

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

### NUOVO NUCLEARE DA FISSIONE - REATTORI EVOLUTIVI

Tema di ricerca 5.2.5.8 - Linea progettuale 2: Reattori evolutivi INTD, International Near Term Deployment

#### Scenario di riferimento

Per le potenziali caratteristiche di elevata sicurezza, facilità di trasporto, costruzione e ridotto rischio economico-finanziario, i reattori di piccola o media taglia di tipo modulare (SMR) hanno recentemente guadagnato sia l'interesse di operatori elettrici di limitata dimensione, sia l'attenzione dei Paesi emergenti e in via di sviluppo, che hanno espresso all'IAEA l'interesse a ricorrere, per la prima volta, all'energia nucleare. Per tale motivo gli SMR sono oggetto 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 il DOE (Department of Energy) ha annunciato il lancio, nella primavera 2011, di un programma di R&S specificamente finalizzato ad un rapido sviluppo, licensing e commercializzazione di tali reattori.

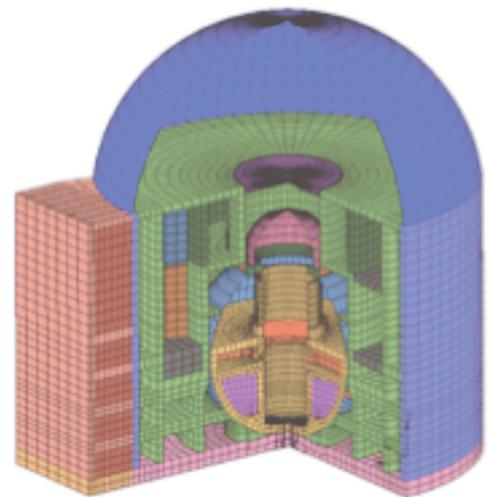
Infine, alcuni Paesi stanno studiando l'applicabilità dei reattori evolutivi di piccola taglia ad un uso combinato, prevalentemente mirato alla contemporanea produzione di energia elettrica e dissalazione dell'acqua.

#### Obiettivi

Scopo dell'attività è contribuire, nel breve e medio termine, a ricreare le competenze e le infrastrutture tecniche e scientifiche necessarie per la ripresa del settore nucleare in ambito nazionale, attraverso la partecipazione a programmi internazionali e allo studio di tematiche tecnico-scientifiche di carattere generale dei reattori evolutivi.

A tal fine sono stati individuati i seguenti macro-obiettivi:

- Prova integrale SPES-3 per reattori SMR di tipo integrato; tale prova è finalizzata alla realizzazione dell'impianto SPES-3 presso l'area sperimentale della SIET, all'esecuzione delle campagne sperimentali orientate allo studio dell'accoppiamento contenitore-



impianto durante un incidente di perdita di refrigerante e alla validazione dei metodi e dei codici di calcolo per la progettazione di sistema e le analisi di sicurezza (codici integrati d'impianto).

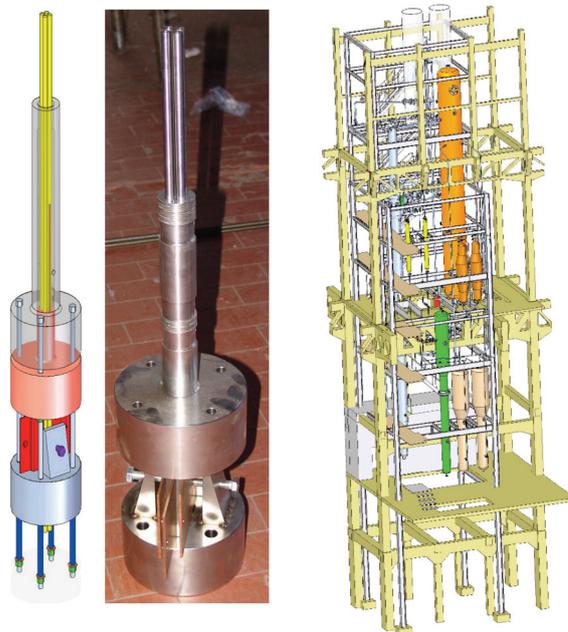
- Sviluppo di componenti critici per reattori di piccola-media taglia; tale obiettivo è orientato sia alla verifica analitica e sperimentale dei componenti, sia allo sviluppo e qualificazione di metodi di calcolo da utilizzare per la loro progettazione.
- Analisi di sistema, finalizzate allo studio di soluzioni impiantistiche e alla messa a punto di metodologie di analisi, riguardanti la progettazione di sistemi per la prevenzione e la mitigazione delle conseguenze di terremoti e degli eventi esterni, come l'impatto di un aereo, la radioprotezione, l'attivazione e il danneggiamento dei materiali da radiazione, studi su noccioli innovativi ecc.

## Risultati

### Prova integrale SPES-3 per reattori SMR di tipo integrato

È stata completata la progettazione dell'impianto sperimentale SPES-3, in grado di simulare i transitori operativi e incidentali di un impianto SMR (piccoli LOCA, rottura delle linee vapore ecc.). È stata, quindi, definita la configurazione impiantistica ed eseguito il dimensionamento meccanico, termico e idraulico dei componenti. A supporto dell'attività di approvvigionamento dei componenti, è stato progettato e realizzato un impianto per la qualifica delle canne scaldanti, che simulano in SPES-3 la potenza termica di origine nucleare.

Particolare attenzione è stata dedicata alla selezione e allo sviluppo di strumentazione idonea per la misura delle grandezze di interesse (portata, grado di vuoto e spessore del film liquido) in regime di flusso bifase, uno degli aspetti più critici nella realizzazione dell'impianto. Sono stati definiti i criteri per la scelta e la qualificazione dei metodi di misura, e sono state valutate potenzialità e prestazioni degli strumenti commerciali o sviluppati da laboratori internazionali. In particolare sono stati messi a punto modelli matematici per la determinazione della portata, che hanno dimostrato la fattibilità della misura della portata con una catena di strumenti costituita da una turbina, una sonda per la misura del grado di vuoto e un drag disk. Sono stati realizzati sensori a termo-resistenza con la relativa elettronica per misure di velocità del fluido, che si sono dimostrati più idonei per misure di livello, e sono state progettate sonde di tipo capacitivo per la misura del grado di vuoto,



*Tenuta inferiore dell'impianto prova canne scaldanti e struttura di supporto di SPES-3*

viste le condizioni fluidodinamiche di pressione e temperatura durante i transitori.

Il prodotto finale è costituito dal dossier di progettazione esecutiva, per l'approvvigionamento delle parti di impianto (tubazioni, valvole, serbatoi ecc.), e da infrastrutture tecniche (impianto SPES-3 in corso di completamento, impianto prova barre scaldanti, strumentazione speciale per misure bifase).

L'attività di progettazione e realizzazione impianti è stata eseguita dalla SIET, società partecipata dell'ENEA, con la collaborazione dell'ENEA. L'attività del CIRTEN è stata focalizzata sia sulla selezione della strumentazione per misure in bifase sia sulla verifica della capacità dell'impianto sperimentale di simulare i transitori incidentali.

### **Sviluppo componenti**

I componenti considerati, scambiatori immersi e generatori di vapore, sono stati selezionati sia per l'esperienza che il sistema Italia può vantare per il loro sviluppo sia per poter assicurare, in prospettiva, commesse agli operatori industriali nazionali per la realizzazione dei futuri SMR.

Per gli scambiatori immersi è stata sviluppata una correlazione di scambio termico basata sulla teoria della condensazione a film su parete, validata con le esperienze PERSEO messe a disposizione da ENEA ed eseguite da SIET sul prototipo in scala reale di un condensatore a tubi verticali. Tale

correlazione è stata implementata nel codice di sistema RELAP5.



*Impianto sperimentale per la caratterizzazione termofluidodinamica dei tubi elicoidali di generatori di vapore*

Per i tubi elicoidali dei generatori di vapore sono state sviluppate e validate correlazioni per valutare le perdite di carico e lo scambio termico in condizioni di crisi termica (dryout) e post-dryout, sia con dati sperimentali sia con dati reperibili in letteratura. Tali correlazioni sono state successivamente implementate nel codice RELAP5. È stata eseguita una prima campagna di prove finalizzate allo studio dell'instabilità termo-

fluidodinamica che si può instaurare nei canali paralleli dei tubi elicoidali. Le prove sperimentali sono state eseguite presso la SIET e presso il CIRTEN.

Sono state eseguite anche analisi meccaniche per la valutazione del carico di collasso di tubi elicoidali. I risultati delle prove sperimentali hanno supportato la preparazione di un nuovo code case, accettato dalle ASME per la progettazione di tubi sottoposti ad una pressione esterna maggiore di quella interna.

Un altro risultato significativo riguarda lo sviluppo e la validazione di modelli non lineari di turbolenza per superare alcune delle limitazioni legate alle formulazioni convenzionalmente implementate nei codici CFD commerciali, oltre alla messa a punto di protocolli di accuratezza per il loro utilizzo al fine di raggiungere standard elevati, riproducibili e tracciabili. Tale modello è stato implementato nel codice FLUENT.

Per studiare il miscelamento del boro durante l'intervento dei sistemi di sicurezza sono state eseguite simulazioni dinamiche ed è stata progettata un'apparecchiatura sperimentale (scala 1:5) che simula il downcomer e la parte bassa del vessel. Tale apparecchiatura è in corso di realizzazione. È stata completata la progettazione concettuale di un impianto sperimentale per lo studio di miscele bifase in tubi di diversa geometria (spirale, elicoidale ecc.). Il prodotto è costituito da apparecchiature sperimentali, dati sperimentali e modelli implementati nei codici di sistema e CFD.

Le attività di sviluppo componenti sono state eseguite principalmente dal CIRTEN.

### **Analisi di sistema**

Le attività sono state focalizzate sulla riduzione del rischio sismico, sull'analisi degli eventi esterni, sulla verifica del progetto per gli aspetti radio-protezionistici e di attivazione e danneggiamento materiali, su valutazioni neutroniche di noccioli di diversa potenza termica al fine di ridurre/eliminare il controllo chimico della reattività lungo il ciclo.

Relativamente alla riduzione del rischio sismico, sono stati evidenziati i vantaggi dell'isolamento sismico rispetto ad un impianto non isolato o parzialmente interrato. A tal fine è stato valutato il comportamento di un edificio isolato e non isolato sismicamente durante il terremoto di progetto, dopo avere definito le dimensioni geometriche, il fattore di forma, il tipo di mescola, il numero e la disposizione degli isolatori. È stata altresì valutata l'influenza sul comportamento dinamico dell'edificio del guasto di una frazione di isolatori.

È stata anche effettuata una valutazione preliminare dei costi connessi all'utilizzo di questa tecnologia. Infine è stata messa a punto una metodologia per la valutazione delle curve di fragilità, basata su tecniche numeriche consolidate (FEM, Montecarlo ecc.) e capace di eliminare o ridurre le incertezze e il grado di conservatività dei metodi tradizionali. Tale metodologia è stata applicata all'edificio non isolato per valutare le



*Isolatore in prova*

curve di fragilità di alcuni componenti. Al fine di valutare tali curve anche nel caso di un edificio isolato simicamente, è stato sviluppato un modello analitico/numerico capace di descrivere adeguatamente il comportamento di un isolatore ed è stata eseguita una serie di prove sperimentali finalizzate alla caratterizzazione meccanica degli isolatori selezionati.

Infine è stata elaborata una proposta di estensione agli impianti nucleari della normativa

europea EN 15129, valida per l'isolamento sismico degli edifici civili.

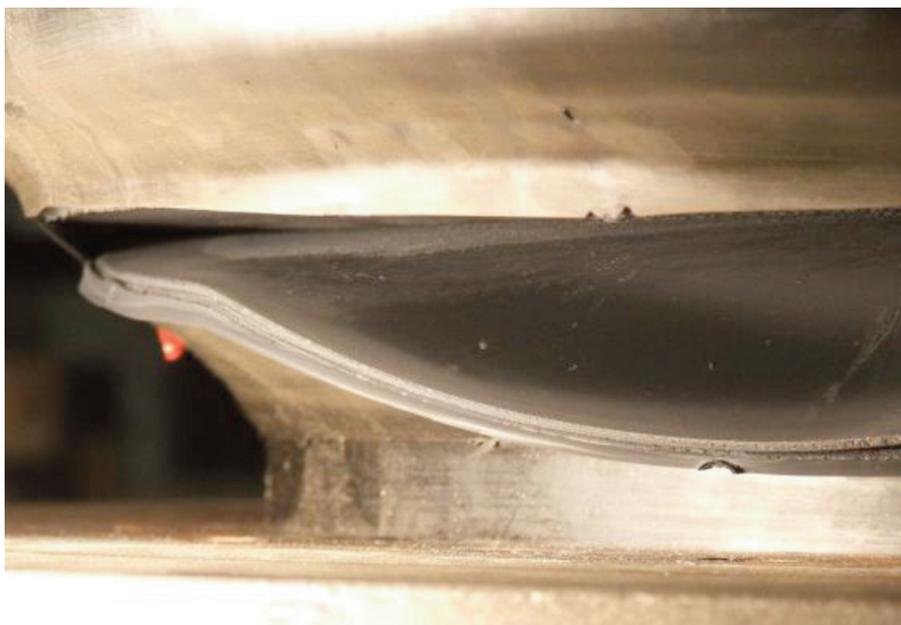
Riguardo all'analisi degli eventi esterni è stato completato lo studio dell'impatto aereo (Boeing 747 e Phantom F4) e del comportamento dell'edificio in caso di un tornado estremo, in accordo con la normativa ASCE e utilizzando il modello di Rankine per il calcolo delle velocità del vortice.

Per quanto riguarda la valutazione delle dosi nei vari locali dell'edificio ausiliari, e dell'attivazione e danneggiamento dei materiali nelle varie condizioni operative dell'impianto, i risultati dei calcoli hanno permesso di individuare le migliorie da apportare al progetto e di verificare la correttezza delle scelte progettuali fatte dal progettista.

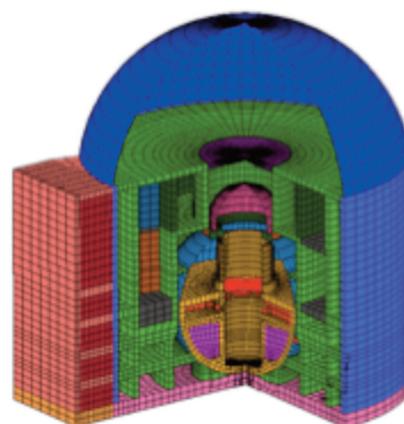
Per quanto riguarda le valutazioni neutroniche di noccioli di reattori pressurizzati ad acqua leggera di tipo evolutivo è stato studiato un nocciolo di un reattore di potenza termica dell'ordine di 600 MW (circa 220 MW<sub>e</sub>) con uno schema di ricarica del combustibile a ciclo unico (once-through). Tale soluzione offre la possibilità di gestire il reattore con contratti di "leasing" del combustibile, con importantissimi risvolti per quanto riguarda la difesa dal rischio di proliferazione.

Sono state inoltre valutate, per un nocciolo di potenza dell'ordine di 150 MW termici, soluzioni alternative al controllo chimico della reattività. Ogni soluzione investigata ha richiesto un approfondito studio partendo dall'elemento di combustibile per valutare arricchimento, quantità e distribuzione dei veleni bruciabili, dimensioni del reticolo, per poi passare alla valutazione di una disposizione ottimale dell'elemento di combustibile nel nocciolo a seconda del sistema assorbitore prescelto.

I calcoli neutronici sono stati finalizzati a ridurre/eliminare la



*Rottura isolatore*

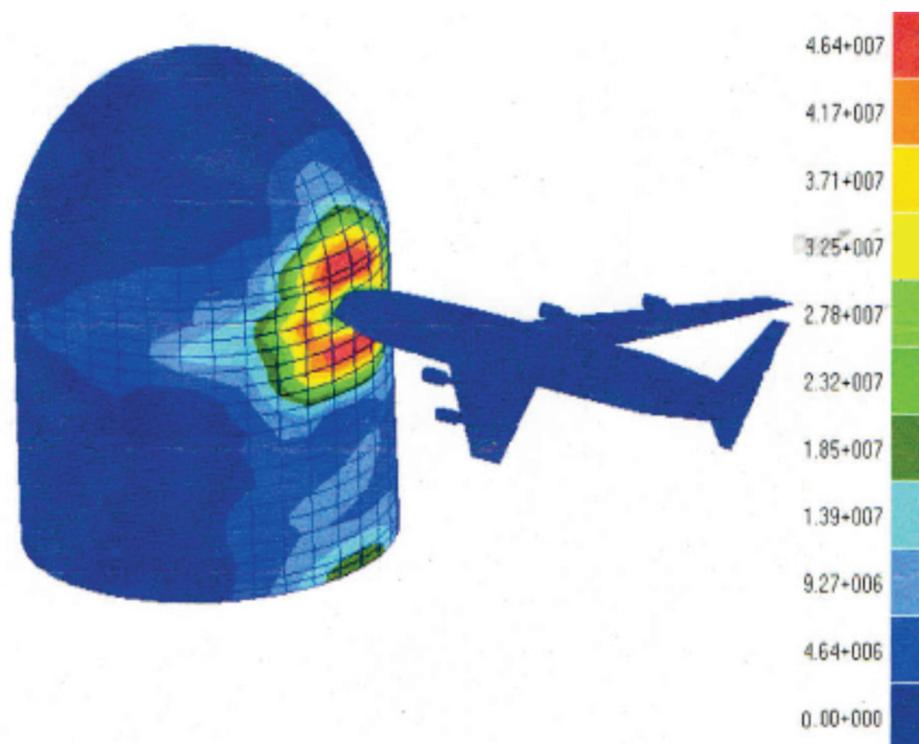


*Modello dell'edificio del reattore SMR prescelto*

concentrazione di boro con riduzione dei rifiuti prodotti e delle dosi ai lavoratori e una semplificazione impiantistica, oltre che a ottimizzare i coefficienti di reattività.

Il risultato è la messa a punto di metodologie applicabili anche ai reattori appartenenti all'attuale III Generazione, oltre all'acquisizione e trasferimento di competenze.

L'attività è stata effettuata dall'ENEA e dal CIRTEN.



*Impatto aereo - distribuzione delle tensioni*

## Documentazione disponibile

I documenti tecnici che riportano i risultati delle attività e delle ricerche sono consultabili sul sito [www.enea.it](http://www.enea.it).

Referente: Stefano Monti – [stefano.monti@enea.it](mailto:stefano.monti@enea.it)  
Fosco Bianchi – [fosco.bianchi@enea.it](mailto:fosco.bianchi@enea.it)

Settembre 2010

Aggiornamenti disponibili sul sito ENEA: [www.enea.it](http://www.enea.it)