR). Il ricorso a caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva, diffuso in questa classe di impianti, trova la massima espressione nei reattori di piccola o media taglia di tipo modulare, internazionalmente definiti con l’acronimo SMRs (Small Medium Reactors). In questi reattori la compattezza del contenimento, l’elevato rapporto acqua disponibile/potenza, l’utilizzo della circolazione naturale in condizioni di emergenza, caratteristiche che difficilmente potrebbero essere proposte per taglie superiori, permettono un completo approccio “by design” alla sicurezza.

Inoltre, modularità e ridotti tempi di costruzione, semplificazione del progetto, ottimizzazione dei processi di fabbricazione e ridotto rischio di investimento li hanno resi interessanti, pur con la penalizzazione dovuta all’economia di scala, sia per operatori elettrici di limitata dimensione, sia per paesi emergenti e in via di sviluppo. Alcuni paesi stanno studiando l’applicabilità dei reattori evolutivi di piccola taglia ad un uso combinato, prevalentemente mirato alla contemporanea produzione di energia elettrica e dissalazione dell’acqua.

Gli SMRs sono oggetto di diversi progetti dell’IAEA nonché dell’iniziativa International Framework for Nuclear Energy Cooperation (IFNEC), ex GNEP - Global Nuclear Energy Partnership, della quale fa parte anche l’Italia. Negli Stati Uniti è atteso il lancio da parte del DOE (Department of Energy) di un programma di R&S finalizzato ad un rapido sviluppo, licensing e commercializzazione di tali reattori.



### Obiettivi

Scopo del progetto è mantenere e sviluppare competenze e infrastrutture adeguate a garantire la capacità di valutazione della consistenza tecnico-scientifica di specifici progetti proposti in ambito internazionale e di studio delle tematiche tecnico-scientifiche di carattere generale dei reattori evolutivi. Le principali attività sono state le seguenti:

- realizzazione della facility integrale SPES-3 per lo studio del comportamento di SMRs in condizioni incidentali e validazione di metodi e codici per la verifica della sicurezza;
- sviluppo e prova di componenti critici per reattori modulari di piccola-media taglia;
- studi preliminari per lo sviluppo di un simulatore ingegneristico di reattori evolutivi LWR per studi di sicurezza;
- analisi integrata di sistema e sicurezza relative alla riduzione del rischio sismico e all’analisi degli eventi esterni;
- valutazione dei codici di calcolo utilizzati per le verifiche di sicurezza degli attuali reattori LWR alla luce delle caratteristiche dei reattori LWR evolutivi.

## Risultati

### Prova integrale SPES-3 per reattori modulari di piccola-media taglia

Le verifiche numeriche effettuate con il codice RELAP5 hanno confermato che l'impianto SPES-3 progettato nel precedente triennio è idoneo alla simulazione di transitori incidentali di progetto (DBE) ed eventi di severità superiore (BDBE) del reattore IRIS. Inoltre, partendo da un'analisi dei vari progetti internazionali per SMR e delle relative facility integrali si è valutata la possibilità di utilizzare SPES-3 per la simulazione di altri reattori e sono state individuate le necessarie modifiche per simulare il comportamento integrale di alcuni SMR. Sono state evidenziate le sue potenzialità nello studio di specifici aspetti attraverso test ad effetti separati, come l'accoppiamento tra primario e contenimento durante un incidente di perdita di refrigerante (LOCA), e la qualifica dei codici di calcolo utilizzati per le verifiche di sicurezza.

Relativamente alla sperimentazione di componentistica per l'impianto SPES-3 sono state condotte verifiche sulle prestazioni di elementi scaldanti forniti dalla ditta ROTFIL. Le verifiche effettuate alle condizioni di potenza nominale per un nocciolo di un reattore modulare di piccola/media taglia hanno fornito buoni risultati. Nel corso della prossima annualità dovranno essere estese a condizioni rappresentative di eventi incidentali utilizzando anche altri fornitori.

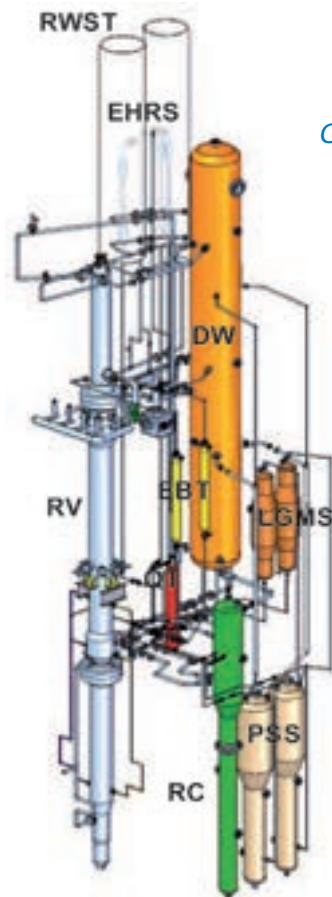
È proseguito l'approvvigionamento di componenti per la realizzazione dell'impianto SPES-3 quali il trasformatore della stazione elettrica, i serbatoi del sistema di contenimento - Dry-well, Quench tank, 2 PSS (Pressure Suppression System), Cavity, 2 LGMS (Long Term Gravity Make-up System), 2 EBT (Emergency Boration Tank) - e gli scambiatori e le piscine del sistema EHRS (Emergency Heat Removal System).

Queste attività sono state eseguite dalla SIET, società partecipata dell'ENEA, con la supervisione dell'ENEA. Lo sviluppo di strumentazione speciale per la prova integrale è stato condotto in collaborazione da SIET e CIRTEN e ha riguardato la misura della portata in condizioni bifase. SIET ha effettuato progettazione esecutiva, realizzazione e sperimentazione di una sonda capacitiva per la misurazione del grado di vuoto. Il CIRTEN ha operato sia alla caratterizzazione sperimentale della sonda sia allo sviluppo e alla verifica sperimentale di una catena di misura costituita da una turbina, da un "drag disk" e dalla sonda sviluppata. I buoni risultati ottenuti nelle prove a freddo dovranno essere confermati con prove a temperature caratteristiche.

### Sviluppo componenti critici per reattori modulari di piccola-media taglia

Gli studi relativi ai componenti critici di reattori di piccola-media taglia hanno riguardato il downcomer-fondo

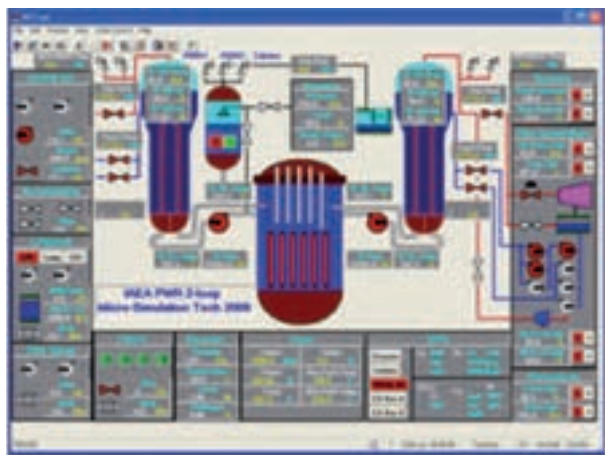
SPES-3  
Configurazione Generale



Sonda tomografica  
SIET



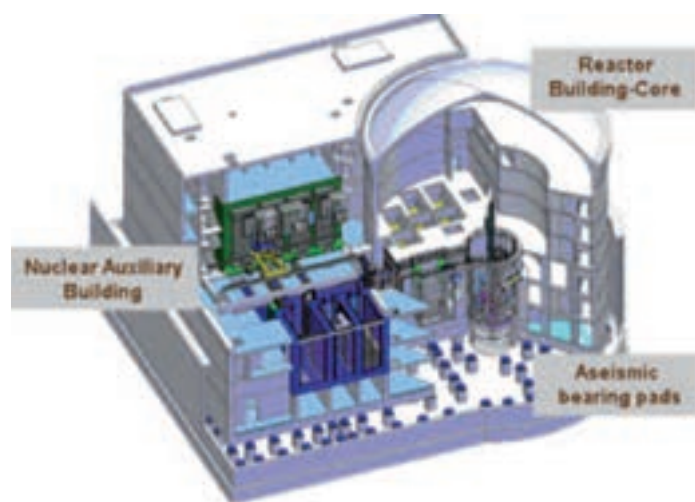
Mock-up del  
fondo vessel in  
plexiglass



*Sinottico principale del simulatore PCTRAN-PWR per l'impianto "IAEA-PWR 2-loop"*



*Modello 3D (FEM) del contenimento di un reattore SMR con isolatori HDRB (High Damping Rubber Bearings)*



*Jules Horowitz Reactor – Edificio Reattore ed Edificio Ausiliario*

vessel ed il generatore di vapore. In particolare per il primo è stata effettuata una campagna di prove sperimentali per una caratterizzazione multi-D della fluidodinamica del downcomer e del fondo vessel. Questi dati sperimentali, essenziali per supportare gli studi di miscelamento del boro in condizioni transitorie ed incidentali, costituiscono altresì una base per la validazione dei modelli dei codici CFD commerciali come il codice FLUENT estesamente utilizzato per gli studi a supporto della progettazione dell'apparecchiatura e delle prove sperimentali.

Sono proseguiti gli studi sulle instabilità del flusso riguarda al generatore di vapore a tubi elicoidali del tipo concepito per il reattore IRIS. Sono state realizzate ulteriori prove sul mock-up del generatore di vapore a doppio tubo prototipico per l'identificazione dei campi di instabilità di funzionamento. In parallelo è stata condotta un'attività finalizzata alla realizzazione parziale presso l'area sperimentale SIET di un impianto che permetterà la sperimentazione termoidraulica di base per valutare soluzioni ottimizzate o alternative per il generatore di vapore a tubi elicoidali da utilizzare per reattori SMR e per reattori di IV generazione.

Queste attività svolte da CIRTEN hanno avuto come prodotto principale la realizzazione di apparecchiature sperimentali, la generazione di dati sperimentali e la qualifica di modelli numerici.

### **Simulazione ingegneristica: sviluppo di un simulatore**

Sono stati analizzati simulatori di ingegneria e simulatori di tipo educational per arrivare a tracciare il profilo dei possibili futuri simulatori di ingegneria di supporto progettazione, verifica e gestione di futuri reattori per impianti nucleari in Italia. Tale analisi ha permesso di valutare le funzionalità di tali sistemi di calcolo, i principali componenti hardware e software, i codici di calcolo utilizzati nei medesimi, le prospettive di introduzione di elementi evolutivi di simulazione. L'attività è stata realizzata congiuntamente da ENEA e CIRTEN.

### **Analisi di sistema: Analisi eventi esterni**

I risultati delle analisi deterministiche per un contenimento con isolatori sismici di tipo HDRB (High Damping Rubber Bearings) hanno largamente confermato quanto emerso dalle analisi compiute in passato con i modelli teorici degli isolatori, rimarcando i notevoli benefici ottenuti introducendo l'isolamento sismico alla base. Utilizzando i risultati delle prove a rottura compiute è stato inoltre possibile costruire un modello non lineare dell'isolatore per il codice ABACUS che ha permesso di valutare con buona approssimazione i margini di sicurezza rispetto al terremoto di progetto consentiti dall'applicazione dell'isolamento sismico.

Gli studi dell'impatto areo sull'edificio di contenimento di un reattore SMR hanno riguardato l'analisi della risposta globale della struttura e la valutazione della vulnerabilità dei principali sistemi di sicurezza, strutture e componenti tramite un approccio deterministico alla corretta rappresentazione dell'interazione struttura-struttura. Per la determinazione degli effetti strutturali globali e locali si è realizzata una analisi non-lineare con codici agli elementi finiti dinamici (MSC.Dytran©) che hanno permesso di implementare un algoritmo Lagrangiano di contatto e di prendere in conto il comportamento non lineare dei materiali. Le simulazioni hanno considerato impatti orizzontali e inclinati, di aerei commerciali e militari sul contenimento di un reattore SMR innovativo.

### **Sviluppo e validazione codici di calcolo**

La disponibilità di metodi di simulazione adeguati è una esigenza imprescindibile per la valutazione dei diversi progetti di reattori evolutivi in particolare per quanto riguarda le caratteristiche di sicurezza. L'adeguatezza dei codici di calcolo utilizzati per gli studi di sicurezza nei reattori LWR attuali deve essere verificata a fronte delle fenomenologie alla base delle caratteristiche di sicurezza intrinseca e passiva proprie di questi impianti come il forte accoppiamento tra primario e contenimento, l'utilizzo della circolazione naturale e di iniezione per gravità in condizioni di emergenza. Oltre ai più recenti sviluppi della modellistica le attività sono state dedicate all'esigenza di avere a disposizione dati sperimentali adeguati per la validazione di questi codici da una parte valutando le potenzialità del reattore Jules Horowitz Reactor (JHR) dall'altra definendo un programma sperimentale da effettuarsi sull'impianto SPES-2 della SIET.

L'attività di sviluppo e validazione modellistica è stata effettuata da CIRTEN ed ha riguardato l'accoppiamento di un codice d'impianto con un codice di contenimento per l'analisi incidentale dei reattori modulari di tipo integrato. A questo scopo è stato acquisito il codice GO-THIC ed è stato implementato un accoppiamento semplificato con il codice di sistema RELAP5 definendo una strategia di sviluppo che renda l'accoppiamento più generale. Le potenzialità dell'accoppiamento sono state evidenziate con semplici analisi relative al reattore IRIS che hanno inoltre permesso di mettere in evidenza i limiti legati ai diversi algoritmi risolutivi dei due codici e di proporre delle linee guida per l'utilizzo. Le attività relative al Jules Horowitz Reactor (JHR) da

una parte sono state dedicate alla valutazione delle potenzialità del reattore ed alla definizione di una possibile forma di partecipazione italiana al progetto, dall'altra hanno visto il diretto coinvolgimento di ENEA e CIRTEN nella progettazione di canali di prova del reattore. Questo approccio ha permesso una completa survey dell'attività di progettazione-realizzazione-sperimentazione al fine di comprendere il possibile interesse di JHR per gli stakeholder industriali italiani.

Il coinvolgimento nella progettazione dei canali di prova del reattore ha riguardato la caratterizzazione dei transitori di potenza in dispositivi per prove di irraggiamento (ADELINE e MOLFI) con codici di neutronica (DULCINEE and TRIPOLI4) e la progettazione termoidraulica con il codice CATHARE del dispositivo LO-RELEI per la prova di elementi di combustibile in condizioni di LOCA.

È proseguita l'azione di recupero dell'impianto SPES-2, costruito nei laboratori SIET negli anni 90 per la simulazione integrale del reattore AP600 e pertanto provvisto dei relativi sistemi di sicurezza passivi. La parte di attività portata avanti da CIRTEN è stata finalizzata all'individuazione delle tematiche di interesse per reattori evolutivi da studiare sulla facility SPES-2 tenendo conto dell'esperienza acquisita nei programmi sperimentali internazionali (in particolare il progetto PKL-2 dell'OECD/NEA) e delle sue possibili configurazioni. Vista la rilevanza della diluizione del boro per la sicurezza dei reattori nucleari, si è esaminata con successo la possibilità di effettuare esperimenti sul tema nell'apparecchiatura SPES-2.

Da parte ENEA è stata realizzata un'analisi di pre-test per un tipico incidente di perdita di refrigerante di piccole dimensioni (SBLOCA) con lo scopo di investigare il fenomeno di "boron dilution" in condizioni di inventario massa ridotto. Questo tipo di transitorio è già stato analizzato sulla facility PKL e la sua realizzazione su SPES-2 permetterebbe di proporre in ambito internazionale un confronto tra i risultati ottenuti sulle due diverse facility.

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

**Progetto 1.3, linea progettuale 2:** Reattori evolutivi

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