

ENERGIA NUCLEARE PRESENTE E FUTURO

La situazione del nucleare nel mondo è oggi di grande attualità. Attualmente sono disponibili sul mercato i reattori evolutivi di III generazione mentre nella IV sono previste tecnologie con sostanziali innovazioni. In Italia esistono ancora notevoli competenze che possono essere valorizzate attraverso importanti impegni internazionali.

DI ENRICO MAINARDI

Nel mondo sono in funzione 440 impianti nucleari per una potenza complessiva pari a 365.560 MW(e) mentre 25 unità sono in costruzione per una potenza pari a 20.776 MW(e).

Il contributo nucleare alla copertura del fabbisogno elettrico è stato, nel 2003, del 16% a livello mondiale, del 25% nei paesi dell'OCSE e del 35% a livello europeo. In Europa la fonte nucleare è da tempo la prima fonte di produzione elettrica, con percentuali di copertura del fabbisogno che hanno raggiunto l'80% in Lituania e il 78% in Francia con 59 unità. Gli Stati

Uniti detengono il primato di 104 unità in funzione coprendo circa il 20% della produzione elettrica tramite fonte nucleare.

Nonostante questo quadro rassicurante sul ruolo importante dell'energia nucleare i nuovi ordinativi di reattori si sono concentrati principalmente in Asia mentre sono assenti in America. Solo recentemente sono apparsi segnali di un rinato interesse alquanto visibile in tutto il mondo grazie ad una serie di fattori politici, economici, ambientali e di evoluzione scientifica e tecnologica. Anche nel nostro Paese si è riaperto recentemente il dibattito

sull'energia nucleare facilitato, negli ultimi anni, da alcune situazioni ed eventi; ricordiamo ad esempio il blackout del sistema elettrico italiano del settembre 2003, le discussioni sulla riduzione di gas serra, l'approvazione del protocollo di Kyoto, le sempre più frequenti instabilità in paesi esportatori di petrolio, il forte incremento del prezzo del greggio, le vicende legate al gas russo. Inoltre, varie organizzazioni ed enti autorevoli ed indipendenti hanno studiato e dimostrato la convenienza economica e la competitività del costo dell'energia elettrica pro-

CONCLUSIONI SULLA SITUAZIONE IN ITALIA

L'Italia sta gradualmente perdendo le proprie competenze in campo nucleare anche a causa di una carenza di buone opportunità per i giovani e ad un difficile passaggio di consegne con le generazioni precedenti. Questo nonostante gli enormi investimenti e sforzi scientifici e tecnologici che avevano portato il Paese ad essere leader mondiale negli anni '50 e '60. Negli anni successivi, specie dopo il referendum del 1987, si è verificato un progressivo declino del programma nucleare nazionale anche se sono stati portati avanti alcuni impegni in programmi internazionali rilevanti per il ritorno di immagine tecnologico e politico dell'Italia. Così facendo si è acquisita una conoscenza approfondita dello stato e delle esigenze nei vari Paesi in cui si è operato e si è dimostrato che esistono ancora notevoli capacità. Il nostro Paese, qualora partecipasse direttamente e con un forte vigore ad iniziative internazionali come quelle per il progetto del reattore di terza generazione EPR e a programmi di ricerca come GENERATION-IV o INPRO, potrebbe assumere un ruolo attivo nel panorama mondiale e trovare lo stimolo per intraprendere un più consistente programma sui sistemi a fissione. Gli attuali problemi circa la disponibilità di fonti di energia e della qualità dell'aria suggeriscono un ruolo importante dei reattori nucleari nella fornitura di energia elettrica e l'Italia dovrebbe mantenere un presidio nucleare di alto livello in vista di un possibile maggiore impegno futuro dettato dalla carenza di altre fonti.

Oggi sono disponibili sul mercato i reattori avanzati di III generazione (come la centrale da 1600 MW_e in costruzione in Finlandia, il cui inizio di funzionamento commerciale è previsto per il 2009) e derivanti dall'ottimizzazione, in termini di economia e sicurezza, degli attuali ad acqua leggera. Questi reattori potrebbero essere impiegati, anche in Italia, nell'attesa della commercializzazione di quelli di IV generazione qualora si verificassero quelle condizioni sociali, politiche ed economiche necessarie per raggiungere un maggiore consenso a favore delle tecnologie nucleari.

Ulteriori attività di ricerca e sviluppo sui reattori di quarta generazione saranno necessarie per una loro fase dimostrativa consentendo all'industria di rendere uno o più sistemi disponibili per il mercato. Tali sistemi dovrebbero coprire le grandi richieste di energia durante tutto il periodo richiesto per il completo sviluppo e messa in esercizio degli auspicabili reattori a fusione.

Infine è necessario ricordare che la questione dell'informazione e della comunicazione è centrale per presentare tutti gli aspetti dei sistemi nucleari in particolare quelli legati ai miglioramenti sulla sicurezza e sulla gestione dei rifiuti nucleari così importanti per un'accettabilità sociale. Per questo hanno un ruolo essenziale gli organi di informazioni e riviste come MIND disponibili a trattare temi anche controversi e di scarsa popolarità.

dotta mediante nucleare rispetto ad altre fonti. Tale competitività potrebbe essere ulteriormente incrementata se per produrre energia elettrica si utilizzassero le nuove centrali elettronucleari di terza generazione come quella attualmente in costruzione in Finlandia.

Rimangono da parte dei governi e dell'opinione pubblica delle perplessità sugli aspetti legati alla sicurezza degli impianti, al loro smantellamento a fine vita e alla sistemazione definitiva dei rifiuti nucleari. In Italia l'opzione nucleare potrebbe apparire un discorso prematuro e attualmente impensabile poiché oltre alle questioni tradizionali menzionate se ne aggiungono di ulteriori supportate più da fattori emotivi ed ideolo-

gici che non tecnici ed economici. D'altra parte per il nostro Paese risulta sempre più necessario prendere misure concrete in campo energetico considerando un mix che non dipenda esclusivamente dalle fonti fossili e dalle importazioni e con un minor impatto sull'ambiente. La diversificazione delle fonti è possibile includendo anche l'energia nucleare che, sebbene attualmente bandita dal suolo nazionale, dovrà essere considerata in futuro nel contesto di un programma nazionale. Attualmente l'Italia importa energia elettrica prodotta mediante fonte nucleare dall'estero (Francia, Svizzera, Slovenia): così facendo si favoriscono economie, occupazione, ricerca scientifica e tecnologica

fuori dai confini nazionali. Nonostante la chiusura degli impianti nucleari nel nostro paese, le competenze tecniche sono ancora presenti mentre è necessario un supporto politico e sociale stabile e duraturo. Il settore industriale è ancora attivo con due società principali SOGIN e ANSALDO e varie società di ingegneria, mentre la ricerca viene portata avanti da istituzioni come l'ENEA e dalle Università con riconoscimenti anche a livello internazionale.

L'APAT quale Autorità di Controllo per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione oltre all'impegno in Italia, partecipa anche alle attività di assistenza dell'Unione Europea alle autorità di sicurezza dei Paesi dell'est europeo con ottimi risultati.

L'ente elettrico ENEL si è impegnata in una partecipazione con il corrispettivo francese EdF per la prima realizzazione di un reattore di nuova concezione in Francia. L'ENEL è inoltre impegnata nell'acquisto dell'ente elettrico slovacco Slovenske Elektrarne, che possiede impianti nucleari di tecnologia russa oltre ad un mix energetico ben bilanciato e una rete in posizione strategica nell'Europa orientale.

Nuove opportunità si presentano quindi in Europa dove la fonte nucleare è al primo posto per la produzione di energia elettrica e dove attualmente è in fase di avviamento un processo che porterà alla completa apertura del mercato elettrico europeo con possibilità per gli enti energetici di tutti i paesi. E' quindi di importanza vitale poter mantenere e valorizzare ulteriormente alcune delle competenze esistenti nel Paese.

produzione di energia elettrica o plutonio per armi nucleari, progettati e costruiti prima degli anni '70; la **seconda generazione** comprende principalmente reattori ad acqua leggera, utilizzati a partire dagli anni '70 e '80 e ancora operativi; la **terza generazione** si riferisce a quei reattori avanzati, come l'EPR (European Pressurized water Reactor), l'AP600 (Advanced Passive) e l'ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), derivanti dall'ottimizzazione, in termini di economia e sicurezza, degli attuali reattori ad acqua leggera e che saranno operativi prima del 2010; la **quarta generazione** comprende sistemi nucleari innovativi che probabilmente raggiungeranno maturità tecnica a partire già dal 2030. Tali sistemi nucleari sono concepiti in modo da provvedere alla fornitura di energia in maniera molto competitiva da un punto di vista economico, estendendo e mi-

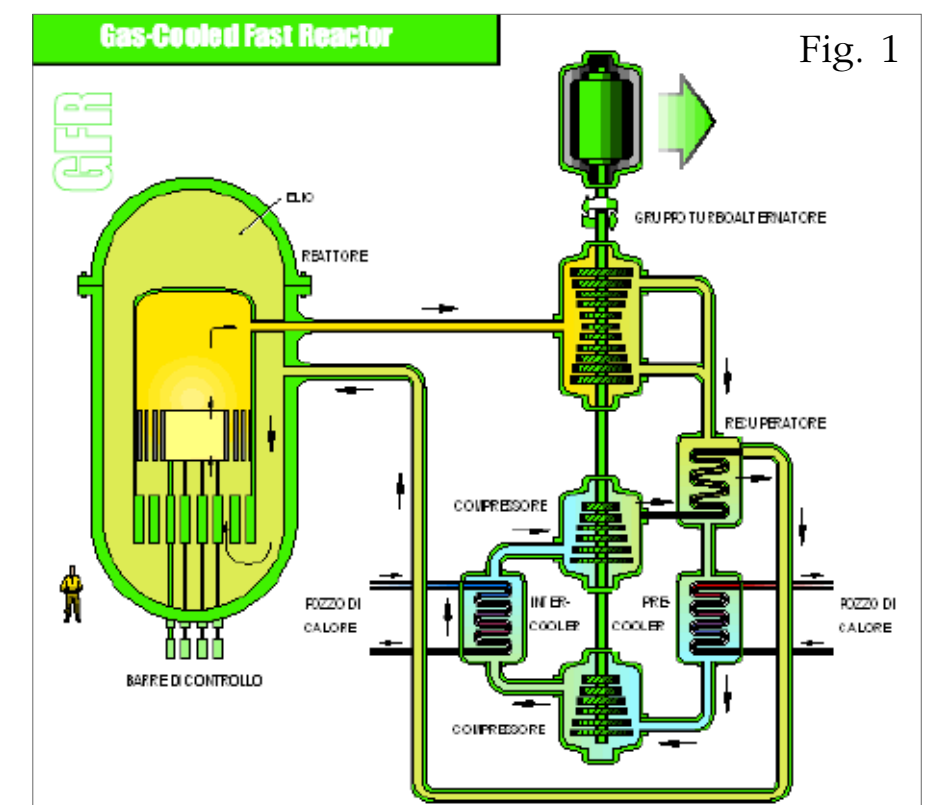
gliorando la sicurezza in caso di incidenti e tenendo in considerazione anche la sicurezza in caso di attacchi terroristici, la minimizzazione delle scorie (in particolare di quelle a lunga vita), l'uso razionale delle risorse naturali (con un maggior sfruttamento dei materiali fissili e fertili), la capacità di produrre direttamente idrogeno (senza passare attraverso la produzione di energia elettrica), l'affidabilità, la resistenza alla proliferazione.

Viene anche spesso citata una **generazione 3+** che include sistemi che potrebbero essere introdotti entro i prossimi 10-15 anni, quindi assai prima dei reattori di quarta generazione e allo stesso tempo risultare vantaggiosi per lo sviluppo di questi ultimi. Sono stati considerati sedici sistemi che potrebbero essere impiegati prima del 2015 e con performance superiori a quelle dei ALWR (Advanced Light Water Reactors) attuali:

QUATTRO GENERAZIONI DI REATTORI NUCLEARI

Dagli anni '50 ad oggi si sono avvicinate tre generazioni di reattori nucleari di potenza mentre sono in atto lavori di ricerca e sviluppo per una quarta generazione.

I reattori nucleari possono essere classificati in base alla generazione cui appartengono: la **prima generazione** include prototipi e reattori destinati alla



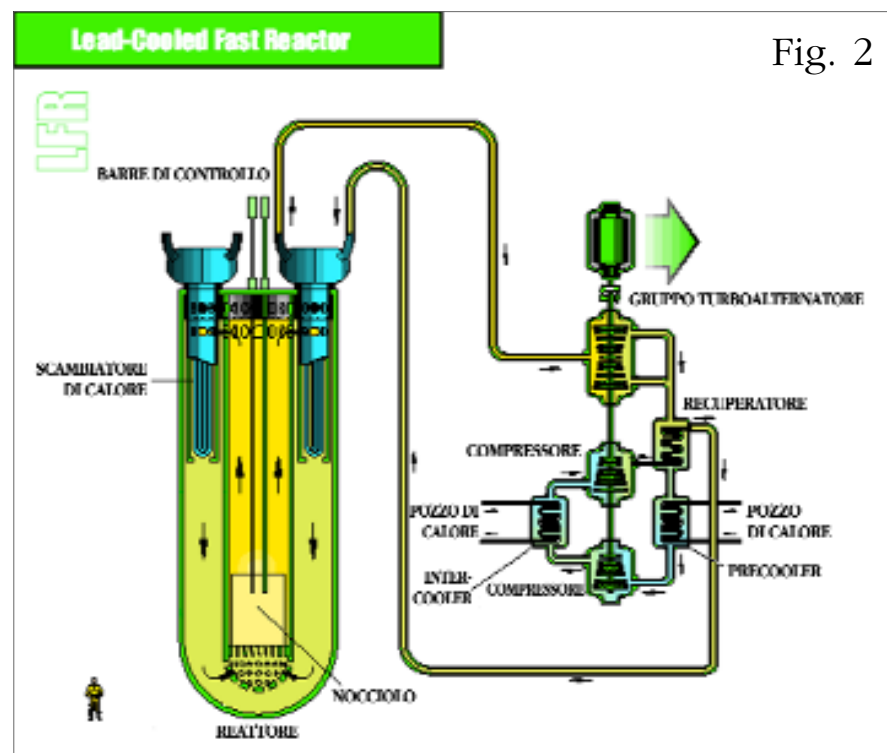


Fig. 2

generazione ed in particolare verso l'EPR in costruzione in Finlandia.

Il reattore EPR è stato sviluppato ottimizzando molteplici aspetti di sicurezza ed economicità sulla base della notevole esperienza franco-tedesca e dovrebbe sostituire gli impianti francesi che man mano raggiungeranno il termine di vita utile. Per far ciò la società elettrica francese EDF (Electricité de France) conta di costruire in casa una testa di serie EPR nel sito di Flamanville in Normandia dove sono già presenti due unità PWR di seconda generazione. La costruzione a Flamanville partirà nel 2007 e l'impianto da 1.600 MWe entrerà in servizio nel 2012. Anche la Finlandia, ha scelto l'EPR per realizzare Olkiluoto-3, un impianto da 1.600 MWe che dovrebbe iniziare la produzione commerciale nel 2009. Nel Dicembre del 2003 è stato firmato il contratto per costruire il reattore EPR e i lavori procedono nei tempi stabiliti confermando l'interesse e la fattibilità dei progetti EPR. Il successo nella costruzione in Francia e Finlandia dovrebbe consentire di vendere il reattore anche ad altri Paesi, specie in Asia.

L'AP1000 risulta un'alternativa molto valida all'EPR nel campo dei reattori pressurizzati di Terza generazione. È stato sviluppato dalla compagnia americana Westinghouse Electric Co. con la collaborazione anche dell'italiana Ansaldo. Le attività in Europa e la conformità con le normative e i requisiti europei fanno sperare che l'AP1000 possa in futuro ottenere la licenza per essere costruito anche in Europa oltre che negli USA.

Advanced Boiling Water Reactors

ABWR II (Advanced Boiling Water Reactor II)
ESBWR (European Simplified Boiling Water Reactor)
HC-BWR (High Conversion Boiling Water Reactor)
SWR-1000 (Siedewasser Reactor-1000)

Advanced Pressure Tube Reactors

ACR-700 (Advanced CANDU Reactor 700)

Advanced Pressurized Water Reactors

AP600 (Advanced Pressurized Water Reactor 600)
AP1000 (Advanced Pressurized Water Reactor 1000)
APR1400 (Advanced Power Reactor 1400)
APWR+ (Advanced Pressurized Water Reactor Plus)
EPR (European Pressurized Water Reactor)

Integral Primary System Reactors

CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares)

IMR (International Modular Reactor)
IRIS (International Reactor Innovative and Secure)
SMART (System-Integrated Modular Advanced Reactor)
Modular High Temperature Gas-Cooled Reactors
GT-MHR (Gas Turbine-Modular High Temperature Reactor)
PBMR (Pebble Bed Modular Reactor)

PRINCIPALI REATTORI DI TERZA GENERAZIONE

La comunità nucleare internazionale rivolge oggi il proprio interesse principale verso i reattori di III

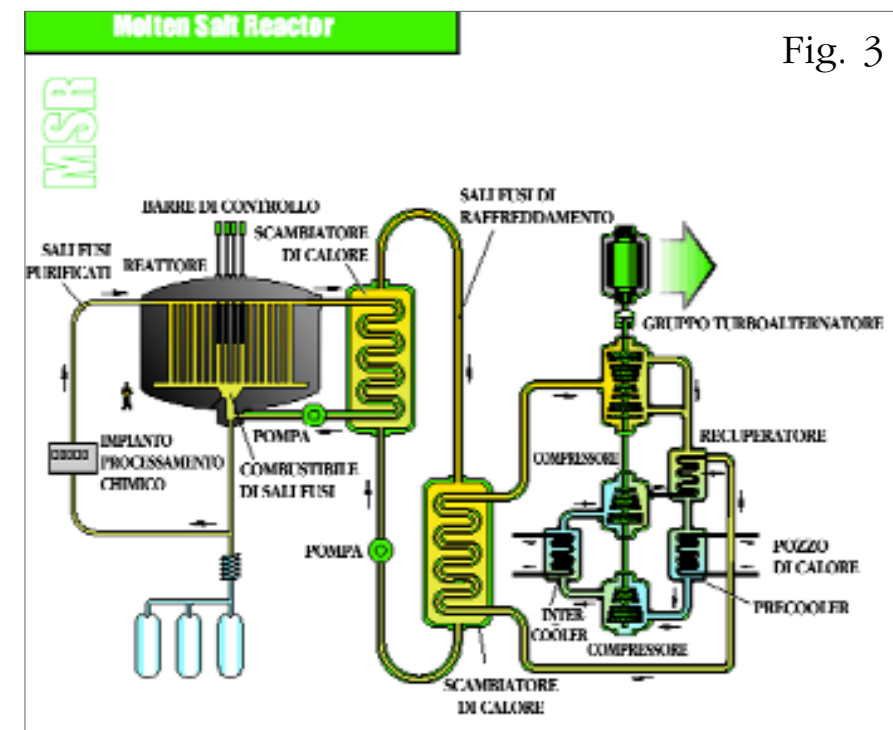


Fig. 3

I reattori di generazione 3 e 3+ ad acqua leggera pressurizzata EPR, AP1000, VVER AES92 e i bollenti ABWR, BWR90/90+, SWR vengono verificati attentamente per quanto riguarda la conformità con i nuovi requisiti in materia di sicurezza ed economicità EUR (European Utility Requirements) delle società elettriche europee.

L'EPR franco-tedesco avrà i suoi principali avversari nell'AP1000 dell'americana Westinghouse e nel VVER AES92 della russa Minatom, entrambi di terza generazione, ma con una potenza elettrica inferiore e alcune sostanziali differenze progettuali. Questi reattori risultano interessanti per l'attivo mercato cinese particolarmente bisognoso di energia. Oggi la Cina ha 15 reattori in funzione, altri quattro in costruzione e due in progetto. Per il periodo 2011-2020 è in programma l'installazione di nuova capacità elettronucleare per 23-27 GWe, pari a circa una quindicina di reattori tipo EPR. La Cina sta però realizzando un proprio reattore di terza generazione da 1.000-1.200 MWe, che sarà una versione meno avanzata del VVER AES92 russo. Il consorzio franco-tedesco che ha progettato l'EPR si aspetta che, nello scenario più ottimista, l'eventuale ordine cinese sia solo per pochi reattori EPR e che poi la Cina preferisca acquisire il know-how e costruire da sola le successive unità. La Cina non è poi l'unico mercato a cui l'EPR potrebbe essere destinato e si guarda con fiducia al bisogno di energia che imperversa in America e in numerosi paesi europei.

Il progetto EPR è di interesse

diretto anche per l'Italia visto che l'ente elettrico ENEL partecipa in Francia alla prima realizzazione di questa tipologia di reattore.

I reattori IRIS e PBMR appartengono alla generazione 3+ come EPR e AP1000 ma richiedono un maggior lavoro di ricerca e sviluppo prima della loro immissione nel mercato. Questo è dovuto ai numerosi sforzi innovativi che li rendono particolarmente interessanti ma che potrebbe comportare un ostacolo nell'accettazione da parte dei governi e compagnie elettriche e nei processi autorizzativi da parte delle autorità di controllo.

Il reattore IRIS è ad uno stadio avanzato di progetto grazie ad una estesa e qualificata partnership internazionale (IRIS Consortium), in cui sono rappresentati la maggioranza dei paesi industrializzati, tra cui una presenza significativa di sei partners italiani, sotto la lea-

dership della compagnia americana Westinghouse Electric Co.

Il nocciolo del reattore PBMR è costituito da centinaia di migliaia di elementi di grafite sferici contenenti uranio. Queste sfere di combustibile possono essere caricate e scaricate durante l'esercizio e resistono a temperature estremamente elevate, fino a 1.600 °C. Un ciclo dell'elio trasmette il calore dal nocciolo del reattore al generatore di vapore.

Il reattore MARS (Multipurpose Advanced Reactor inherently Safe) viene inoltre menzionato come progetto di reattore innovativo interamente ideato in Italia grazie ad uno sforzo ventennale guidato dall'Università di Roma "La Sapienza". Oltre alla sicurezza basata totalmente su sistemi passivi, numerose altre soluzioni progettuali innovative finalizzate alla semplicità e rapidità di costruzione ed esercizio, alla minimizzazione della produzione di rifiuti

I SISTEMI NUCLEARI

I sistemi nucleari possono essere classificati in base alla generazione cui appartengono: la **Prima generazione** include prototipi e reattori destinati alla produzione di energia elettrica o plutonio per armi nucleari, progettati e costruiti prima degli anni '70; la **Seconda generazione** comprende principalmente reattori ad acqua leggera, utilizzati a partire dagli anni '70 e '80 e ancora operativi; la **Terza generazione** si riferisce a quei reattori avanzati come l'EPR (European Pressurized water Reactor), l'AP600 (Advanced Passive), l'ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) derivanti dall'ottimizzazione, in termini di economia e sicurezza, degli attuali ad acqua leggera e che saranno operativi prima del 2010; la **Quarta generazione** comprende sistemi nucleari innovativi che probabilmente raggiungeranno maturità tecnica a partire già dal 2030. Tali sistemi nucleari sono concepiti ed autorizzati in modo da provvedere alla fornitura di energia in maniera molto competitiva da un punto di vista economico, tenendo in considerazione la sicurezza in caso di incidenti e di attacchi terroristici, la minimizzazione delle scorie (in particolare di quelle a lunga vita), l'uso razionale delle risorse naturali (con un maggior sfruttamento dei materiali fissili e fertili), la capacità di produrre direttamente idrogeno (senza passare attraverso la produzione di energia elettrica), l'affidabilità, la resistenza alla proliferazione.

Viene anche spesso citata una generazione 3+ che include sistemi che potrebbero essere introdotti entro i prossimi 10-15 anni e quindi assai prima dei reattori di quarta generazione e allo stesso tempo risultare vantaggiosi per lo sviluppo di questi ultimi. Sono stati considerati sedici sistemi che potrebbero essere impiegati prima del 2015 e con performance superiori a quelle dei ALWR (Advanced Light Water Reactors) attuali:

- Advanced Boiling Water Reactors
- ABWR II (Advanced Boiling Water Reactor II)
- ESBWR (European Simplified Boiling Water Reactor)
- HC-BWR (High Conversion Boiling Water Reactor)
- SWR-1000 (SiedeWasser Reactor-1000)
- Advanced Pressure Tube Reactors
- ACR-700 (Advanced CANDU Reactor 700)
- Advanced Pressurized Water Reactors
- AP600 (Advanced Pressurized Water Reactor 600)
- AP1000 (Advanced Pressurized Water Reactor 1000)
- APR1400 (Advanced Power Reactor 1400)
- APWR+ (Advanced Pressurized Water Reactor Plus)
- EPR (European Pressurized Water Reactor)
- Integral Primary System Reactors
- CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares)
- IMR (International Modular Reactor)
- IRIS (International Reactor Innovative and Secure)
- SMART (System-Integrated Modular Advanced Reactor)
- Modular High Temperature Gas-Cooled Reactors
- GT-MHR (Gas Turbine-Modular High Temperature Reactor)
- PBMR (Pebble Bed Modular Reactor)

radioattivi ed alla limitazione dei costi di realizzazione ed esercizio, rendono questo reattore modulare di piccola taglia assai interessante sotto il profilo applicativo, per la produzione di energia elettrica e di calore industriale.

LA SICUREZZA DEGLI IMPIANTI DI TERZA GENERAZIONE

La sicurezza negli impianti nucleari è sempre stato un aspetto fondamentale e con la terza generazione si migliorano gradualmente i già elevati standard dei reattori in uso nei paesi occidentali.

Il continuo progredire della tecnologia nucleare ha consentito di stabilire per i nuovi impianti criteri di sicurezza ancora più stringenti. In particolare, allo scopo di soddisfare i nuovi obiettivi di sicurezza, gli impianti della nuova generazione presentano le seguenti caratteristiche migliorative:

sono stati introdotti sistemi passivi di raffreddamento del reattore e del sistema di contenimento che sfruttano per il loro funzionamento leggi fisiche fondamentali, quali la gravità e la circolazione naturale, e che quindi intervengono automaticamente senza richiedere alcuna alimentazione elettrica esterna o interventi dell'operatore;

TABELLA 1. DATI ESSENZIALI DEI SISTEMI DI QUARTA GENERAZIONE

Sistema	spettro neutronico	refrigeranti	temperatura (°C)	pressione (alta: 7-15 Mpa)	combustione	ciclo combustibile	ciclo combustibile	ciclo combustibile
Gas-cooled fast reactors	veloce	elio	850	Alta	U-238	chiuso	288	elettricità & idrogeno
Lead-cooled fast reactor	veloce	piombo o piombo-bismuto	50-800	Bassa	U-238	chiuso	50-155	elettricità & idrogeno
Molten salt reactors	epitermico	fluoruro	700-800	Bassa	UF in Sali	chiuso	300-400	elettricità & idrogeno
Sodium-cooled fast reactors	veloce	sodio	550	Bassa	U-238 & MOX	chiuso	1200	elettricità
Supercritical water-cooled reactors	termico o veloce	acqua	510-550	Molto alta	UO2	aperto (termico) o chiuso (veloce)	150-500	elettricità
Very high temperature gas reactors	termico	1000	Alta	Alta	UO2	aperto	1500	drogeno & elettricità

vengono fornite maggiori garanzie sul contenimento della radioattività in tutte le circostanze possibili in modo da non richiedere l'evacuazione della popolazione e tali da non contaminare il territorio circostante l'impianto per qualsivoglia, pur grave, incidente concepibile; viene utilizzato per l'edificio

reattore un doppio contenimento, con una parete interna in calcestruzzo armato precompresso, per resistere ad ogni possibile sovrappressione ed una parete esterna, in calcestruzzo armato, per fronteggiare ogni concepibile attacco esterno di origine sia naturale che antropica;

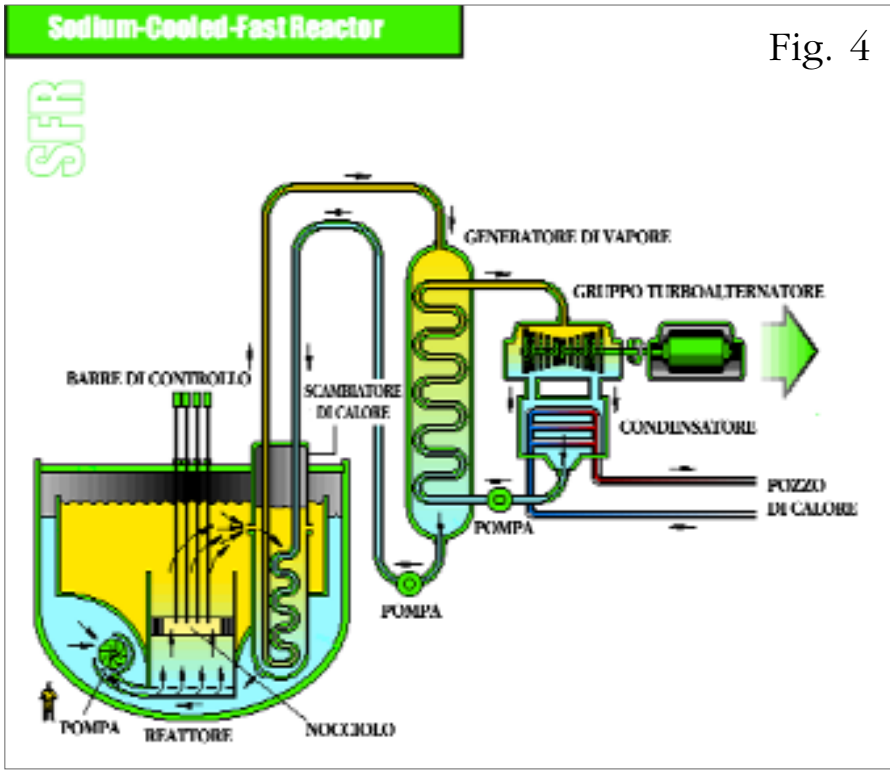
è stato ottimizzato il progetto del nocciolo al fine di aumentare i margini di sicurezza e ridurre ulteriormente la possibilità di fusione del nocciolo;

sono stati considerati gli incidenti severi, quali la fusione del nocciolo, nel progetto del sistema di contenimento e della cavità sottostante il reattore;

è stata migliorata l'interfaccia uomo-macchina per rendere più agevole la sorveglianza e il controllo dell'impianto, la comprensione dei sintomi incidentali e l'accurata definizione delle procedure di emergenza, facilitando così gli interventi di recupero;

sono stati introdotti sistemi atti a garantire la sicurezza degli impianti anche in caso di assenza prolungata dell'operatore, in assenza di disponibilità di fonti esterne di energia elettrica ed in caso di eventuali interventi erronei;

sono stati introdotti impianti e componenti più semplici da operare, ispezionare, mantenere, riparare incrementando la loro affidabilità ed economicità.



PROGETTO INTERNAZIONALE SULLA QUARTA GENERAZIONE

Sei sono i sistemi nucleari innovativi di IV Generazione su cui gruppi internazionali scommettono possano raggiungere la maturità tecnica già dal 2030.

Il Dipartimento per l'Energia degli Stati Uniti (DoE) ha lanciato nel 1999 il progetto internazionale per lo studio e sviluppo dei reattori di IV Generazione. Oggi a tale progetto partecipano 10 stati mem-

bri, oltre all'Euratom: Argentina, Brasile, Canada, Francia, Giappone, Repubblica di Corea, Sud Africa, Svizzera, Regno Unito e Stati Uniti. In futuro, altri stati od organismi internazionali potrebbero unirsi agli attuali. I rappresentanti degli stati membri si riuniscono periodicamente per verificare obbiettivi e risultati comuni nell'ambito del GIF *Generation IV International Forum* pur concentrandosi su linee di ricerca di proprio interesse. Dopo una valutazione di molti concetti innovativi, il GIF ha scelto sei tecnologie di reattori nucleari e cicli di combustibile più promettenti per una più accurata analisi delle loro potenzialità. Tutti i sei reattori, ciascuno con caratteristiche specifiche, rappresentano miglioramenti notevoli nei tre settori della sostenibilità, sicurezza ed affidabilità, economicità secondo gli obiettivi del GIF.

Per **sviluppo sostenibile** ci si riferisce alla capacità di venire incontro ai bisogni della società presente migliorando e non mettendo a rischio la possibilità per la generazione futura di venire incontro ai propri bisogni. Per far ciò è necessario considerare opportunamente la conservazione delle risorse e la protezione dell'ambiente. Per quanto riguarda la sostenibilità i sistemi di quarta generazione, che includono anche il ciclo del combustibile, dovranno:

produrre energia nel rispetto degli obiettivi ambientali di qualità dell'aria promuovendo l'ottimizzazione nell'uso del combustibile;

minimizzare la produzione di scorie nucleari migliorando la protezione della salute pubblica e dell'ambiente;

essere meno utilizzabili per la produzione di armi fornendo maggiori garanzie contro la proliferazione.

Sicurezza ed affidabilità sono priorità essenziali nello sviluppo di impianti nucleari. Durante le normali operazioni tali impianti devono preservare i loro margini di sicurezza, prevenire incidenti ed evitare il peggioramento delle remote situazioni incidentali. Insieme a garanzie sulla sicurezza degli impianti, la competitività richiede un livello molto alto di affidabilità. I sistemi di quarta generazione hanno l'obiettivo di raggiungere i livelli più alti in termini di sicurezza, protezione dei lavoratori e dell'ambiente ed avranno complete soluzioni per lo smaltimento dei rifiuti nucleari e per lo smantellamento degli impianti stessi.

I sistemi di quarta generazione dovranno:

ENRICO MAINARDI

Enrico MAINARDI ha conseguito la laurea in Ingegneria Nucleare presso l'Università di Bologna, il dottorato di ricerca in Energetica presso l'Università di Roma "La Sapienza" ed è professore a contratto presso l'Università di Roma "Tor Vergata". Ha condotto attività di ricerca nei settori della fusione, fissione, dosimetria presso università e centri di ricerca in Italia (ENEA di Frascati) e in USA (Lawrence Berkeley National laboratory). E' segretario dell' **AIN (Associazione Italiana Nucleare)** <http://www.assonnucleare.it/> e fa parte del comitato esecutivo dell'IYNC (International Youth Nuclear Congress) e rappresentante per l'Italia nell' IYNC e nell' ENS YGN (European Nuclear Society Young Generation Network). E-MAIL: info@assonnucleare.it



eccellere in sicurezza ed affidabilità anche in caso di assenza dell'operatore o di suoi eventuali interventi erronei;

fornire una bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore;

eliminare il bisogno di procedure di emergenze tali da richiedere assicurazioni sulla salute pubblica, non essendoci uno scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito.

La **competitività economica** è un requisito essenziale per i sistemi di quarta generazione. Essi produrranno principalmente energia elettrica e potrebbero rivelarsi convenienti per produrre anche acqua potabile, idrogeno, calore per la cogenerazione. Un più vasto gruppo di prodotti oltre all'elettricità sarà probabilmente necessario per tenere il passo con la crescente domanda mondiale di energia e considerando i cambiamenti a lungo termine nel suo uso. La quarta generazione di reattori nucleari dovrà:

avere un chiaro vantaggio in termini di costo del ciclo di vita

dell'impianto rispetto ad impianti che utilizzano altre fonti di energia;

avere un livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti.

Le sei tecnologie di sistemi nucleari più promettenti e che soddisfano in maniera più completa i requisiti posti dal GIF vengono qui brevemente descritte.

1) REATTORE VELOCE RAFFREDDATO A GAS - GFR

Il GFR (Gas-cooled Fast Reactor in figura 1) è un reattore veloce raffreddato ad elio con un ciclo del combustibile chiuso. L'alta temperatura di uscita del refrigerante consente la produzione di elettricità con un più elevato rendimento e produzione di idrogeno mediante processi termochimici. Grazie alla combinazione di uno spettro neutronico veloce

ed un completo riciclo degli attinidi, il GFR minimizza la produzione di scorie radioattive ad alta attività. Il GFR presuppone un sistema integrato con trattamento di combustibile esaurito e la rifabbricazione del combustibile in sito. Le caratteristiche di progetto innovative che saranno sviluppate per i reattori GFR dovranno superare i limiti dei progetti dei precedenti reattori veloci refrigerati a gas: la bassa inerzia termica e la debole capacità di rimozione del calore a bassa pressione dell'elio. Vari approcci di sicurezza passiva saranno valutati per la rimozione del calore di decadimento in incidenti di depressurizzazione. Le condizioni essenziali per la convezione naturale saranno valutati per differenti densità di potenza e per differenti tipologie di combustibile. A causa della maggiore densità di potenza del nocciolo e tenendo conto delle proprietà intrinseche di questo, è necessario studiare sistemi di sicurezza che minimizzino la necessità di sistemi attivi. La tecnologia base da cui il GFR viene sviluppato include un certo numero di reattori termici e veloci refrigerati a gas.

2) REATTORE VELOCE RAFFREDDATO A PIOMBO - LFR

Il LFR (Lead-cooled Fast Reactor in figura 2) è un reattore refrigerato a piombo o con la lega piombo - bismuto (Pb o Pb-Bi), con spettro neutronico veloce e ciclo del combustibile chiuso. Le opzioni relative agli impianti includono un modulo con potenza di 50 - 150 MW_e,

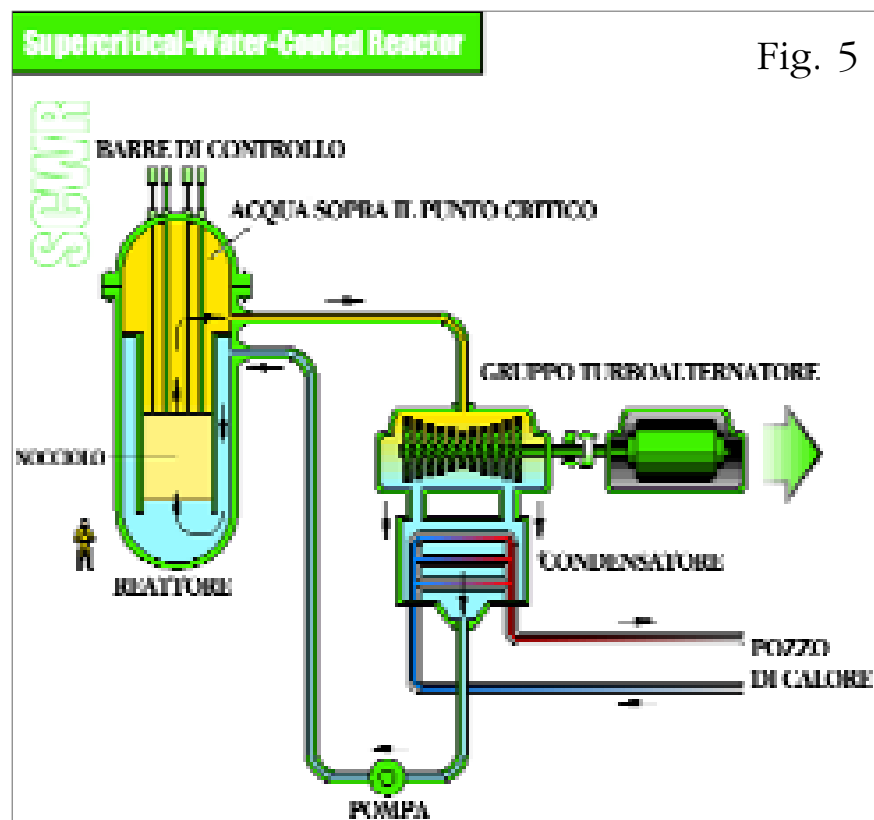


Fig. 5

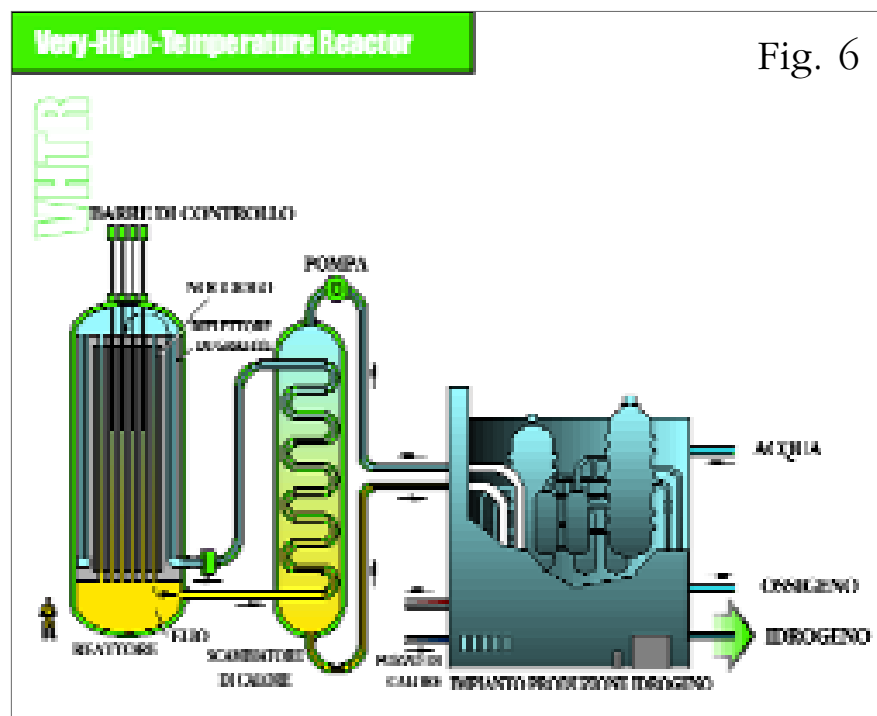


Fig. 6

un sistema modulare da 300 – 400 MW_e ed un grande impianto da 1200 MW_e. L'opzione di minor taglia opera su un ciclo del combustibile chiuso con un intervallo di ricarica lungo (15 - 20 anni) permesso dalla favorevole economia neutronica che consente bassa densità di potenza e circolazione naturale. La sua piccola taglia e i costi contenuti permettono di andare incontro alle opportunità del mercato per la produzione di elettricità su piccole reti e per i Paesi in via di sviluppo. Nei LFR si cerca di aumentare la temperatura di uscita del refrigerante fino a valori compresi tra 750 e 800 °C consentendo la produzione di idrogeno. Le tecnologie impiegate sono una estensione di quelle attualmente disponibili dai reattori russi per i sottomarini della classe alfa raffreddati a piombo bismuto e dall'*Integral Fast Reactor*. Gli acciai inossidabili ferritici esistenti e il combustibile in lega metallica, che sono già sviluppati in maniera significativa per i reattori veloci

refrigerati a sodio, sono adattabili ai reattori refrigerati a piombo – bismuto a temperature di uscita di 550 °C.

3) REATTORE A SALE FUSO - MSR

L'MSR (Molten Salt Reactor in figura 3) produce potenza di fissione in una mistura di combustibile costituito da fluoruri di uranio e plutonio circolante in fluoruro di sodio e zirconio. Tali sali fusi hanno una pressione del vapore molto bassa riducendo le sollecitazioni sul recipiente in pressione e sulle tubazioni. Il problema della sicurezza intrinseca è affrontato con refrigerazione passiva ed una bassa quantità di prodotti di fissione volatili nel combustibile. Adotta un flusso neutronico da "epitermico" a "termico" mentre ci sono quattro opzioni per il ciclo del combustibile: 1. ciclo del combustibile torio - U²³³; 2. ciclo torio - uranio denaturato; 3. ciclo aperto con bruciamento Pu e attinidi minori; 4. ciclo con

bruciamento attinidi in riciclo continuo. Questa quarta opzione è favorita per la produzione di elettricità e permette il rifornimento e la rimozione dei prodotti di fissione durante il funzionamento. L'MSR possiede una buona economia neutronica e, operando ad alta temperatura, offre la possibilità di produzione termochimica di idrogeno. I reattori MSR si sono sviluppati a partire dalla seconda metà degli anni '50 per la propulsione aerea dimostrando le alte temperature raggiungibili (815 °C) e stabilendo i parametri di riferimento per i sistemi a sali fluoruri fusi circolanti. Il *Molten Salt Reactor Experiment* da 8 MW_{th} ha dimostrato con stabilità di esercizio la possibilità di utilizzare differenti combustibili che includono U²³⁵, U²³³ e Pu, un moderatore di grafite, un sale refrigerante fluoruro litio/berillio e un funzionamento delle pompe per sali fusi fino a 17000 ore.

4) REATTORE VELOCE RAFFREDDATO A SODIO - SFR

L'obiettivo primario per il reattore veloce SFR (Sodium-cooled Fast Reactor in figura 4) con ciclo del combustibile chiuso è la gestione dei rifiuti ad alta attività, in particolare del plutonio e degli altri attinidi. Importanti sono anche le innovazioni per ridurre i costi di capitale e la provata capacità dei reattori veloci a sodio di utilizzare quasi tutta l'energia dell'uranio naturale contro circa l'1% utilizzato nei reattori a spettro termico. Per la taglia dell'impianto SFR sono dispo-

nibili sistemi modulari di pochi MW_e fino a grandi impianti da 1500 - 1700 MW_e. Un'importante caratteristica di sicurezza è rappresentata dal largo margine per l'ebollizione del sodio refrigerante che esce a temperature tra i 530 e i 550 °C. Il sistema primario opera a pressione atmosferica, pressurizzato solo per quanto serve a far muovere il fluido, aggiungendo un ulteriore elemento di sicurezza. Poiché il sodio reagisce chimicamente con l'aria e con l'acqua, il progetto deve limitare la possibilità di tali eventi e le loro conseguenze. Per migliorare la sicurezza, un sistema secondario del sodio agisce come barriera tra il sodio radioattivo nel sistema primario ed il vapore o l'acqua contenuta nel convenzionale ciclo Rankine dell'impianto. In questo modo se si verifica una reazione sodio-acqua essa non coinvolge un rilascio di radioattività. Il combustibile può essere costituito da MOX (Mixed Oxide Fuel, costituito da una miscela di plutonio in uranio naturale o depleto) oppure da una lega metallica mista uranio, plutonio, zirconio. I reattori SFR sono i più tecnologicamente avanzati poiché derivano da sistemi sviluppati in Francia, Giappone, Germania, Regno Unito, Russia, Stati Uniti.

5) REATTORE SUPERCRITICO RAFFREDDATO AD ACQUA - SCWR

Il SCWR (SuperCritical Water-cooled Reactor in figura 5) è un reattore refrigerato ad acqua, ad

alta temperatura e ad alta pressione e che opera sopra il punto critico dell'acqua (374°C, 22.1 MPa). Rispetto agli attuali LWR, il maggiore contenuto entalpico dell'acqua permette un più basso flusso di refrigerante per unità di potenza termica del nocciolo consentendo una riduzione della potenza di pompaggio, della taglia delle pompe e delle tubazioni e della quantità di refrigerante. Ciò consente un impianto più semplice ed edifici di contenimento più piccoli con meno componenti visto che sono eliminati separatori del vapore, pompe di ricircolazione e generatori di vapore. L'efficienza del SCWR può arrivare al 44% rispetto al 33-35% dei LWR e può anche essere progettato senza il moderatore per operare come reattore veloce. Il *SuperCritical Light Water Reactor* Giapponese, con spettro termico, è la base per molti progetti di riferimento. Il progetto del vessel è simile a quello di un reattore PWR sebbene il sistema di raffreddamento primario sia a ciclo diretto come nei BWR. Il refrigerante ad alta pressione (25 MPa) entra nel vessel ad una temperatura di 280 °C. Il flusso interno si divide in un canale discendente e in un plenum alla sommità del nocciolo da cui discende attraverso canali ad acqua consentendo la moderazione nel nocciolo. Altri esempi della tecnologia base possono già trovarsi negli esistenti LWR e negli altri impianti commerciali di potenza a combustibile fossile refrigerati ad acqua ma con ciclo sempre supercritico. Per il sistema primario del reattore le limitate ricerche sperimentali ed analisi di progetto sono state sviluppate negli ultimi 10 – 15 anni in Giappone, Canada, Russia.

6) REATTORE A GAS AD ALTA TEMPERATURA - VHTR

Il VHTR (Very High-Temperature gas Reactor in figura 6) è un reattore termico moderato a grafite, refrigerato ad elio che può raggiungere anche i 1000 °C, permettendo di produrre elettricità con un'efficienza anche oltre il 50%. Il VHTR da 600 MW_{th}, dedicato alla sola produzione di idrogeno, può produrre oltre 2 Mm³ al giorno. La cogenerazione di calore e di energia risulta interessante per raffinerie, impianti petrolchimici, metallurgici e per la produzione di idrogeno. Per la sola produzione di elettricità, la turbina a gas può essere direttamente messa nel circuito del refrigerante primario (ciclo diretto) mentre per applicazioni di calore il reattore è accoppiato ad uno scambiatore di calore intermedio (ciclo indiretto). Le strutture interne del nocciolo, che contengono gli elementi di combustibile del tipo a sfere o a blocchi, sono fatte di grafite di alta qualità le cui prestazioni sono state verificate negli impianti dimostrativi. Recenti miglioramenti nei processi di manifattura della grafite hanno dimostrato una migliorata resistenza all'ossidazione ed una migliore forza strutturale. Il VHTR rappresenta l'evoluzione dei reattori refrigerati a gas ad alta temperatura *High-Temperature Gas-cooled Reactors*. In Giappone è in corso un progetto per la produzione di 30 MW_{th} per dimostrare la fattibilità di raggiungere temperature di uscita fino a 950 °C. L'*High-Temperature Reactor* in Cina vuole dimostrare la produzione

di elettricità e la cogenerazione ad un livello di potenza di 10 MW_{th}. Progetti precedenti in Giappone e Germania forniscono dati utili per lo sviluppo del VHTR.

DATI ESSENZIALI DEI SISTEMI DI QUARTA GENERAZIONE

Tutti i sei reattori presentano dei miglioramenti secondo gli obiettivi del GIF ed operano a temperature più alte (da 510 °C a 1000 °C) rispetto agli attuali reattori ad acqua (330 °C) consentendo anche la produzione termochimica di idrogeno. La maggior parte dei sistemi (esclusi i VHTR) impiega un ciclo del combustibile chiuso per massimizzare le risorse e minimizzare i rifiuti ad alta attività. Tre dei sei (GFR, LFR, SFR) sono reattori veloci, il SCWR può essere costruito come tale, il MSR è descritto come epitermico e solo due (SCWR, VHTR) operano con neutroni termici. Solo il SCWR è raffreddato ad acqua leggera mentre due sono raffreddati ad elio (GFR, VHTR). I reattori refrigerati a piombo, piombo-bismuto, sodio, fluoruro (LFR, SFR, MSR) operano a bassa pressione, con rilevanti vantaggi nella sicurezza. I GFR, SCWT, VHTR operano invece con alte pressioni (7-15 Mpa). Le dimensioni vanno da 150 a 1500 MW_e, quello raffreddato a piombo è disponibile in opzione con modulo da 50 – 150 MW_e, con durata maggiore del nocciolo (15 – 20 anni senza rifornimento). Almeno due dei sistemi (SFR, VHTR) potrebbero essere in commercio prima del

2030 grazie ad una già presente esperienza di esercizio e alla possibilità di risolvere più brevemente alcuni aspetti chiave. Tra i paesi che non fanno parte del GIF, la Russia è attualmente il principale operatore con reattori veloci raffreddati a sodio per l'elettricità mentre l'India sta sviluppando una propria tecnologia avanzata per utilizzare il torio come combustibile nucleare.

PROGRAMMA INTERNAZIONALE INPRO

Un altro progetto che prevede una collaborazione internazionale su sistemi di quarta generazione si chiama INPRO (International PROject on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycle). INPRO ha visto il suo inizio nel 2000 attraverso una risoluzione adottata dai membri della IAEA (International Atomic Energy Agency) per lo studio e sviluppo di sistemi innovativi e destinati in particolare ai paesi in via di sviluppo.

Ad INPRO partecipano i seguenti paesi: Argentina, Brasile, Bulgaria, Canada, Cina, Repubblica Ceca, Francia, Germania, India, Indonesia, Corea, Olanda, Pakistan, Federazione Russa, Sud Africa, Spagna, Svizzera, Turchia, con il contributo anche della Commissione Europea.

Per l'iniziativa GENERATION-IV lanciata dal DoE e per il programma INPRO della IAEA, l'interesse è rivolto a sistemi comprendenti reattori e impianti per il ciclo del combustibile. Entrambe le iniziative vedono nella collaborazione internazionale e nell'innovazione due ele-

menti essenziali per il mantenimento e lo sviluppo dell'opzione nucleare. Gli obiettivi dei due programmi sono assai simili e si riferiscono ai miglioramenti sugli aspetti di economicità, sicurezza, ciclo del combustibile e rifiuti, sostenibilità e resistenza alla proliferazione.

Il programma di GENERATION-IV ha già completato la fase di analisi e di selezione dei sistemi nucleari innovativi mentre si stanno avviando i programmi di Ricerca e Sviluppo specifici per ciascuna delle soluzioni scelte. La scelta dei sistemi è stata fondata su basi tecniche definendo dei criteri e valutando il punteggio complessivo per ciascun sistema. Sono state individuate nuove soluzioni tecniche anche molto complesse, che possono essere perseguite solo da paesi possessori di una elevata tecnologia nucleare. INPRO ha concluso la fase di individuazione dei requisiti e criteri ed è prossima a completare la fase di verifica su alcune proposte di sistemi campione. Nei propositi di INPRO, le scelte tecnologiche e il loro sviluppo dovranno tenere in maggior conto le specificità di ciascuna regione o paese, in particolare per quelli in via di sviluppo, dove soluzioni più semplici ed affidabili possono comunque rappresentare un passo importante del processo innovativo. E' quindi prevedibile che INPRO consideri uno spettro più ampio di proposte tecnologiche di sistemi innovativi.

INPRO si pone come un'iniziativa complementare a GENERATION-IV e tenderà a mantenere elementi di differenziazione rispetto a quest'ultima. Fra le due iniziative è comunque previsto uno scambio di osservatori.

