



## Nucleare da Fissione - Studi sul nuovo nucleare e partecipazione ad accordi internazionali

### *Scenario di Riferimento e Overview Generale*

**L'ENEA E LA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO Sede ENEA  
ROMA – 23 novembre 2011**



Attività R&S riallineate al nuovo quadro di riferimento delineatosi in Italia nel dopo Fukushima con l'abrogazione tramite referendum del quadro normativo per il rilancio dell'opzione nucleare:

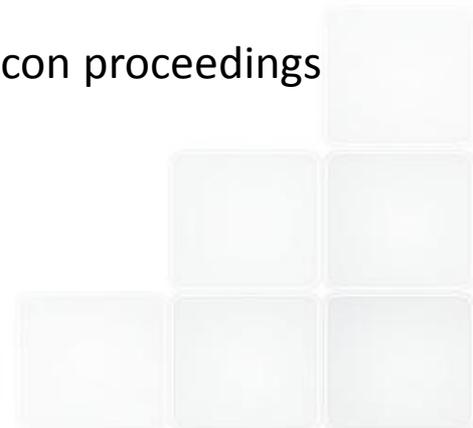
- Preservazione della **capacità di valutazione della consistenza tecnico-scientifica e della sicurezza dei reattori di nuova generazione** attraverso il mantenimento della cultura da parte delle risorse umane coinvolte, la dotazione di strumenti tecnico-scientifici adeguati (codici di calcolo, database, laboratori, simulatori) e **l'ampliamento e rafforzamento della rete di collaborazioni internazionali** nel settore
- Presa in conto negli **studi di sicurezza** della rivalutazione dei margini a cui saranno sottoposti tutti gli impianti nucleari europei **nel dopo Fukushima (stress test)**
- **Gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi** prodotti dalle attività nucleari pregresse, oltre che di quelli annualmente prodotti da attività industriali, ospedaliere e di ricerca **in linea con convenzioni internazionali e direttive europee**
- Mantenimento ad alto livello delle **attività di R&S sui sistemi nucleari a spettro veloce di IV generazione** che unitamente all'adozione di cicli del combustibile chiusi sono requisiti fondamentali ed imprescindibili di sostenibilità dell'energia nucleare

In base a tali considerazioni e tenendo conto delle attività tecniche già avviate nelle precedenti annualità dell'AdP tra MiSE ed ENEA, poiché la ricerca di sistema è, per sua natura, di medio-lungo periodo, la R&S sul nucleare da fissione è attualmente indirizzata su tre linee principali di attività :

- **Studi sul nuovo nucleare in ambito internazionale**
- **Studi di sicurezza sugli impianti nucleari**
- **Reattori di IV Generazione**



- ✓ 5 Unità Tecniche ENEA coinvolte: **UTIS** (Brasimone), **UTFISSM** e UTSISM (Bologna), **UTFISST** e UTTMAT (Casaccia)
- ✓ 143 ricercatori coinvolti
- ✓ Principali collaborazioni: SIET e CIRTEN
- ✓ Risultati Rilevanti:
  - 107 Rapporti Tecnici
  - Apparecchiature Sperimentali (CR Brasimone, SIET, CR Casaccia)
  - Codici di calcolo e Software
- ✓ Diffusione Risultati:
  - 50 Pubblicazioni su riviste/conferenze internazionali con proceedings
  - 2 workshops





## **Nucleare da Fissione - Studi sul nuovo nucleare e partecipazione ad accordi internazionali**

### *Attività di Modellistica e Studi di Sicurezza*

*P. Meloni - UTFISSM*

**L'ENEA E LA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO Sede ENEA  
ROMA – 23 novembre 2011**

## UNITA' TECNICA METODI PER LA SICUREZZA DEI REATTORI E DEL CICLO DEL COMBUSTIBILE

- ✓ Conoscenze e metodi di analisi e progettazione nel campo della fissione destinate all'applicazione ad impianti nucleari di generazione attuale ed avanzata ed ai relativi cicli del combustibile
- ✓ Capacità di verifiche di sistema e di sicurezza di impianti nucleari di generazione attuale ed avanzata e relativi cicli del combustibile
- ✓ Capacità di comparazione delle attuali e future opzioni scientifiche e tecnologiche per la produzione di energia nucleare, sotto il profilo della sicurezza, della sostenibilità e della convenienza,
  - **Acquisizione, sviluppo e validazione strumenti di metodologia e di analisi per progetto e sicurezza**
  - **Studi di sicurezza sui reattori evolutivi**
  - **Studi di sicurezza relativi ai depositi di rifiuti radioattivi**
  - **Sviluppo e validazione di modelli avanzati per la progettazione di reattori di IV generazione**
  - **Studi di resistenza alla proliferazione**

L'acquisizione e validazione di metodologie e strumenti di analisi per la valutazione della sicurezza degli impianti nucleari di tipo LWR ha riguardato differenti tematiche:

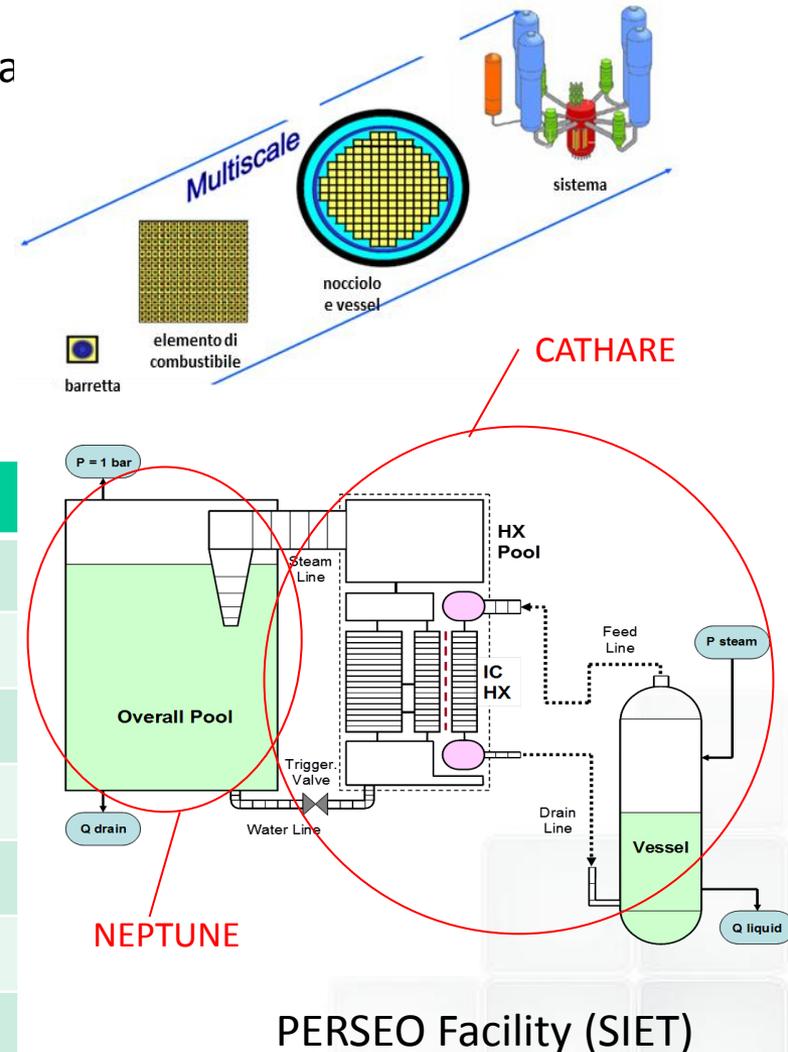
- Produzione di due librerie di sezioni d'urto multi-gruppo, identificate con le sigle VITJEFF311.BOLIB e BUGJEFF311.BOLIB. L'uso di quest'ultima è apparso particolarmente indicato per i calcoli di schermaggio nei Reattori ad Acqua Leggera
- Acquisizione della catena di codici deterministici di neutronica «francesi» APOLLO2-CRONOS2 (CEA) per calcoli di cella e di reattore tramite soluzione dell'equazione del trasporto di neutroni
- **Piattaforma di calcolo europea per la modellistica termoidraulica NURISP**
- **Modellistica per analisi di sicurezza**
- Sviluppo di modellistica del codice RadCal-III per la diffusione e dispersione di contaminanti radioattivi finalizzato ad analisi di impatto ambientale post-incidentale e/o ad analisi previsionali (piani di emergenza)

L'insieme di queste metodologie e strumenti di analisi permette di condurre una valutazione di tutti gli aspetti legati alla sicurezza nei reattori LWR evolutivi anche in confronto a quelli attuali

## Piattaforma di calcolo europea per la modellistica termoidraulica NURISP (ENEA-CIRTEN)

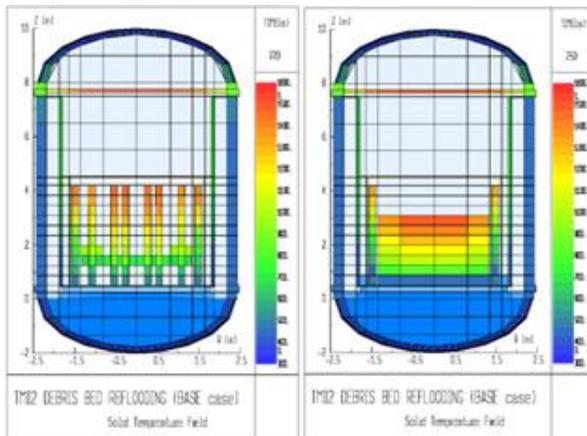
- ✓ Implementazione della piattaforma NURISP dedicata alla **simulazione multi-dimensionale** e multi-fisica sulla griglia di super-calcolo CRESCO (Centro Computazionale di Ricerca sui Sistemi Complessi) dell'ENEA.
- ✓ Validazione dei codici della piattaforma CATHARE, TRIO (CEA), NEPTUNE (CEA, EDF):

	INSTALL	local libs		grid libs		model		
		GUI	MPI	GUI	MPI	DNS	CFD	SYSTEM
SALOME	Yes	Yes	Yes	Yes	No			
SATURNE	Yes	Yes	Yes	No	No	x	x	
TRIO_U	Yes	Yes	Yes	Yes	No	x	x	
NEPTUNE	Yes	Yes	Yes	No	No		x	
CATHARE	Yes	Yes	Yes	Yes	No			x
PARAVIEW	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes			



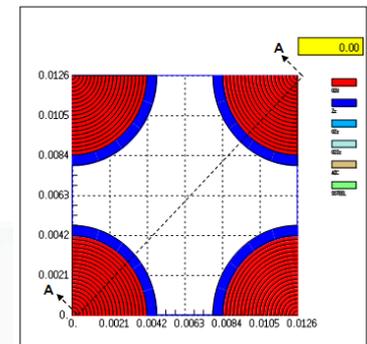
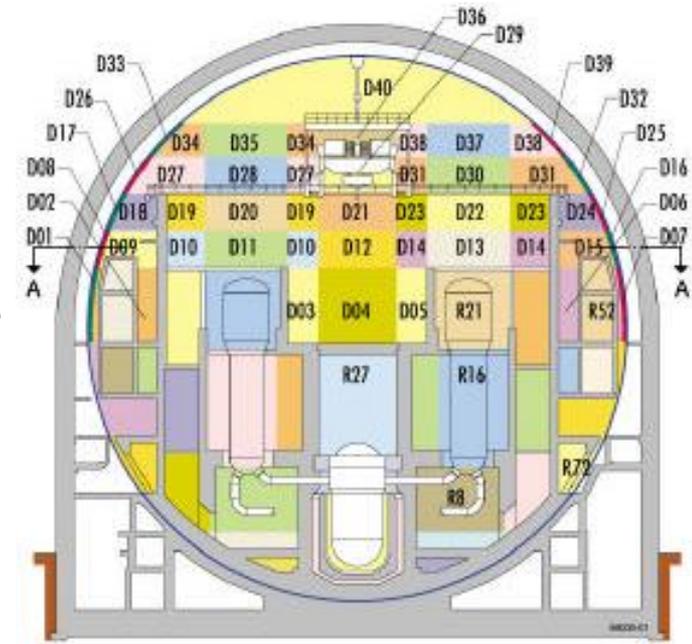
## Modellistica per Analisi di Sicurezza (SA)

- ✓ Analisi di sensibilità della risposta del codice integrale MELCOR (USNRC-SANDIA) al variare di parametri critici di sistema e d'impianto per aumentare la confidenza nella risposta dello strumento di calcolo durante la fase investigativa delle evoluzioni incidentali severe a maggiore frequenza di accadimento (applicazione ad un generico contenimento di PWR tipo Konvoi)



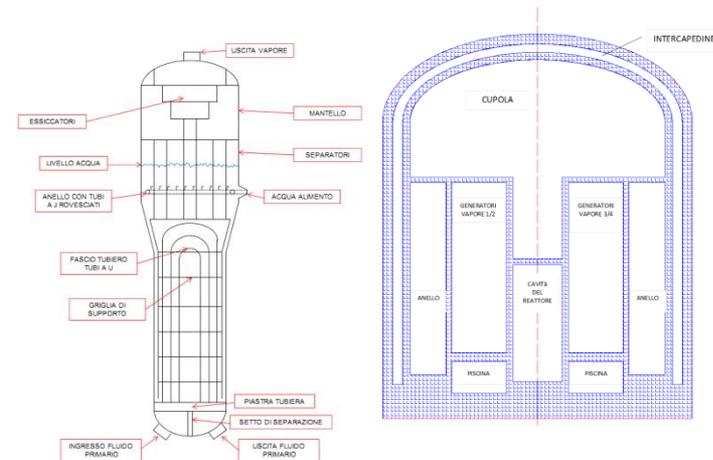
- ✓ Implementazione di alcuni modelli e validazione del codice ICARE-CATHARE V2.3 (IRSN) per lo studio dei fenomeni di "debris bed reflooding".

- ✓ Sviluppo, validazione ed applicazione del codice DRACCAR (IRSN) per la simulazione del comportamento termo-meccanico di elementi di combustibile durante incidenti di perdita di refrigerante (LOCA) in reattori pressurizzati e raffreddati ad acqua leggera.



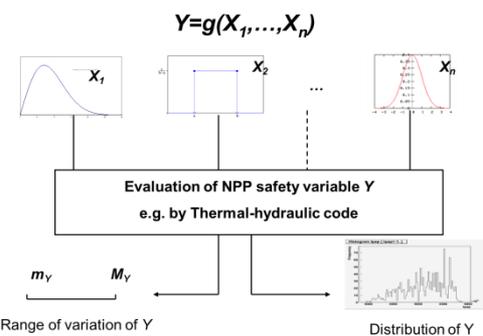
## Realizzazione Data base per valutazione reattori evolutivi (ENEA-CIRTEN)

- ✓ Gruppo di lavoro MILLE600: raccolta critica di informazioni relative ai sistemi e componenti caratterizzanti un impianto nucleare PWR evolutivo da 1600 MWe, al fine di permettere successive attività di sviluppo e validazione dei modelli di calcolo per la valutazione delle evoluzioni incidentali e delle relative conseguenze.



## Studi condotti sulle metodologie di valutazione delle incertezze per trattare con la giusta confidenza i risultati ottenuti (ENEA-CIRTEN)

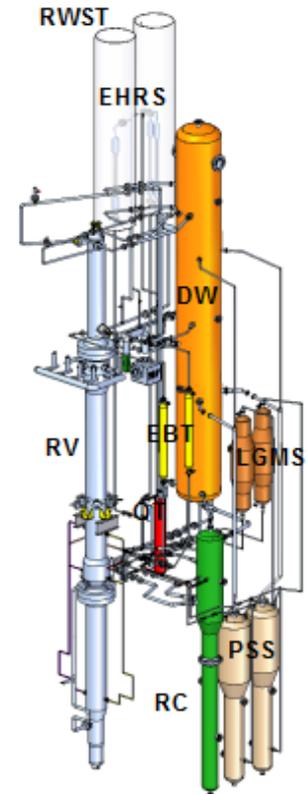
- ✓ Metodologie e tecniche finalizzate alla determinazione della frequenza di danneggiamento del nocciolo
- ✓ Studio e sviluppo critico di metodi di analisi delle incertezze nei processi di stima del rischio



## Realizzazione di una facility integrale a supporto degli studi di sicurezza per SMR ( SIET)

- ✓ Confermata l'idoneità di SPES-3 (ITF) alla simulazione di transitori incidentali di progetto (DBE) ed eventi di severità superiore (BDBE) del reattore IRIS tramite simulazioni RELAP5
- ✓ Individuate le potenzialità di SPES-3 per lo studio di specifici aspetti dei SMR e qualifica di sistemi/componenti e codicistica
- ✓ Verifica delle prestazioni di prototipi di canne scaldanti)

- ✓ Progettazione esecutiva, realizzazione, sperimentazione di una sonda capacitiva per la misurazione del grado di vuoto, sviluppo ed analisi prestazioni di una catena di misura per portate bifase (CIRTEN)
- ✓ Approvvigionamento del trasformatore della stazione elettrica, dei 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), degli scambiatori e le piscine del sistema EHRS (Emergency Heat Removal System).



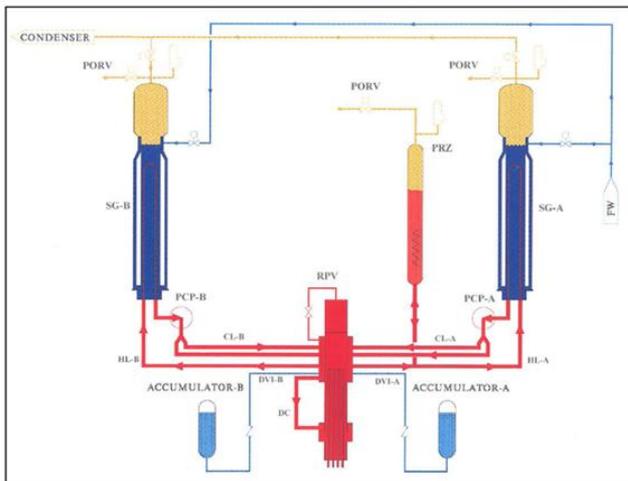
# Studi di sicurezza sui Reattori evolutivi

## Analisi di Sistema a fronte di eventi esterni (ENEA-CIRTEEN)

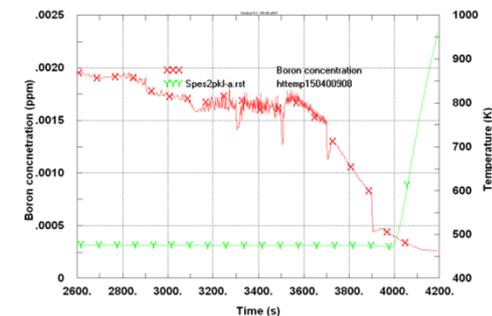
- ✓ Analisi sismiche per la valutazione dei margini di sicurezza rispetto al terremoto di progetto, consentiti dall'applicazione dell'isolamento sismico: utilizzazione dei risultati delle prove a rottura compiute presso la FIP Industriale e introduzione di un modello non lineare per l'isolatore nel codice ABACUS per meglio riprodurre il comportamento ad alte deformazioni (UTSISM)



## Definizione di un programma sperimentale per l'ITF SPE2 (ENEA-CIRTEEN)



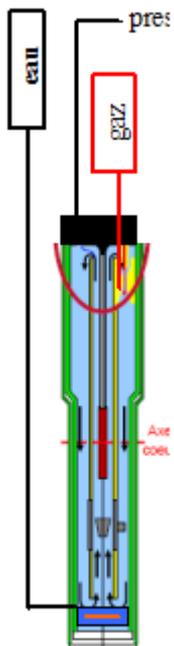
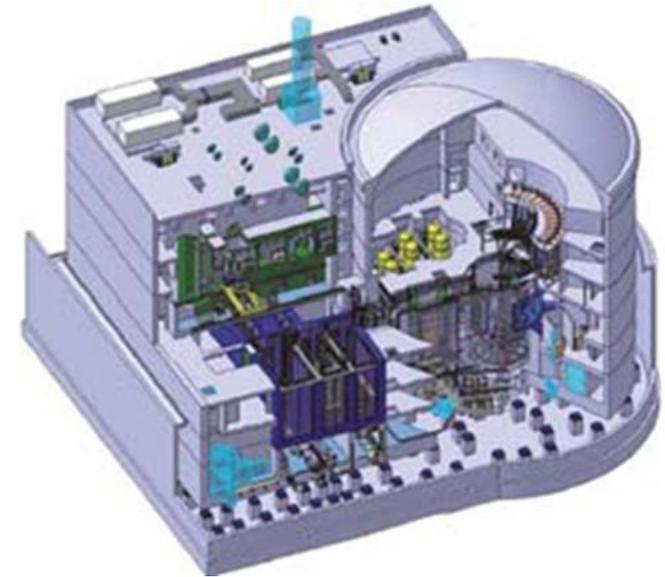
- ✓ Realizzazione di un'analisi di pre-test col codice RELAP5 per un tipico incidente di perdita di refrigerante di piccole dimensioni (SBLOCA) per investigare il fenomeno di "boron dilution" in condizioni di inventario massa ridotto



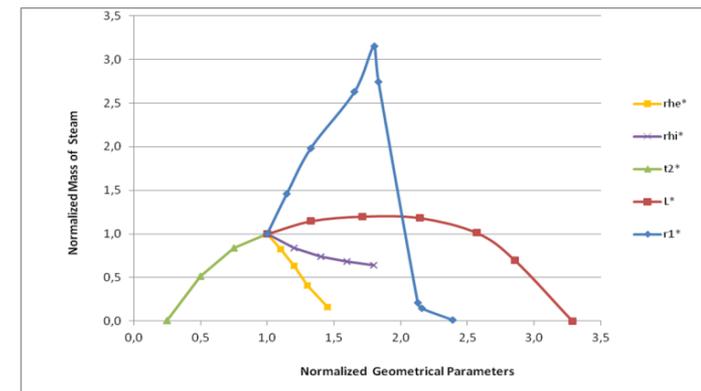
# Studi di sicurezza sui Reattori evolutivi

## Cooperazione con il CEA su Jules Horowitz Reactor (JHR)(ENEA-CIRTEN)

- ✓ Valutazione delle potenzialità del reattore JHR, un reattore per la qualifica di materiali e combustibile nucleare in costruzione presso il centro CEA di Cadarache aperto alla collaborazione internazionale e definizione di una possibile forma di partecipazione italiana al progetto



- ✓ Progetto preliminare del dispositivo LORELEI per lo studio degli effetti di transitori incidentali di perdita di refrigerante (LOCA) su una barretta di combustibile: definizione lay-out con CAD Software SolidWorks, studio termo-idraulico con il codice di sistema CATHARE, ottimizzazione geometria per permettere raffreddamento in condizioni di circolazione naturale



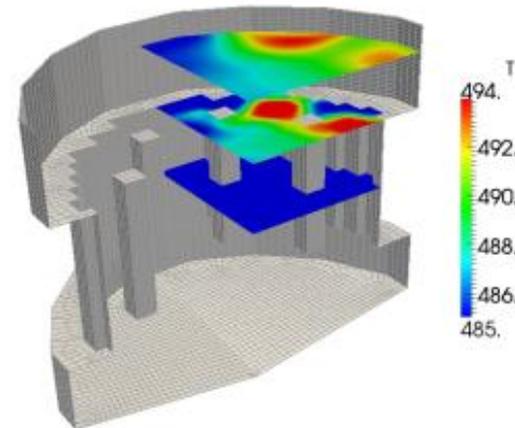
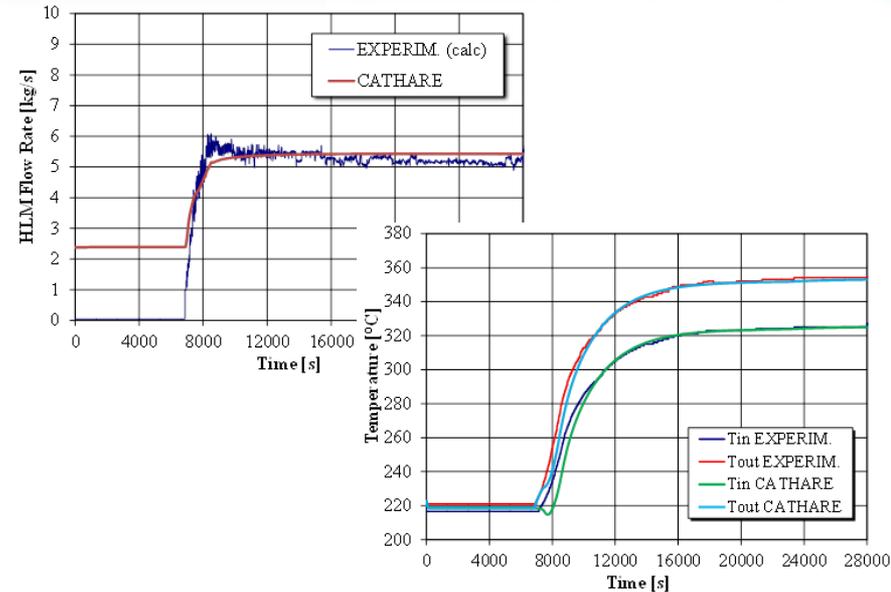
# Sviluppo e validazione di modelli avanzati per la progettazione di reattori di IV generazione

Sviluppo e validazione del codice di sistema CATHARE-2 (CEA) per le analisi di sistema e di sicurezza di sistemi HLM (ENEA-CIRTN)

- ✓ Codice termoidraulico di sistema CATHARE modificato per il trattamento dei metalli liquidi pesanti e validato attraverso il confronto con dati sperimentali provenienti da due circuiti integrali a piombo-bismuto: NACIE e HELIOS

Sviluppo di un modello avanzato di turbolenza nel codice di calcolo FEM-LCORE per lo studio della termo-fluidodinamica del nocciolo LFR (ENEA-CIRTN)

- ✓ Codice di fluidodinamica computazionale FEM-LCORE per lo studio della termoidraulica 3D di sistemi a metallo liquido.
- ✓ Implementazione di nuovi modelli di turbolenza come lo standard SST k- $\omega$ .
- ✓ Simulazione di flow-blockage degli elementi di combustibile sia scatolati che aperti.



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

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

## Sviluppo e validazione modelli di calcolo per la la neutronica e la cinetica di nocciolo LFR (ENEA-CIRTEN)

- ✓ Validazione del modulo di cinetica KIN3D di ERANOS (CEA), sviluppato per l'analisi di cinetica neutronica di sistemi critici e sottocritici. Il modulo di cinetica è stato provato nell'analisi della misura del livello di reattività del sistema GODIVA e GUINEVERE, dimostrando un'ottima affidabilità.
- ✓ Elaborazione di un modello di impianto che accoppi la parte neutronica e quella termoidraulica, per descrivere adeguatamente il comportamento della dinamica di nocciolo. Il modello permette di calcolare l'evoluzione della potenza neutronica, che costituisce la sorgente termica da assegnare alla parte termoidraulica per il calcolo della distribuzione delle temperature. Queste saranno, a loro volta, fornite al modulo di neutronica, il quale, con opportuni coefficienti, potrà calcolare l'evoluzione della reattività e quindi, di nuovo, della potenza.

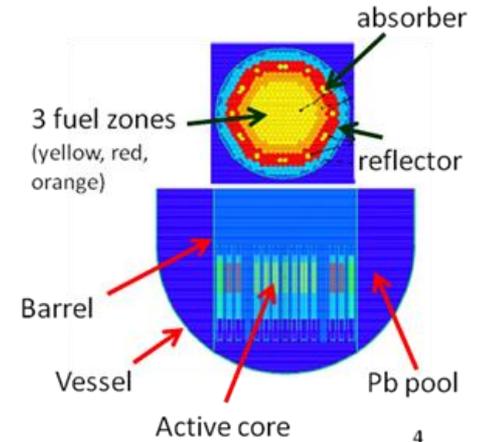


Fig. 1: Sketch of the ELSY reactor.

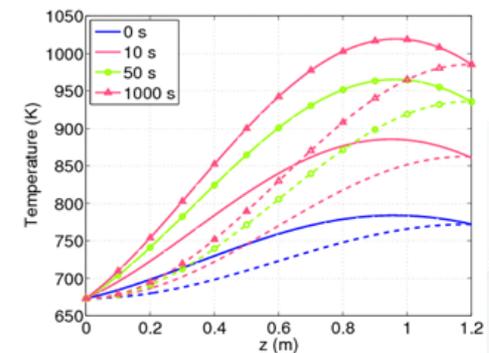
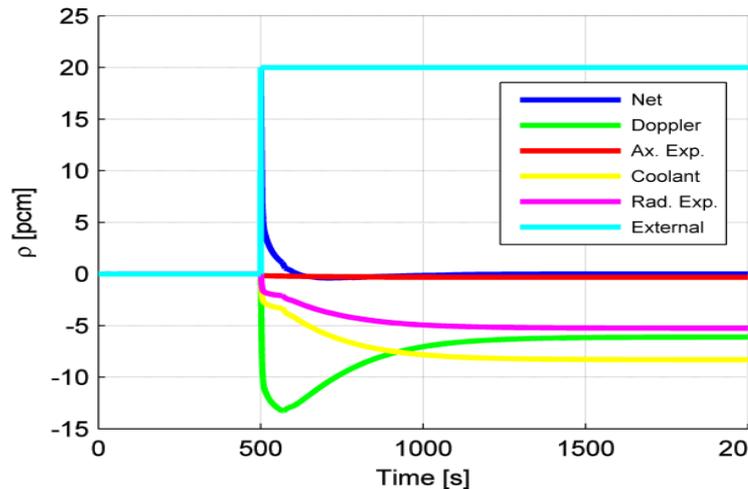


Fig. 6: Axial distribution of fuel and lead temperatures as a response to a 100 pcm reactivity insertion (constant reactivity coefficients).

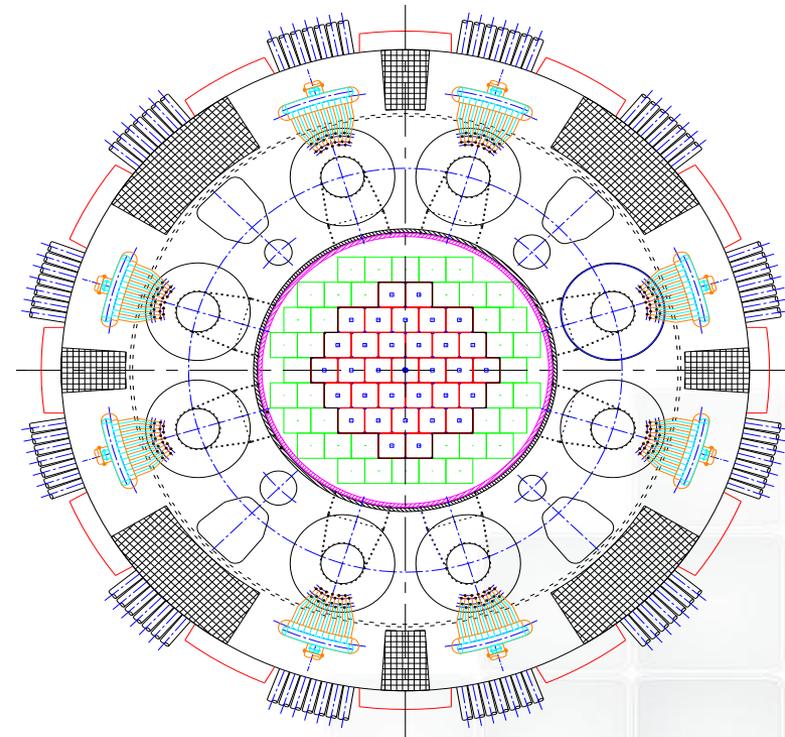
# Sviluppo e validazione di modelli avanzati per la progettazione di reattori di IV generazione

## Concettualizzazione e progettazione del nocciolo del DEMO di un LFR (ENEA-CIRTEN)

- ✓ Revisione critica del DEMO-LFR. Si è ricontestualizzato l'obiettivo di dimostrazione tralasciando l'obiettivo di elevata fluenza neutronica. Questa semplificazione permette così 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).



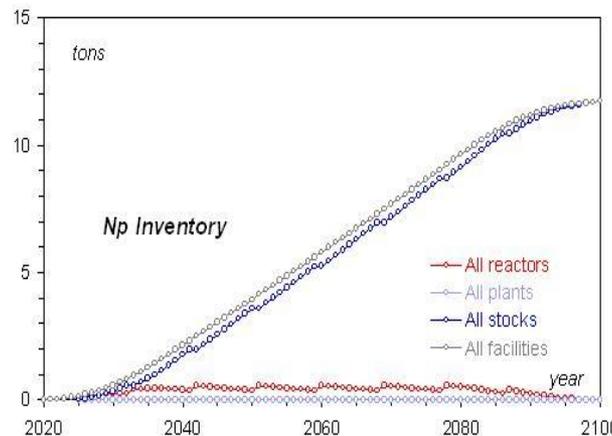
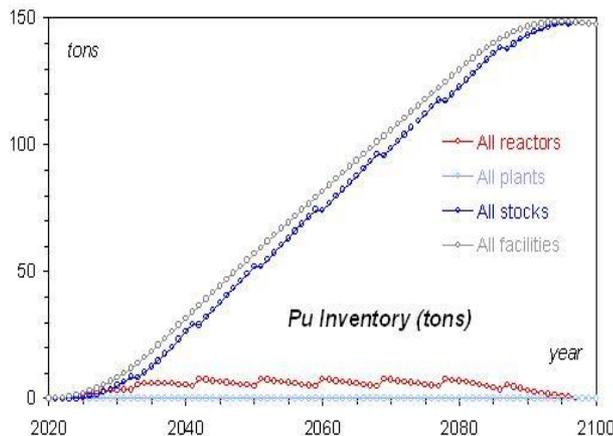
Reactivity components variation following a 20 pcm reactivity insertion



Sezione mediana del DEMO-LFR

# Studi di Resistenza alla Proliferazione

- ✓ Si è fatto il punto sullo sviluppo e applicazione delle due principali metodologie internazionali per valutare la resistenza alla proliferazione: PR&PP (*Proliferation Resistance and Physical Protection*), in ambito GIF, e INPRO in ambito IAEA. In particolare si sono sottolineati gli aspetti sinergici e le attività per l'armonizzazione delle due metodologie.
- ✓ Il concetto di salvaguardabilità e il processo *Safeguards-by Design* sono stati messi in evidenza in quanto stanno assumendo sempre più rilevanza. Gli esempi di applicazione a nuovi impianti nucleari hanno mostrato i vantaggi, anche dal punto di economico, derivanti dall'introduzione delle misure di salvaguardia fin dall'inizio della progettazione.
- ✓ L'ENEA ha anche contribuito all'Iniziativa IAEA "*Options to Enhance Proliferation Resistance and Security of NPPs with Innovative SMRs*" con un approccio originale per meglio affrontare la tematica nelle prime fasi del progetto.

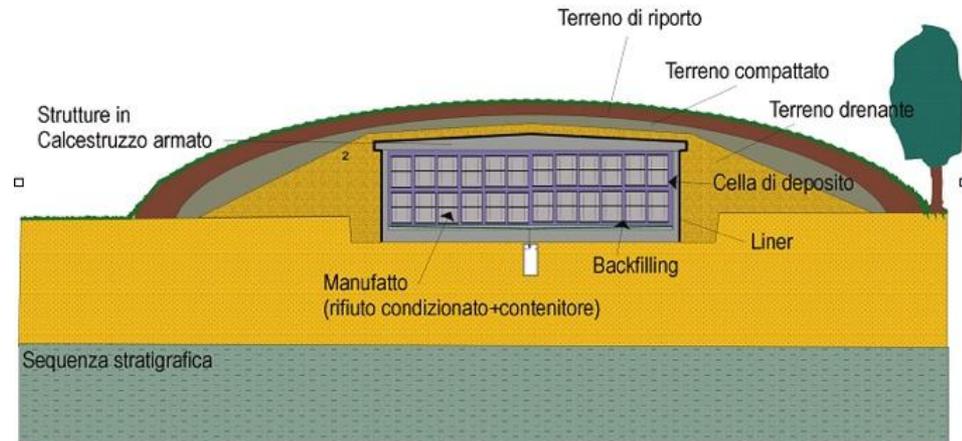


Tra gli aspetti da considerare è, ad esempio, la ripartizione del plutonio e del nettunio accumulati tra le diverse componenti del ciclo del combustibile. In figura, accumuli di plutonio e nettunio in uno scenario di 8 reattori tipo EPR.

# Studi di sicurezza relativi ai depositi di rifiuti radioattivi

## Strumenti di analisi sitologiche e fenomeni di trasporto dei radionuclidi associati a un deposito superficiale (ENEA-CIRTEEN)

- ✓ Finalizzazione in collaborazione con POLIMI, del lavoro di modellazione dei fenomeni di dispersione attraverso le barriere protettive e sviluppo di una metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposito stesso.



- ✓ Proseguimento dello sviluppo di competenze su strumenti computazionali deterministici (codice AMBER) applicando le procedure di analisi di sicurezza e "performance assessment" del deposito ad alcuni radionuclidi di interesse ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{234}\text{U}$ )
- ✓ Per il monitoraggio ambientale dei siti stessi durante la fase di sorveglianza istituzionale si è posta l'attenzione su quei radionuclidi che, sebbene presenti in minore quantità (ad es.  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{129}\text{I}$ , gas nobili, ecc.), hanno una mobilità che li rende adatti come riferimento per il monitoraggio per la tempestiva segnalazione del cedimento delle barriere.
- ✓ approfondimento del tema degli analoghi naturali (isotopi analoghi, elementi analoghi, parametri analoghi, siti analoghi) a supporto della modellazione del trasporto dei radionuclidi nell'ambiente ai fini della "performance assessment" del deposito

## Indagini Conoscitive relative allo Smaltimento Geologico (EERA-CIRTEN)

- ✓ Adesione alla IGD-TP (Implementing Geological Disposal Technology Platform) partecipando ai lavori per la definizione della relativa SRA (Strategic Research Agenda), documento che individua i temi di R&S per la realizzazione del primo deposito geologico europeo.
- ✓ Partecipazione alla associazione ARIUS, che ha come obiettivo quello di rendere possibile la realizzazione e l'esercizio di un deposito geologico multinazionale e contributo alla definizione (gruppo di lavoro ERDO-WG) di un modello di struttura per un'organizzazione ERDO (Organizzazione per lo Sviluppo di un Deposito Europeo) compresa la bozza di Statuto, le linee guida operative ed un business plan a 5 anni.
- ✓ Partecipazioni a eventi e gruppi di lavoro organizzati dalla IAEA hanno permesso di ulteriormente consolidare le competenze sia sul tema dello smaltimento geologico (GEOSAF) sia sui temi strettamente collegati dello stoccaggio a lungo termine del combustibile esaurito.

