

Le attività di ricerca e sviluppo dell'ENEA sul nucleare da fissione nell'ambito dell'Accordo di Programma con il Ministero dello Sviluppo Economico

Stefano Monti

ENEA, Presidente SIET SpA

Il sistema della ricerca gioca un ruolo chiave nel rilancio del nucleare in Italia, in termini sia di valutazione e miglioramento delle tecnologie esistenti, sia di sviluppo di nuove tecnologie. Le attività di R&S dell'ENEA sul nucleare da fissione hanno trovato a livello nazionale una collocazione organica e sinergica con le grandi iniziative internazionali ed europee all'interno dell'Accordo di Programma triennale con il Ministero dello Sviluppo Economico, siglato nel giugno 2007

ENEA R&D on Nuclear Fission within the Programme Agreement between ENEA and the Italian Ministry for Economic Development

Research plays a crucial role to relaunch nuclear energy in Italy both in terms of better assessment and enhancement of existing technologies, as well as of development of new ones. At the national level ENEA R&D activities on nuclear fission – which are complementary and synergic with the major EU and international initiatives in the field – are carried out in the frame of a three-year Programme Agreement signed between ENEA and the Italian Ministry for Economic Development on June, 2007

Quadro di riferimento

La necessità di ridurre la dipendenza dalle fonti energetiche estere e di gestire la tendenza dei prezzi al rialzo, unitamente al rispetto dei vincoli del protocollo di Kyoto sulle emissioni dei gas serra, impongono un cambiamento nel sistema energetico nazionale. Le recenti dichiarazioni e determinazioni del Governo e l'ampio dibattito pubblico degli *stakeholder* in tema di energia nucleare hanno creato alcune delle premesse necessarie per il rientro graduale del nostro Paese in una nuova filiera nucleare da fissione.

La fonte nucleare ha tutti i requisiti per fornire risposte efficaci alla problematica energetica ed il Governo ha pertanto avviato, anche con specifici interventi legislativi (Legge 99 del 23 luglio 2009) ed alcuni importanti accordi internazionali (con Francia, Giappone, USA ecc.), il processo di ricostituzione di una rete di conoscenze tecniche, scientifiche e industriali in materia nucleare e di un quadro normativo e regolamentare adeguato.

La sfida lanciata dal Governo può essere raccolta e vinta se tutte le entità attive nel settore nucleare, organismi regolatori e di controllo, enti di ricerca e di formazione (in primis il sistema universitario), industria ed utilities energetiche, ma anche la finanza e le parti sociali, avranno la capacità di mettere in atto una fattiva capacità di interrelazione, adottando un giusto equilibrio tra cooperazione e competizione. Oggi quindi, più che mai, in questo settore si sente la necessità di unire le risorse intellettuali e produttive e di convergere sull'obiettivo di fornire al Paese il proprio contributo.

Il sistema della ricerca, e in particolare l'ENEA, gioca un ruolo chiave nel rilancio del nucleare in Italia, in termini sia di valutazione e miglioramento delle tecnologie esistenti, che di sviluppo di nuove tecnologie. L'Ente infatti, nonostante le ridotte risorse finanziarie disponibili nel settore dopo il referendum del 1987 ed il conseguente depauperamento di risorse umane e strumentali, possiede tuttora rilevanti competenze specifiche e infrastrut-

ture di ricerca di livello internazionale, conservate e sviluppate grazie alla partecipazione ai programmi MIUR sulla trasmutazione, al recente Accordo di Programma col Ministero dello Sviluppo Economico, ai progetti europei dei vari programmi quadro Euratom ed alle attività di studio e consulenza presso organismi internazionali (OECD-NEA, IAEA ecc.), nonché tramite l'acquisizione di alcune commesse nazionali ed internazionali ricevute dall'industria (Ansaldo Nucleare, SOGIN ecc.) e da altri organismi europei (CEA, IRSN ecc.).

Tali competenze ed infrastrutture sono concentrate presso i Centri di Bologna, del Brasimone, della Casaccia (Roma) e di Saluggia, nonché presso le partecipate SIET, ERSE e NUCLECO.

Queste competenze ed infrastrutture, che sono ora poste al servizio del Paese per il rilancio dell'opzione nucleare in Italia, hanno garantito, anche nel dopo Chernobyl, un dignitoso presidio sul nucleare da fissione, attraverso: la partecipazione ai programmi internazionali e comunitari di ricerca, lo sviluppo di tecnologie innovative per il ciclo del combustibile, incluso il trattamento dei rifiuti radioattivi, la capacità di valutare sia le varie opzioni scientifiche e tecnologiche per la produzione di energia nucleare, sotto il profilo della sostenibilità e della convenienza, sia i requisiti minimi dei siti produttivi e di stoccaggio dei rifiuti.

L'Accordo di Programma fra il Ministero dello Sviluppo Economico e l'ENEA

A livello nazionale, le attività dell'ENEA sul nucleare da fissione hanno trovato una collocazione organica e sinergica con le grandi iniziative internazionali ed europee sul nucleare sostenibile all'interno del sopra citato Accordo di Programma (AdP) triennale tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, siglato fra le parti il 21 giugno 2007. Tale Accordo di Programma, coerentemente coi temi individuati dal "Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico e Piano Opera-

tivo Annuale", prevede un finanziamento annuale di circa 6 milioni di euro per attività nazionali da inquadrare nell'ambito di progetti internazionali sul nuovo nucleare da fissione, il cosiddetto "nucleare sostenibile". Il relativo programma di ricerca si prefigge di contribuire a ricreare le competenze e le capacità industriali affinché il Paese sia in grado di partecipare alla progettazione e realizzazione degli impianti di generazione III+ e di *Generation IV* nel caso essi soddisfino, coerentemente con la tipologia 'evolutiva' e 'innovativa', i criteri di sostenibilità, economia, sicurezza e affidabilità, resistenza alla proliferazione e protezione fisica. Oltre che allo sviluppo di alcuni e selezionati sistemi nucleari avanzati ed innovativi, il programma intende anche contribuire all'analisi comparata delle attuali opzioni scientifiche e tecnologiche di III generazione per la produzione di energia nucleare, sotto il profilo della sostenibilità e della convenienza, ed all'individuazione del sito di realizzazione dell'impianto di smaltimento dei rifiuti radioattivi di II categoria e di deposito temporaneo dei rifiuti radioattivi di III categoria. Assai rilevante rispetto alle esigenze primarie del nuovo programma nucleare italiano è, inoltre, l'attività relativa alla formazione scientifica ed alla comunicazione. È infine previsto il supporto all'Agenzia per la sicurezza nucleare per gli iter autorizzativi.

A tal fine il programma si sviluppa secondo le seguenti Linee Progettuali (LP):

LP1. Studi di inquadramento del nuovo nucleare, scenari, ciclo del combustibile e minimizzazione rifiuti radioattivi, resistenza alla proliferazione.

Tale linea si propone di effettuare una ricognizione ed una valutazione delle varie iniziative e degli accordi di collaborazione internazionali nell'area dei sistemi nucleari innovativi e dei relativi cicli del combustibile avanzati, relativamente ai quali vengono anche condotti alcuni studi tecnico-economici di scenario.

LP2. Reattori evolutivi INTD – International Near Term Deployment, con particolare attenzione al progetto IRIS (*International Reactor Innova-*

tive and Secure), che si presenta particolarmente consono alle capacità del sistema Italia e che è supportato da industrie nazionali quali Ansaldo Nucleare, Mangiarotti Nuclear, ATB Riva Calzoni e Marie Tecnimont.

LP3. Reattori innovativi di quarta generazione – Generation IV.

La linea progettuale comprende attività – complementari a quelle previste nel *Generation IV International Forum* (GIF) e nei progetti europei ELSY, ESFR e RAPHAEL – dedicate allo sviluppo dei reattori *Lead-cooled Fast Reactor* (LFR), *Sodium-cooled Fast Reactor* (SFR) e *Very High Temperature Reactor* (VHTR) di IV generazione.

LP4. Attività a supporto della individuazione e scelta di un sito e per la successiva realizzazione di un deposito definitivo dei rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo dei rifiuti di III categoria.

In questo ambito sono previste attività relative all'aggiornamento dell'Inventario Nazionale dei Rifiuti Radioattivi ed alla caratterizzazione dei rifiuti da conferire al deposito, nonché analisi propedeutiche alla progettazione del deposito definitivo dei rifiuti radioattivi di II categoria e temporaneo dei rifiuti di III categoria.

LP5. Supporto all'Autorità istituzionale di sicurezza per gli iter autorizzativi, anche al fine di elevare il grado di accettazione dei reattori di III generazione. Comparazione delle attuali opzioni scientifiche e tecnologiche.

È in questa linea progettuale che sono inquadrate tutte le attività ENEA relative ai reattori evolutivi di III generazione di interesse nazionale (EPR, AP1000 ecc.), nonché le connesse problematiche di qualificazione del sistema industriale italiano.

LP6. Formazione scientifica funzionale alla ripresa dell'opzione nucleare in Italia.

Nella creazione di un sistema nucleare italiano, un ruolo di assoluto rilievo è giocato, da un lato dalla formazione di personale qualificato ai diversi livelli, dall'altro da una corretta informazione e comunicazione al pubblico, in generale sui temi del-

l'energia e, in particolare, sui vantaggi offerti dalle tecnologie nucleari. In quest'ottica risulta di fondamentale importanza che il mondo accademico, quello della ricerca e quello industriale interagiscano in modo sinergico e coordinato, di modo che vi sia un continuo scambio di conoscenze, ed una definizione concordata di priorità tematiche, di caratteristiche dei profili professionali richiesti, di strategie di comunicazione.

Infine, come richiesto dallo stesso AdP, l'ENEA garantisce, lungo tutto l'arco temporale del programma, il necessario supporto al Ministero dello Sviluppo Economico per il coordinamento della partecipazione nazionale a progetti ed accordi internazionali nel campo del nuovo nucleare da fissione. Il programma supporta solamente progetti portati avanti sulla base di accordi internazionali e/o progetti cofinanziati dall'Euratom nell'ambito dei programmi quadro europei, che prevedono la partecipazione di organizzazioni italiane.

L'attività programmata nell'ambito dell'AdP ha una durata complessiva di 3 anni ma è ovvio che un tale impegno si estenderà anche agli anni successivi. Ciò è peraltro confermato dalla circostanza che il nucleare da fissione è incluso anche nel Piano Triennale 2009-2011 della ricerca di sistema elettrico nazionale. L'intero programma è gestito e coordinato dall'ENEA. Vi partecipa anche come co-beneficiario il Consorzio CIRTEN.

Nella prima annualità sono state coinvolte, in qualità di soggetti terzi, le società SIET (partecipata da ENEA, ENEL, Ansaldo e Politecnico di Milano) e Del Fungo Giera Energia. Nel seguito si prevede di coinvolgere anche altri soggetti terzi.

Principali risultati dell'Accordo di Programma MSE-ENEA

Nei paragrafi che seguono verranno sintetizzate le molteplici attività sviluppate nel campo nucleare nel corso del primo anno di lavoro dell'Accordo di Programma MSE-ENEA. Le attività hanno riguardato le prime quattro linee progettuali sopra citate, in quanto le restanti due, relative al supporto all'autorità di sicurezza e alla formazione e comunicazione, sono state avviate solo recentemente.

Gli studi di carattere generale

Per lo sviluppo delle attività di ricerca nel settore del nuovo nucleare da fissione è manifesta la necessità di condurre un'analisi preventiva della situazione nazionale ed internazionale. In particolare, sono necessarie una ricognizione e una valutazione delle varie iniziative e accordi di collaborazione internazionali in corso nel campo dei sistemi nucleari innovativi e dei relativi cicli del combustibile avanzati, nonché studi di inquadramento internazionale su cui innestare un programma nazionale coerente alla riapertura dell'opzione nucleare in Italia. In questo contesto è altresì opportuno effettuare analisi costo-beneficio sia in funzione della domanda energetica interna, in relazione alla situazione internazionale, sia in funzione delle varie possibilità di produzione dell'energia nucleare, in relazione alle tecnologie già disponibili o in fase di sviluppo. Altri aspetti da valutare sono quelli relativi al *siting and commissioning*, al ciclo del combustibile, ai rifiuti radioattivi prodotti, all'accettabilità da parte dell'opinione pubblica, alla capacità di valutare i vari sistemi dal punto di vista della loro resistenza alla proliferazione ecc. Al fine di fornire una sintesi a vantaggio di quanti operano nel settore nucleare o svolgono azione di orientamento e partecipano ai processi decisionali, si è ritenuto opportuno produrre un rapporto omnicomprensivo dal titolo *Nucleare da Fissione: Stato e Prospettive*^[1], che ha già ricevuto parecchi apprezzamenti dal mondo scientifico ed istituzionale.

Va sottolineato che l'elaborazione di questi studi richiede da un lato una conoscenza approfondita delle varie tematiche acquisite grazie alla partecipazione alle attività delle principali organizzazioni nucleari internazionali (IAEA, NEA, EURATOM ecc.) e, dall'altro, il contributo di diverse competenze, sia tecnico-scientifiche, appartenenti al settore della Ricerca e dell'Industria (enti, università e industrie), sia politico-amministrative, appartenenti al settore istituzionale (Ministeri, Autorità di Controllo ecc.). L'ENEA, riferimento per il Paese in tema di R&S sul nucleare da fissione, deve farsi carico dell'integrazione fra le varie competenze e soggetti coinvolti ed assicurare, nel con-

tempo, la funzione di Advisor verso le istituzioni ed i Ministeri che richiedono supporto nella definizione della policy nazionale nel campo dell'energia nucleare.

Al fine di poter valutare correttamente le diverse opzioni tecnologiche è necessario possedere ed interiorizzare strumenti per le analisi dei vari scenari di ciclo del combustibile.

Nell'ambito della partecipazione all'Expert Group "Fuel Cycles Transition Scenarios Studies – FCTS" del Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle della NEA^[2] e della collaborazione ENEA-CEA, sono stati eseguiti studi di benchmarking con il codice di scenario francese COSI 6, riferendosi a scenari europei e nazionali. Ciò ha consentito di mettere a punto il metodo con cui sono stati analizzati tre classici scenari di riferimento, ovvero:

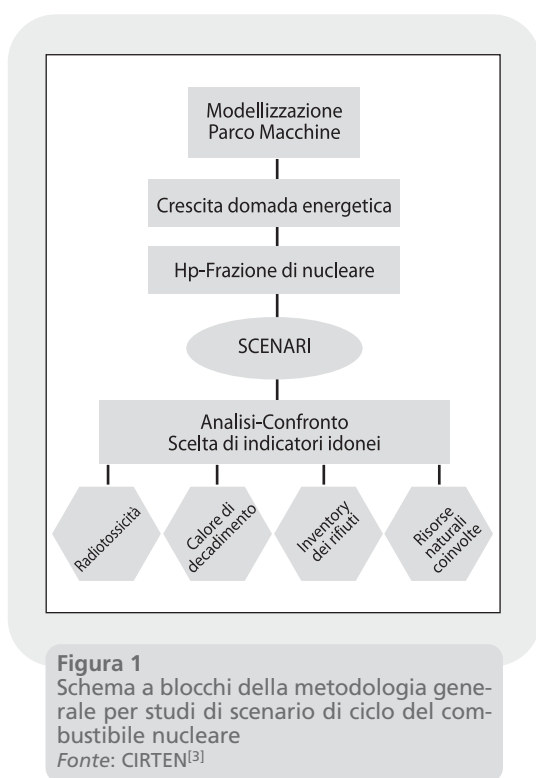
1. ciclo aperto per un parco reattori di tipo PWR;
2. "monoriciclo" del Pu per un parco reattori di tipo PWR;
3. "monoriciclo" del Pu per un parco reattori di tipo PWR con successivo impiego di reattori veloci di quarta generazione in grado di riciclare

Pu ed attinidi minori.

Inoltre il consorzio CIRTEN ha messo a punto una metodologia generale da adottare per le analisi di scenario^[3]. Il modello semplificato utilizzato, mostrato in *figura 1*, si riferisce al Belgio, ma la metodologia messa a punto sarà utilizzata per analizzare uno scenario nazionale, come ad esempio quello mostrato in *figura 2*.

Un'altra funzione fondamentale per la ripresa del nucleare in Italia è la capacità di valutazione della resistenza alla proliferazione di vari sistemi nucleari e del relativo ciclo del combustibile. Tale capacità è stata acquisita attraverso la partecipazione al progetto della IAEA denominato INPRO e al *Proliferation Resistance & Physical Protection (PR&PP) Working Group* di GIF. A tale riguardo, sono state indagate le due linee di attività su cui è attualmente impegnato il gruppo PR&PP: la finalizzazione di un caso studio su un ipotetico sistema innovativo per testare la metodologia e la futura applicazione di questa a sistemi di quarta generazione^[4]. Il sistema utilizzato come caso studio è un ipotetico reattore veloce raffreddato a sodio (ESFR – *European Sodium Fast Reactor*) assieme ad una porzione di ciclo del combustibile. La resistenza alla proliferazione è stata valutata a fronte di quattro scenari: diversione, uso improprio degli impianti e processi, furto di materiale e dichiarata volontà di uno Stato di dotarsi di armi nucleari. Sono state considerate varie configurazioni del nocciolo dell'ESFR per valutare la sensibilità della metodologia. La metodologia, una volta che questa si sia dimostrata affidabile e robusta, potrà rappresentare per i progettisti dei vari sistemi di quarta generazione un efficace strumento che permetterà di inserire, già nelle primissime fasi di progetto, quegli elementi che aumenteranno le caratteristiche di non proliferazione nel modo più efficiente e meno costoso. Per facilitare questo processo, si sono creati recentemente dei team tra i membri del gruppo di lavoro PR&PP e degli *steering committees* dei vari sistemi: il primo compito sarà la caratterizzazione dei sistemi in termini di non proliferazione e protezione fisica. L'ENEA fa parte del team che si occupa del *Lead-cooled Fast Reactor*.

Per quanto riguarda il tema assai dibattuto della



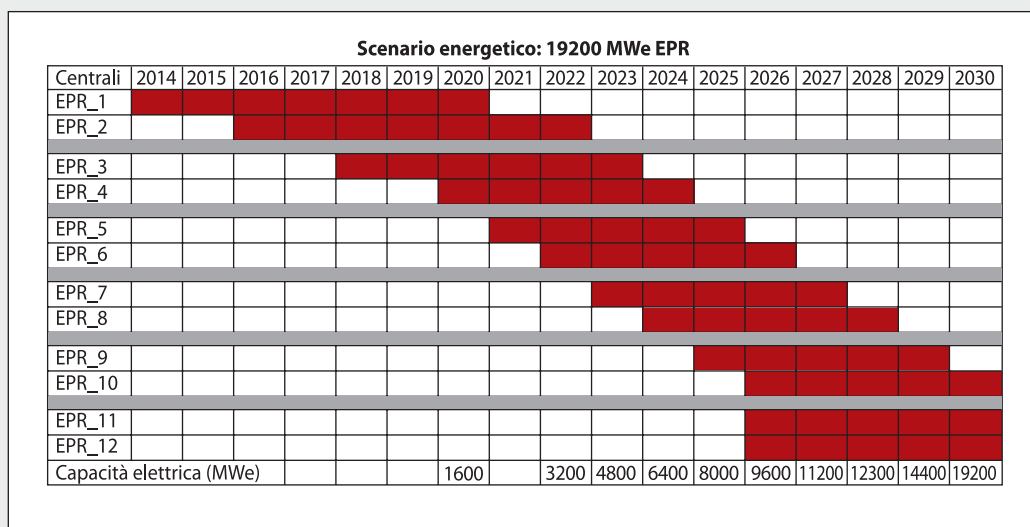


Figura 2
Possibile scenario di realizzazione di impianti ALWR di tipo EPR in Italia nel periodo 2014-2030
Fonte: ENEA^[5]

competitività ed economicità dell'energia nucleare rispetto ad altre fonti energetiche e a seconda dei diversi possibili scenari, il lavoro congiunto ENEA-CIRTEN ha consentito di mettere a punto un primo strumento di analisi, che include tanto una *mass flow analysis*, quanto una stima delle grandezze economico-finanziarie, relative a diversi scenari di *deployment* di un parco di generazione di energia nucleare nel nostro Paese^[5]. Per ogni scenario è stato stimato il profilo temporale del fabbisogno dei materiali critici e del fabbisogno finanziario per coprire l'investimento. Questo lavoro di analisi offre un metodo di confronto di due categorie di reattori: il procedimento di analisi considera dapprima scenari ipotizzanti unicamente la tipologia EPR, poi casi comprendenti un mix di reattori EPR e moduli IRIS.

L'analisi evidenzia come i consumi di uranio naturale e zirconio, entrambi legati alla fabbricazione di combustibile nucleare, aumentino quando reattori di tipologia IRIS vengano inclusi in un parco-reattori nazionale, rispetto all'utilizzo di soli reattori di grande taglia come l'EPR. Allo stesso modo, il maggiore fabbisogno specifico di acciaio di IRIS comporta una richiesta maggiore di que-

sto elemento strutturale nel periodo di *commissioning* di un parco-reattori misto. Al contrario, il fabbisogno di rame, presente solamente nella tipologia EPR, si riduce quando alcuni EPR nel parco-reattori vengano sostituiti da moduli IRIS.

A livello economico, gli scenari misti appaiono penalizzati da un costo specifico (\$/kWe) maggiore per IRIS rispetto all'EPR, peraltro legato alla perdita di economie di scala nei costi overnight di costruzione. Gli scenari misti registrano un investimento totale maggiore degli scenari relativi a soli EPR. Tuttavia, occorre ricordare che l'analisi offerta dal codice DESAE, utilizzato nelle simulazioni, non può considerare i vantaggi legati alla flessibilità intrinseca degli investimenti modulari tipici di IRIS. Maggiore è il numero di unità-reattore, maggiore è il grado di modularità dell'investimento, con la possibilità di differire o arrestare la costruzione dei moduli-reattore nel caso di condizioni sfavorevoli. In un investimento modulare il capitale-medio a rischio è minore. Queste considerazioni devono far parte di un'analisi economico-finanziaria, insieme a considerazioni sulla redditività e sull'efficienza della struttura di costo, espressa per esempio dal costo unitario di generazione (LUEC).

Ad integrazione di questo lavoro, il CIRTEN ha messo a punto un modello per l'analisi degli schemi di investimento per il *deployment* di reattori nucleari^[6]. Il modello realizzato risulta utile per la comparazione tra reattori di piccola-media taglia (SMRs) e reattori di grossa taglia e permette di simulare la *profitability* differenziale degli SMRs in riferimento a varie condizioni sia del mercato che di tipo operativo.

Infine, fra gli studi effettuati nella prima annualità dell'AdP MSE-ENEA non poteva mancare un'attività relativa a metodi innovativi per la gestione e minimizzazione dei rifiuti radioattivi. A tale riguardo, utilizzando un impianto di elettrorefinazione costruito nell'ambito di progetti comunitari di ricerca e sviluppo sulla separazione e recupero degli attinidi minori dal combustibile (*figura 3*), sono state condotte alcune campagne sperimentali che hanno riguardato i meccanismi che regolano il trasferimento delle terre rare da un bagno di bismuto fuso operante come anodo, al catodo solido immerso in bagno di sale, dal quale posso-

no essere successivamente separati. La finalità era quella di ripulire il metallo fuso. I risultati delle campagne sperimentali^[7] hanno dimostrato che è possibile rimuovere la maggior parte dei metalli inquinanti simulanti gli attinidi minori.

Lo sviluppo in Italia dei reattori evolutivi di generazione III+

I reattori evolutivi sono caratterizzati, rispetto agli attuali sistemi, da: maggiore standardizzazione e semplificazione del progetto, minor vulnerabilità ai malfunzionamenti operativi, vita più lunga, riduzione del rischio di fusione del nocciolo, miglior sfruttamento del combustibile e riduzione del volume di rifiuti ad alta radioattività e lunga vita. IRIS appartiene alla classe di reattori evolutivi di cui si prevede la messa in commercio entro i prossimi 10-15 anni (sistemi INDT – *International Near Term Deployment*) ed è sviluppato da un ampio consorzio internazionale guidato da Toshiba-Westinghouse, con 20 partner (università, industrie, enti di ricerca e utility) di 10 paesi (USA, Brasile, Croazia, Giappone, Italia, Messico, Spagna, Regno Unito, Lituania ed Estonia). È un reattore pressurizzato modulare da 335 MWe che ospita all'interno del vessel i componenti del circuito primario – generatori di vapore, pompe, pressurizzatore e meccanismi di azionamento delle barre di controllo (*figura 4*). La maggior sicurezza è dovuta all'eliminazione delle grandi tubazioni del circuito primario (l'88% degli incidenti di classe IV viene eliminata all'origine: il concetto di sicurezza applicato prende il nome di *safety-by-design*TM) e, soprattutto, al mantenimento dell'equilibrio tra le pressioni del sistema primario e del sistema di contenimento, che interrompe la perdita di refrigerante dal vessel in caso di *Loss-of-Coolant-Accident* (LOCA).

L'ENEA ha sottoscritto con i partner italiani già presenti nell'IRIS Team (CIRTEN, Ansaldo Nucleare e Mangiarotti Nuclear) una dichiarazione di intenti per lo sviluppo congiunto del progetto, e firmato un accordo di cooperazione su IRIS con l'Oak Ridge National Laboratory (ORNL) del Department of Energy (DOE) americano. Nel 2007, inoltre, l'Italia ha aderito all'iniziativa in-

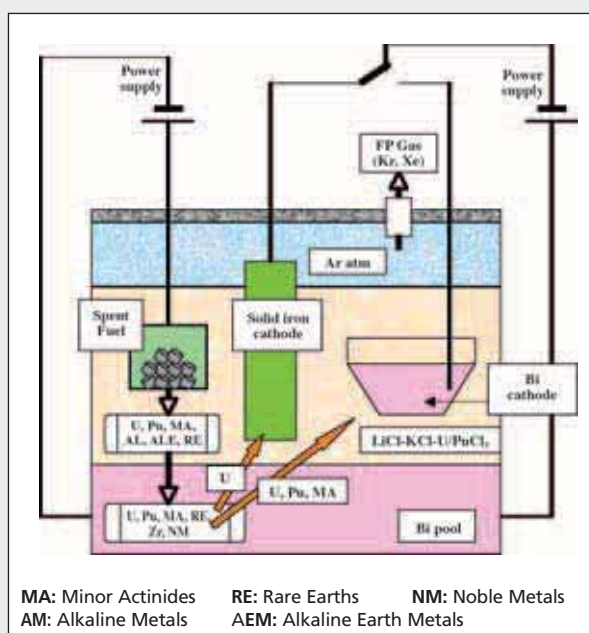


Figura 3
Diagramma schematico del processo di elettrorefinazione
Fonte: ENEA^[7]

ternazionale GNEP (Global Nuclear Energy Partnership) rivolta, in particolare, allo sviluppo di sistemi nucleari avanzati di piccola-media taglia¹ per venire incontro alle necessità energetiche dei paesi in via di sviluppo, impedendo la diversione o la produzione non dichiarata di materiali nucleari. IRIS è il reattore esempio di piccola taglia per la GNEP.

L'attività più rilevante portata avanti in ambito AdP a supporto di IRIS è costituita da una prova integrale di sistema e sicurezza riguardante l'intero impianto, fondamentale per la certificazione del reattore presso una Autorità di sicurezza. A tale scopo occorre realizzare un impianto sperimentale, denominato SPES-3, in grado di simulare i transitori operativi ed incidentali del reattore IRIS (piccoli LOCA, rottura delle linee vapore ecc.), al fine di produrre dati sufficienti per la validazione dei codici di calcolo per l'analisi di sicurezza e studiare l'accoppiamento termo-fluidodinamico tra il contenimento e l'impianto durante un LOCA.

L'attività del primo anno ha riguardato principalmente la progettazione dell'impianto sperimentale da realizzare presso la Società SIET (figura 5). È stata definita la configurazione impiantistica sulla base di una serie di requisiti concordati con Westinghouse ed è stato eseguito il dimensionamento meccanico, termico ed idraulico dei componenti. L'impianto simula, in scala 1:100 in volume e a piena altezza, tutti i sistemi di raffreddamento e di sicurezza del reattore IRIS.

Per semplificare il progetto, la configurazione integrale del reattore IRIS è stata mantenuta solo per il sistema primario di SPES-3, ad eccezione della pompa primaria che è posta all'esterno del recipiente in pressione (figura 6); il contenimento e i sistemi di sicurezza sono simulati con serbatoi connessi da tubazioni (figura 5). Il prodotto finale è il dossier di progettazione^[8] da utilizzarsi per l'approvvigionamento delle parti dell'impianto (tubazioni, valvole, serbatoi ecc.) e per la realizzazione della struttura portante. L'attività di

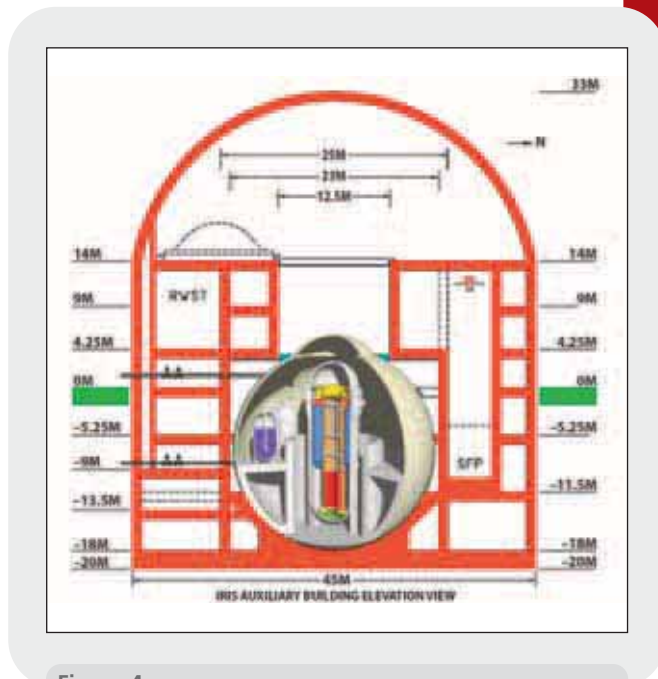


Figura 4
Impianto IRIS
Fonte: Westinghouse Electric Company LLC

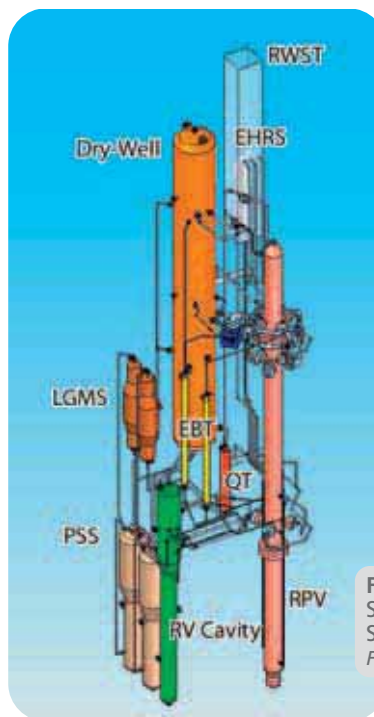


Figura 5
Schema dell'impianto
SPES-3
Fonte: SIET

1. Circa un terzo dei reattori nel mondo rientra in tale tipologia; un reattore è in genere considerato di piccola taglia se la potenza è <300 MWe e di media taglia se la potenza è <700 MWe.

progettazione 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^[9] sia sulla verifica della capacità dell'impianto sperimentale di simulare i transitori incidentali. Per la strumentazione sono state affrontate le problematiche della scelta e qualificazione dei metodi di misura nelle condizioni operative di pressione e temperatura per le grandezze di interesse (portata, densità, grado di vuoto, flow pattern). In particolare, sono state valutate le potenzialità e prestazioni degli strumenti commerciali o sviluppati da laboratori internazionali. Inoltre sono stati sviluppati dall'ENEA sensori a termoresistenza con la relativa elettronica per misure di velocità del fluido^[10]. In parallelo alla progettazione dell'impianto sperimentale SPES-3, sono stati sviluppati alcuni componenti principali di IRIS quali gli scambiatori immersi ed il generatore di vapore. Tali componenti sono stati selezionati sia per l'esperien-

za che il sistema Italia può vantare per il loro sviluppo, sia per poter assicurare commesse agli operatori industriali nazionali nella fase realizzativa di reattori IRIS.

Per gli scambiatori immersi è stata sviluppata una correlazione di scambio termico basata sulla teoria della condensazione a film su parete, validata con le precedenti esperienze (PERSEO) da ENEA e da SIET su prototipo in scala reale di un condensatore a tubi verticali^[11]. Tale correlazione è stata implementata nel codice di sistema RELAP5^[12].

Per i tubi elicoidali dei generatori di vapore di IRIS sono state sviluppate e validate correlazioni, successivamente implementate nel codice RELAP5, per valutare le perdite di carico e lo scambio termico in condizioni di crisi termica (*dryout*) e *post-dryout* sia con dati sperimentali che con dati reperibili in letteratura^[13,14,15,16,17].

Le prove sperimentali sono state eseguite presso l'area sperimentale della SIET (*figura 7*) e presso il CIRTEN. Sono anche state eseguite analisi

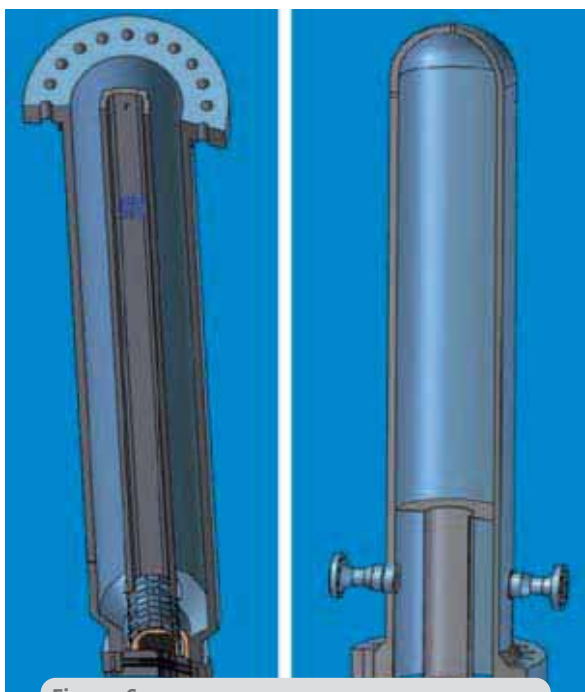


Figura 6
Sezione del fondo e della parte alta del vessel di SPES-3
Fonte: SIET



Figura 7
Impianto sperimentale presso SIET per la caratterizzazione termofluidodinamica dei tubi elicoidali del GV di IRIS
Fonte: SIET

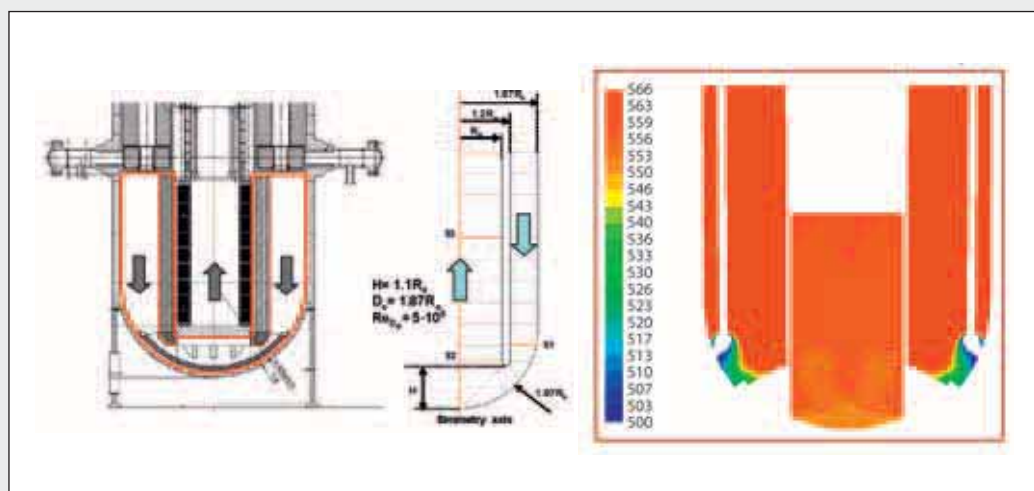


Figura 8
Miscelamento del boro nella parte bassa del vessel di IRIS, risultati della simulazione
Fonte: CIRTEN

meccaniche per la valutazione del carico di collasso di tubi elicoidali. I risultati delle analisi meccaniche 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 raggiunto a supporto della progettazione del *downcomer* e del lower plenum del reattore IRIS riguarda lo sviluppo di modelli non lineari di turbolenza per superare alcune delle limitazioni dei codici CFD (*Computational Fluid Dynamics*) commerciali, oltre alla messa a punto di protocolli di accuratezza per raggiungere standard elevati, riproducibili e tracciabili^[18]. 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 del miscelamento di temperatura e boro (*figura 8*) a supporto della progettazione di una apparecchiatura sperimentale (fattore di scala 1:5), che simula il *downcomer* e la parte bassa del vessel di IRIS^[19].

Un'attività per la quale il sistema italiano ha sempre vantato un credito internazionale, ha riguardato le analisi sismiche e la progettazione di iso-

latori sismici per IRIS. Il lavoro si è concretizzato:

- nello sviluppo di una nuova procedura per il calcolo della probabilità di rottura al sisma, basata su tecniche numeriche consolidate (*Finite Element Method, Montecarlo ecc.*) e capace di eliminare o ridurre le incertezze dei metodi tradizionali^[20];
- nella riduzione degli effetti del sisma sugli edifici e sui componenti interni con l'utilizzo di isolatori sismici^[21]. Sono state definite le dimensioni geometriche degli isolatori, il fattore di forma, il tipo di mescola, il loro numero e la disposizione, che deve prevedere anche l'accessibilità per l'ispezione e l'eventuale sostituzione. È stato valutato il comportamento dell'edificio isolato e non isolato sismicamente al terremoto di progetto (*figura 9*). È stata anche effettuata una valutazione preliminare dei costi connessi all'utilizzo di questa tecnologia.

Infine, l'attività sui reattori di generazione III+ è stata complementata con lo studio e la progettazione di noccioli che consentano sia un incremento del tasso di irraggiamento rispetto ai reattori di II Generazione, sia la possibilità di estendere il periodo di irraggiamento tra successive ricariche. In particolare è stato analizzato un nocciolo di

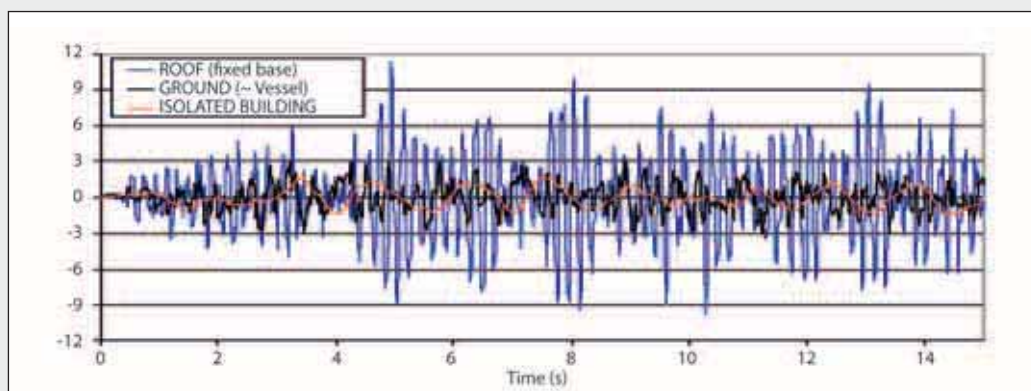


Figura 9
Sistema isolato e non isolato sismicamente
Fonte: ENEA

reattore pressurizzato ad acqua leggera idoneo a produrre una potenza termica dell'ordine dei 600 MW (circa 220 MWe)^[22]. Il principale risultato è la definizione di un nocciolo con uno schema di ricarica del combustibile a ciclo unico (*once-through*), che offre la possibilità di gestire il reattore con contratti di leasing del combustibile, con importantissimi risvolti per quel che riguarda la difesa dal rischio di proliferazione.

Le attività italiane di R&S per lo sviluppo dei reattori di IV generazione

I reattori di IV generazione sono sistemi ancora allo stadio concettuale, che potranno divenire operativi all'orizzonte del 2040. A livello internazionale, la R&S a supporto dei sistemi di IV generazione è portata avanti primariamente in ambito GIF (*Generation IV International Forum*, fondato nel 2000 dal *Department of Energy* degli Stati Uniti), ma anche in altre iniziative quali INPRO (*International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*) e GNEP (*Global Nuclear Energy Partnership*), promossi rispettivamente dalla IAEA e dall'amministrazione americana. Per maggiori dettagli sul nucleare di IV generazione si rimanda all'articolo a pag. 74.

In questo contributo ci si sofferma sulle attività svolte nell'ambito dell'AdP MSE-ENEA, che si concentrano, in particolare, su due dei sei siste-

mi selezionati dal GIF, ovvero il LFR (*Lead-Cooled Fast Reactor*) ed il VHTR (*Very-High-Temperature Reactor*), che sembrano particolarmente adatti a valorizzare le competenze e le infrastrutture di ricerca presenti in Italia.

Attività relative allo sviluppo del LFR

Un sistema chiave per la sicurezza del LFR è il *Decay Heat Removal System* (DHR). Tale sistema è stato sviluppato dal punto di vista concettuale nell'ambito del sopracitato progetto europeo ELSY, ma la relativa prova di una sezione sperimentale di DHR è prevista fra le attività a supporto del LFR incluse nell'AdP MSE-ENEA. Sulla base della specifica funzionale di prova è stato sviluppato il progetto della sezione di prova da installare nell'impianto CIRCE presso il Centro ENEA Brasimone (*figura 10*). Il componente prototipico DHR, frutto della collaborazione tra ENEA, l'operatore industriale Del Fungo Giera Energia SpA ed il CIRTEN, è costituito essenzialmente da un fascio di tubi a baionetta immerso in un bagno di piombo fuso (*figura 11*).

Una soluzione come quella proposta, caratterizzata da una doppia parete metallica con intercapedine riempita in elio, interposta tra il primario ed il secondario negli elementi di scambio termico dello scambiatore immerso, permette di

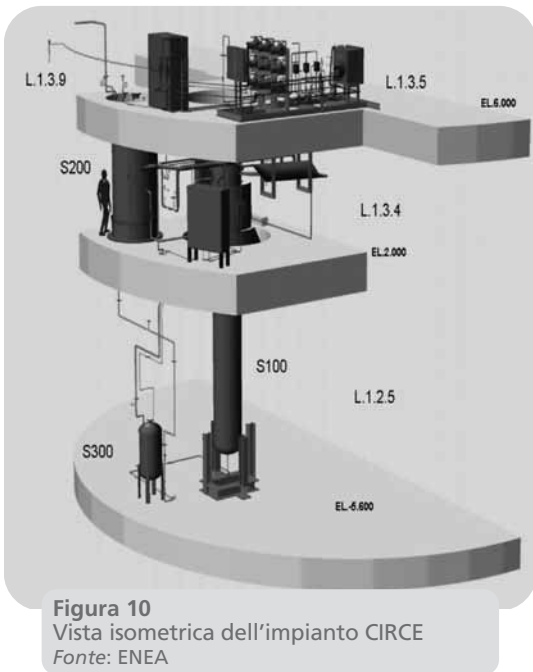


Figura 10
Vista isometrica dell'impianto CIRCE
Fonte: ENEA

ottenere una barriera costituita da due pareti meccanicamente indipendenti, ciascuna delle quali dimensionata per resistere da sola ai carichi imposti. Si ottiene nel contempo un mezzo di monitoraggio in continuo, durante il funzionamento, dell'integrità di ciascuna delle due pareti, grazie al riempimento dell'intercapedine in elio. L'attività sperimentale è volta a qualificare il componente monitorando: portata, pressione e temperatura dell'acqua all'ingresso dello scambiatore; sovrappressione all'uscita dello scambiatore (sulla testata) determinata dalle perdite di carico rispetto all'atmosfera, portata e temperatura del vapore prodotto^[23 e 24].

Una delle possibili configurazioni dei LFR presenta un circuito primario di tipo a piscina con circolazione forzata del fluido refrigerante (piombo) realizzata mediante un sistema di pompaggio meccanico. La girante di queste pompe si troverà ad operare in un ambiente particolarmente ostile: piombo fluente con velocità relativa dell'ordine di 10m/s alla temperatura di 500 °C circa. Il corpo pompa sarà quindi soggetto a fenomeni di corrosione/erosione combinati. Nell'ambito della qualifica sperimentale di un componente primario di tale importanza, si è dunque ritenuto

necessario progettare un prototipo di girante da realizzare con un materiale che presentasse elevata resistenza a corrosione/erosione. Il composto ternario Ti_3SiC_2 selezionato è stato testato attraverso una campagna sperimentale. Non si sono riscontrate né formazioni di ossidi superficiali né dissoluzione del materiale nel metallo liquido; il piombo non è penetrato attraverso le porosità aperte del Ti_3SiC_2 . È stata realizzata una girante interamente in Ti_3SiC_2 (figura 12) mediante lavorazione meccanica e elettroerosione, con ottimi risultati^[25].

In un LFR la concentrazione di ossigeno disciolto nel metallo liquido è un parametro di vitale importanza; il suo controllo permette di evitare la formazione di PbO , che causerebbe la solidificazione irreversibile dell'intero sistema e, al contempo, permette di gestire la formazione di ossidi di ferro superficiali sulla superficie degli acciai strutturali, evitandone la corrosione. Lo studio della chimica di questo tipo di refrigeranti ha due fondamentali aree di applicazione: a) l'analisi della reale composizione delle impurezze nel sistema e lo sviluppo di efficaci meto-

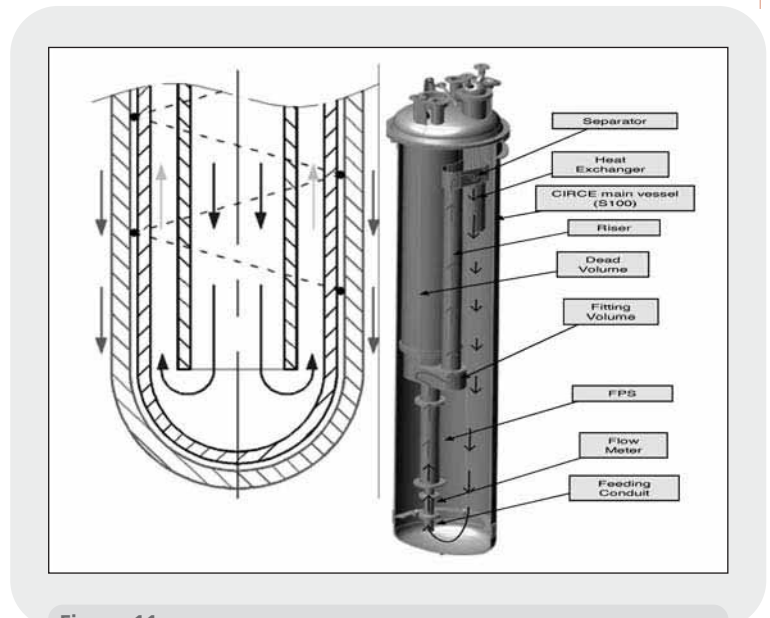


Figura 11
Schema di un elemento scambiatore a tre pareti e sezione di prova del DHR del LFR
Fonte: ENEA



Figura 12
girante della pompa primaria di un LFR, interamente realizzata in Ti_3SiC_2
Fonte: ENEA

diche di campionamento; b) l'applicazione di tecniche sviluppate in laboratorio o in circuiti dedicati a sistemi più realistici a piscina. La prima attività ha portato interessanti risultati sulla composizione delle impurezze solide in Pb e PbBi, con anche sviluppo e miglioramento di sistemi di filtrazione. La seconda attività ha portato ad un primo prototipo di sistema integrato di controllo e monitoraggio dell'ossigeno nel sistema a piscina CIRCE, nel quale vengono testati sensori elettrochimici precedentemente qualificati in impianti a loop^[26].

Le attività sperimentali a supporto della progettazione del LFR di IV generazione sono state affiancate da due importanti sviluppi teorici, ovvero:

- Lo sviluppo di un codice di termofluidodinamica per noccioli a piombo con elementi di combustibile non inscatolati^[27, 28 e 29]. Dapprima si è ricorso ad un modello mono-dimensionale a canali indipendenti per una verifica dal punto di vista della termofluidodinamica e della sicurezza del progetto neutronico; successivamente è stato sviluppato uno strumento di calcolo per la valutazione degli effetti di mescolamento tra gli elementi per rimuovere l'eccessivo conservatorismo nelle analisi precedenti. L'obiettivo di poter disporre di un potente strumento di calcolo per la progettazione termofluidodinamica di un nocciolo di LFR è stato raggiunto grazie a: a) lo sviluppo di un modulo CFD per la risoluzione delle equazioni di Na-

vier-Stokes e dell'energia a livello di *sub-assembly*; b) la costruzione di un modello 3D di nocciolo a piombo con elementi non inscatolati e relativo confronto con modello 1D multi-canale; c) la simulazione CFD dettagliata di limitate regioni per una stima della viscosità turbolenta media e dei coefficienti di scambio d'energia tra *sub-assemblies*.

- La definizione concettuale del nocciolo dell'impianto dimostrativo (DEMO) di un LFR^[30 e 31]. L'attività è consistita in studi di neutronica per la definizione concettuale del nocciolo di un reattore dimostrativo refrigerato a piombo, nonché nelle analisi combinate di neutronica e termoidraulica per la sua integrazione nel sistema primario. Sono state definite varie configurazioni di nocciolo DEMO per differenti valori dei parametri di riferimento e, in particolare, della temperatura massima della guaina del combustibile, da un lato per riprodurre le caratteristiche fondamentali dell'impianto LFR di taglia industriale e, dall'altro, per massimizzare il flusso neutronico ed effettuare nel DEMO prove di irraggiamento su materiali e combustibili avanzati per LFR.

Attività relative allo sviluppo del VHTR

Per quanto riguarda il VHTR di IV generazione, le attività si sono focalizzate su alcune prove in regime transitorio sull'impianto He-Fus3 dell'ENEA Brasimone (figura 13) e relative interpretazioni mediante codici di calcolo, funzionali allo sviluppo dello scambiatore He-He di questo reattore.

Scopo della campagna sperimentale era di fornire una base di dati sperimentali attendibili per la validazione dei codici di calcolo termo-idraulici per la progettazione e l'analisi di sicurezza dei reattori ad alta temperatura refrigerati a gas (VHTR). A tal fine sono state progettate e realizzate le necessarie modifiche meccaniche ed elettro-strumentali all'impianto ad elio HE-FUS3. Sono state effettuate prove sia in regime stazionario sia in regime transitorio (simulazione di eventi incidentali). Partendo da condizioni stazionarie del circuito, sono stati realizzati quattro transitori simulanti 4 diversi eventi incidentali: due *Loss Of Flow Accident* (LOFA) e due *Loss Of Coolant Accident* (LOCA). L'atti-



Figura 13
 Impianto He-Fus3 dell'ENEA Brasimone
 Fonte: ENEA

vità sperimentale è stata accompagnata da analisi numeriche di pre e post-test dei transitori effettuati sull'impianto HE-FUS3^[32 e 33]. Infine, è stata effettuata un'estesa campagna di simulazioni, con metodi sia Monte Carlo sia di tipo deterministico,

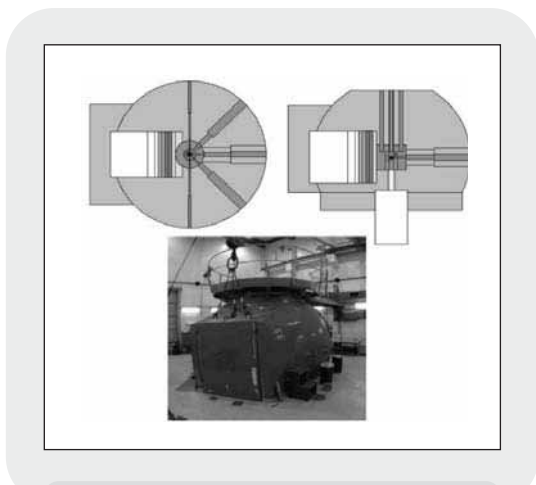


Figura 14
 Viste pianta e laterale del modello MCNPX del Reattore TAPIRO e confronto con il sistema reale
 Fonte: ENEA

che ha permesso la progettazione di un set-up di prova e la definizione di una matrice di test, per l'analisi di interfaccia core-riflettore di reattori VH-TR^[34 e 35]. La sezione sperimentale progettata potrebbe essere collocata nel vano colonna termica del Reattore di ricerca Tapiro dell'ENEA Casaccia (figura 14). La realizzazione di una tale *facility* permetterebbe di realizzare flussi neutronici con distribuzione energetiche tipiche dei reattori a gas ad alta temperatura e di misurare le variazioni di tali flussi nell'attraversamento di sezioni di prova contigue di ferro, uranio e grafite. Le geometrie implementate, sebbene eterogenee, sono volutamente semplici in modo da poter essere riprodotte con facilità dai codici deterministici nell'ambito di un benchmark in via di definizione.

La corretta gestione dei rifiuti radioattivi in Italia

Il problema di una strategia globale per il *decommissioning* degli impianti nucleari dismessi e la sistemazione dei rifiuti radioattivi in Italia, fu posto alla prima conferenza nazionale organizzata nel 1995 dall'ANPA (oggi ISPRA) sul tema e riproposto nell'analoga conferenza del 1997. Nel 1998 l'allora Ministro dell'Industria costituì il "Tavolo nazionale per la gestione degli esiti del nucleare", al quale partecipavano Regioni, enti locali, organizzazioni sindacali, ENEL, ANPA ed ENEA. Nel 1999 fu approvato un Accordo di Programma Stato-Regioni riguardante la gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi; la strategia nazionale fu definita con il documento "Indirizzi strategici per la gestione degli esiti del nucleare in Italia". Fu contestualmente istituito un Gruppo di Lavoro (Commissione Cenerini) con il compito di delineare lo stato dell'arte su studi e ricerche relativi ai depositi e le iniziative e procedure necessarie per la scelta del sito. La Commissione concluse le attività nel 2001 con la redazione di un "Rapporto per la conferenza Stato/Regioni". Il problema di una strategia nazionale in questo settore è stato riproposto al tavolo MSE-Regioni nell'ottobre 2007. Un Gruppo di Lavoro, composto da rappresentanti del Governo, delle Regioni e da altri esperti (tra cui uno ENEA), è stato costituito con il compito di elaborare un metodo per

definire le caratteristiche dell'insediamento per un deposito superficiale e dare indicazione sui criteri di selezione dei siti. Il GdL ha concluso i suoi lavori nel settembre 2008 con la consegna del Rapporto Finale al Ministro dello Sviluppo Economico. Il GdL Stato-Regioni, in cui già era presente un rappresentante ENEA, ha chiesto la collaborazione di altri due esperti ENEA per due sottogruppi con tematiche specifiche^[36]:

- "Centro Servizi", per individuare natura e tipologia delle infrastrutture da realizzare nel sito, sia quelle relative al deposito sia quelle in grado di conferirgli il carattere di Parco Tecnologico per attività multidisciplinari;
- "Legislazione e Normativa", per individuare il regime di responsabilità nella varie fasi, effettuare stime dei costi di realizzazione, riordinare la normativa sui rifiuti nucleari.

Per meglio supportare il decisore politico e al fine di evitare la perdita di importanti informazioni acquisite in decine di anni di intenso lavoro, nell'ambito dell'AdP MSE-ENEA è stato ricostruito un archivio della documentazione prodotta in passato sul tema della gestione dei rifiuti radioattivi prodotti in Italia ed effettuata un'analisi critica dei documenti ritenuti più significativi per valutare le necessità di aggiornamento. In particolare, è stata effettuata una disamina, sia dal punto di vista normativo, sia operativo, della situazione internazionale e italiana^[37]. Sono state individuate le problematiche connesse allo smaltimento, le scelte operate a livello internazionale ed il percorso attualmente in atto in Italia per la scelta del sito di deposito. Sebbene lo smaltimento geologico delle scorie radioattive a lunga vita non rientri tra gli obiettivi attuali, si è ritenuto opportuno riassumere le attività svolte in passato dall'ENEA sul tema, al fine di non disperdere i risultati acquisiti e renderli fruibili qualora il nostro Paese dovesse optare per una soluzione di questo tipo nel prossimo futuro per i rifiuti ad alta attività e lunga vita^[38]. È stata anche effettuata un'analisi critica del Rapporto della Commissione Cenerini, per molti aspetti straordinariamente attuale. È stata infine condotta un'analisi delle attività tecnico-scientifiche effettuate tra il 1996 e il 2003 dall'ENEA e le iniziative più significative del periodo^[39]. I lavori della

Task Force Sito dell'ENEA sono stati numerosi e, già alla fine degli anni '90, fu elaborato un primo progetto concettuale del sito di smaltimento superficiale con sistema multibarriera; in quel periodo la Task Force elaborò una metodologia di selezione geografica delle aree potenzialmente idonee ad ospitare l'insediamento, basandosi su una serie di stringenti criteri di esclusione, con un approccio che ha ancora una sua validità intrinseca e potrebbe quindi essere riproposto con gli opportuni aggiornamenti tecnici e scientifici.

L'ultimo "Inventario Nazionale dei Materiali Radioattivi" prodotto dall'ENEA risale all'anno 2000 (figura 15); da allora l'unico inventario disponibile è quello dell'ISPRA (ex APAT). L'ISPRA raccoglie le informazioni sui rifiuti radioattivi fornite dagli esercenti in un apposito database che rappresenta solo una "fotografia" dell'esistente, ma non effettua, in quanto non di sua competenza, l'elaborazione dei dati ai fini dello stoccaggio definitivo.

Nel corso del 2008 è stato raggiunto un accordo di reciproco interesse tra ISPRA ed ENEA per l'elaborazione da parte ENEA dei dati a tale scopo. L'ENEA ha provveduto ad elaborare i dati sulla base di ipotesi di condizionamento (laddove non già condizionati), al fine di pervenire all'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi condizionati, cioè già idonei per il deposito di smaltimento^[40]. Inoltre l'ENEA ha elaborato una stima dei rifiuti di futura produzione da smantellamento degli impianti dismessi, basandosi sia su informazioni provenienti dagli esercenti sia su stime fatte in proprio.

Relativamente alla caratterizzazione dei rifiuti radioattivi da conferire al deposito, si è provveduto all'elaborazione di procedure di massima per la loro caratterizzazione radiologica e chimico-fisica e di criteri operativi preliminari per l'accettabilità al deposito, identificando anche le tecniche distruttive e non distruttive più idonee e la migliore strumentazione attualmente disponibile sul mercato^[41]. Inoltre, è stata effettuata una definizione concettuale dell'insieme integrato di infrastrutture, tecnologie e servizi necessari per la caratterizzazione dei rifiuti radioattivi ai fini del conferimento al deposito.

Il contributo dell'ENEA e del CIRTEN alle analisi propedeutiche alla progettazione del deposito dei

rifiuti radioattivi ha riguardato, in una prima fase, l'individuazione dei requisiti minimi del sito e dei criteri di progetto sulla base dei requisiti di sicurezza stabiliti dalla IAEA^[42].

Sono stati anche identificati gli studi, già parzialmente effettuati in passato, relativi a scenari, analisi territoriali, performance assessment, sicurezza dell'installazione, quadro normativo e di radioprotezione, migrazione dei nuclidi, livelli di sicurezza da garantire nel medio e lungo termine, implicazioni territoriali ed ambientali ecc.

È stato fortemente coinvolto il Politecnico di Milano per l'avvio di studi sulla modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive del deposito e di una metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione ed operazione del deposi-

to stesso^[43]. Un ulteriore contributo di approfondimento è stato fornito dall'Università di Roma La Sapienza in relazione alla caratterizzazione dei siti ed ai criteri di progettazione dei depositi, con analisi dei principali processi di rilascio e migrazione dei radionuclidi^[44].

Il tema assai attuale della gestione dei rifiuti radioattivi è stato infine complementato con la redazione di una serie di importanti linee guida riguardanti:

- Il trasporto dei rifiuti radioattivi. In tale ambito sono state identificate le soluzioni tecniche più idonee per il trasporto dei rifiuti radioattivi condizionati dai siti di produzione al deposito nazionale^[45]. E sono state effettuate alcune simulazioni numeriche per la valutazione degli indici di rischio relativi ad un trasporto nucleare.

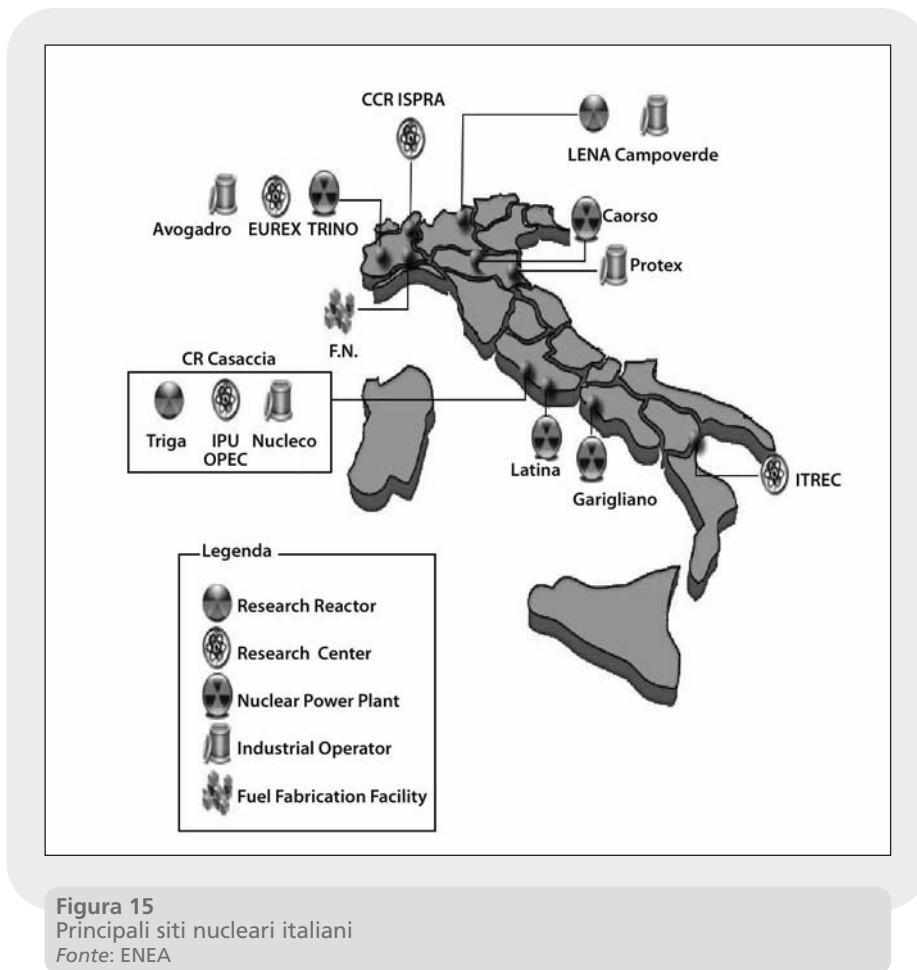


Figura 15
Principali siti nucleari italiani
Fonte: ENEA

- La security. Sulla base dell'esperienza internazionale e con riferimento a documenti di indirizzo emessi da organismi internazionali qualificati (IAEA, OECD-NEA, UE) sono state identificate, in via preliminare, le problematiche di security correlate con il deposito dei rifiuti radioattivi e le relative soluzioni tecniche e procedurali da sviluppare^[46].
- La comunicazione, l'informazione e la formazione. Sulla base dell'esperienza internazionale e con riferimento a indicazioni di organismi internazionali qualificati (IAEA, OECD-NEA, UE) sono proposte le linee guida per la

definizione di un piano di azioni per informare, coinvolgere ed ottenere il consenso del pubblico (vedi articolo pag. 82). L'obiettivo non è quello di esaurire l'argomento o di definire un piano di dettaglio, ma piuttosto di evidenziare la complessità del problema e la necessità di pianificare e attuare strategie adeguate, coinvolgendo esperti e portatori di interesse in qualche modo coinvolti nella scelta del sito e nella realizzazione del deposito. L'argomento è stato sviluppato anche dal CIRTEN^[47] ed esteso alla problematica della formazione necessaria per gli addetti ai lavori^[48].

Bibliografia

- [1] S. Monti, et al., *Nucleare da Fissione: stato e prospettive*, ENEA FOCUS 2008 Sviluppo Sostenibile.
- [2] G. Grasso, S. Monti, M. Sumini, *NEA-WPFC/ FCTS benchmark for fuel cycle scenarios study with COSI6*, Report RSE/2009/136.
- [3] G. Forasassi, B. Vezzoni, *Analisi di scenari energetici: introduzione di reattori nucleari innovativi*, Report RSE/2009/141.
- [4] F. Padoani, *Metodologie per la valutazione della resistenza alla proliferazione di sistemi innovativi: sviluppo e applicazione*, Report RSE/2009/138.
- [5] S. Boarin, M. Cerini, M. Ricotti, F. Vettrano, *Studi di scenario ed estensione del modello economico-finanziario per la realizzazione di un parco reattori nucleari nell'orizzonte 2020-2030*, Report RSE/2009/139.
- [6] P. Trucco, P. Garrone, M. Mancini, A. Trianni, G. Locatelli, M. Ricotti, S. Boarin, *Modello per la valutazione economico-finanziaria di reattori nucleari di taglia mediolpiccola e sue applicazioni*, Report RSE/2009/140.
- [7] G. De Angelis, *Elettroraffinazione di lantanidi mediante impianto pilota Pyrel II*, Report RSE/2009/142.
- [8] R. Ferri, C. Congiu, *Conceptual design of SPES3-IRIS Facility*, Rapporto ENEA FPN - P9LU - 009.
- [9] C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, A. Mosetto, B. Panella, *Analysis of the two-phase flow meters and densitometers with reference to the SPES-3 facility*, Report RSE/2009/74.
- [10] M. Furrer, M. Presaghi, F. Romanello, A. Scotini, M. Sica, *Progettazione realizzazione e sviluppo di una catena di misura anemometrica*, Report RSE/2009/143.
- [11] F. Bianchi, P. Meloni, F.S. Nitti, *Analysis of thermal-hydraulic performance of IRIS/SPES 3 EHRs condenser with an appropriate RELAP5 model*, Rapporto ENEA FPN-P9LU-020.
- [12] M. Ricotti, D. Papini, A. Cammi, D. Grgic, *Modeling of condensation phenomena for passive safety systems and implementation in the thermal-hydraulic code RELAP5*, Rapporto CIRTEN POLIMI RL-1121/2008.
- [13] M. Ricotti, L. Santini, A. Cioncolini, *Prove termoidrauliche in piena scala per la caratterizzazione delle perdite di carico bifase in tubi elicoidali per il GV di IRIS*, Rapporto CIRTEN POLIMI RL-1123/2008.
- [14] M. Ricotti, L. Santini, D. Papini, *Prove termoidrauliche a piena scala per la caratterizzazione della crisi termica in tubi elicoidali per il generatore di vapore di IRIS*, Rapporto CIRTEN POLIMI RL-1125/2008.
- [15] C. Bertani, M. De Salve, N. Malandrone, B. Panella, M. Orio, *Analisi di dati sperimentali relativi ai deflussi bifase in condotti elicoidali e confronto con i modelli teorici*, Rapporto CIRTEN POLITO RL-1251/2008.
- [16] A. Caronia, et al., *Modellazione numerica del campo di moto e dello scambio termico in condotti elicoidali*, Rapporto CIRTEN UNIPA RL-1201/2008.
- [17] A. Caronia, et al., *Studio con il codice RELAP5 dello scambio termico delle perdite di carico in generatori di vapore a tubi elicoidali*, Rapporto CIRTEN UNIPA RL-1202/2008.
- [18] E. Colombo, F. Inzoli, M. Ricotti, R. Mereu, *Analisi fluidodinamica del downcomer di IRIS, implementazione di modelli di turbolenza e messa a punto di protocolli di accuratezza per analisi CFD*, Report RSE/2009/75.
- [19] N. Forgione, F. Oriolo, W. Ambrosini, A. Manfredini, F. Martiello, G. Simoncini, *Mixing Phenome-*

- na in the IRIS Reactor Vessel: Analysis of Phenomena and Preliminary Design of a Facility, Rapporto CIRTEN UNIPI RL-1074/2009.
- [20] S. De Grandis, M. Domaneschi, F. Perotti, *Calcolo delle probabilità di rottura (fragility curves) e sviluppo di una metodologia innovativa e sua applicazione all'edificio del reattore IRIS*, Report RSE/2009/76.
- [21] F. Forni, A. Poggianti, A. Martelli, *Preliminary design of the seismic isolation system for the nuclear power plant IRIS*, Rapporto ENEA ACS-P9LU-001.
- [22] S. Caterino, M. Frullini, A. Gandini, A. Naviglio, *Verifiche neutroniche relative a due modelli di nocciolo per reattore PWR con gestione del combustibile a 4 cicli di ricarica e a ciclo unico di irraggiamento*, Report RSE/2009/77.
- [23] W. Ambrosini, N. Forgiione, F. Oriolo, D. Pellini, *Analisi semplificata del transitorio conseguente all'ipotetica rottura di uno dei tubi del DHR tramite il codice SIMMER III*, Report RSE/2009/79.
- [24] W. Ambrosini, N. Forgiione, F. Oriolo, S. Palazzo, *Esecuzione di calcoli di pre-test della sezione di prova W-DHR dell'impianto ENEA CIRCE*, Report RSE/2009/80.
- [25] M. Utilli, S. De Grandis, *Realizzazione girante pompa e test in piombo*, Report RSE/2009/81.
- [26] A. Gessi, *Descrizione di sistemi di purificazione e controllo dell'ossigeno per sistemi a piscina*, Report RSE/2009/82.
- [27] W. Ambrosini, N. Forgiione, F. Oriolo, D. Rosa, M.B. Sharabi, *CFD Analysis for Fuel Bundles in Reactors Cooled by Liquid Metals*, Rapporto CIRTEN UNIPI RL-1072/2008.
- [28] M. Polidori, *Set Up and Preliminary Assessment of a 3D Numerical Model for the Thermo-Fluid Dynamics Analysis of an Open Square Lattice Core of a Lead Cooled Reactor*, Report RSE/2009/84.
- [29] A. Cervone, M. Manservigi, *A Three-Dimensional CFD Program for the Simulation of the Thermo-Hydraulic Behaviour of an Open Core Liquid Metal Reactor*, Report RSE/2009/85.
- [30] H. Song, S. Dulla, P. Ravetto, *Neutronic Methods for Core Calculations of the LFR Innovative Reactor*, Report RSE/2009/87.
- [31] S. Bortot, C. Artioli, G. Grasso, *Preliminary proposal for an ELSY-oriented technology demonstration project (DEMO)*, Rapporto ENEA FPN-P9LU-0.
- [32] M. Polidori, *HE-FUS3 Experimental Campaign for the Assessment of Thermal-Hydraulic Codes: Pre-Test Analysis and Test Specifications*, Report RSE/2009/88.
- [33] P. Meloni, M. Polidori, *HE-FUS3 Experimental Campaign for the Assessment of Thermal-Hydraulic Codes: Post-Test Analysis*, Report RSE/2009/89.
- [34] N. Burgio, *Simulazioni neutroniche e progettazione set-up TAPIRO per interfaccia core-riflettore VHTR*, Report RSE/2009/90.
- [35] M. Frullini, A. Gandini, A. Naviglio, *Simulazioni Monte Carlo di misure spettrali nelle interfacce grafitelurano e grafiteferro nella colonna termica del reattore sorgente veloce TAPIRO*, Report RSE/2009/91.
- [36] A. Luce, A. Orsini, *Supporto al Gruppo di Lavoro DM 25 Febbraio 2008*, Report RSE/2009/129.
- [37] A. Luce, *Decommissioning e gestione rifiuti radioattivi: la situazione internazionale e in Italia*, Report RSE/2009/127.
- [38] F. Zarlenga, *Le ricerche condotte dall'ENEA fra il 1976 e il 1991 sul confinamento geologico delle scorie radioattive a lunga vita e ad alta attività*, Report RSE/2009/128.
- [39] A. Luce, A. Mura, A. Taglioni, F. Zarlenga, *Le attività condotte dall'ENEA fra il 1996 e il 2003 per il sito nazionale di deposito dei rifiuti radioattivi*, Report RSE/2009/122.
- [40] R. Bove, M. Capone, N. Cherubini, A. Compagno, A. Dodaro, A. Marlia, A. Massi, *Revisione critica dell'inventario nazionale dei rifiuti radioattivi ai fini dello smaltimento*, Report RSE/2009/146.
- [41] N. Cherubini, A. Dodaro, M. Ferrando, L. Silvi, N. Sparacino, F. Troiani, *Attività relative alla caratterizzazione dei rifiuti radioattivi da conferire al sito di smaltimento e di deposito*, Report RSE/2009/130.
- [42] R. Bove, A. Luce, A. Mura, A. Taglioni, F. Zarlenga, *Requisiti minimi per la localizzazione e la progettazione di un deposito di smaltimento per i rifiuti radioattivi di seconda categoria*, Report RSE/2009/135.
- [43] E. Zio, F. Cadini, D. Avram, T. Girotti, *Performance Assessment: modellazione dei fenomeni di dispersione di contaminanti attraverso le barriere protettive di un deposito di rifiuti radioattivi e metodologia di analisi probabilistica del rischio associato alla costruzione e operazione del deposito stesso*, Report RSE/2009/124.
- [44] L. Ferroni, L. Gramoccia, M. Moretti, C. Rusconi, *Analisi propedeutiche alla progettazione dei depositi per rifiuti di II e III categoria*, Report RSE/2009/123.
- [45] A. Orsini, R. Bove, *Linee guida per il trasporto dei rifiuti radioattivi al deposito nazionale*, Report RSE/2009/131.
- [46] F. Padoani, *Nuclear Security: un approccio per il deposito nazionale per lo smaltimento di rifiuti radioattivi*, Report RSE/2009/133.
- [47] E. Zio, F. Cadini, D. Avram, *Linee guida per comunicazione e informazione – Attività di comunicazione nell'ambito della valutazione e gestione della sicurezza di un deposito di rifiuti radioattivi. Analisi critica di esperienze internazionali*, Report RSE/2009/125.
- [48] E. Zio, F. Cadini, D. Avram, J. De Sanctis, *Linee guida per formazione ed educazione – Attività di formazione nell'ambito della valutazione e gestione della sicurezza di un deposito di rifiuti radioattivi. Analisi critica di esperienze internazionali*, Report RSE/2009/126.