

Impianti Nucleari di III Generazione

IN BREVE

- **PROCESSI E STATO DI SVILUPPO** – I reattori nucleari di III generazione (Gen III), sviluppati negli anni '90, rappresentano l'evoluzione della II generazione (Gen II) sviluppata negli anni 1960-70, cui appartiene gran parte degli impianti nucleari in esercizio. I reattori Gen III si identificano essenzialmente nelle tre filiere *pressurized water reactor* (PWR), *advanced boiling water reactor* (ABWR) e *heavy water reactor* (HWR o CANDU nella versione canadese). L'interesse del mercato si focalizza sulle versioni più recenti e innovative definite Gen III+, quali i reattori EPR (Areva), AP1000 (Westinghouse) e IRIS (consorzio internazionale guidato da Westinghouse). Rispetto alle generazioni precedenti, queste sono caratterizzate da più elevati livelli di sicurezza, standardizzazione e semplificazione del progetto con conseguente riduzione dei costi, maggiore disponibilità d'impianto e vita operativa, migliori prestazioni del combustibile con riciclo del plutonio e dell'uranio depleto, riduzione dell'impatto ambientale a parità di energia prodotta e ridotte dosi di radioattività al personale (molto al disotto dei limiti ammessi). I reattori Gen III e Gen III+ di grande taglia sono commercialmente disponibili. Impianti con potenza tra 1100 e 1600 MWe, sono stati già realizzati in Giappone (ABWR) o sono in corso di realizzazione in Finlandia e Francia (EPR), e Cina (EPR e AP1000). Negli Stati Uniti sono stati ordinati i primi due AP1000 (SC, Georgia) e sono state presentate ad oggi 17 richieste di permessi di costruzione ed esercizio (COL) per un totale di 26 reattori, tra cui 14 unità AP1000 e 4 EPR. Impianti di piccola taglia (e.g., IRIS, 335 MWe), tuttora in fase di sviluppo, saranno disponibili sul mercato intorno al 2015.
- **PRESTAZIONI E COSTI** – I reattori Gen III e Gen III+ di grande taglia hanno efficienza del 35-37% e disponibilità di impianto molto elevata pari a 90-92%. Il loro esercizio in sostituzione di una equivalente capacità alimentata a carbone consente di evitare l'emissione di circa 6.5 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno per ogni 1000 MWe di capacità installata. I reattori di piccola taglia (100-335 MWe) hanno in genere efficienza più ridotta (circa 33%) pur con uguale disponibilità di impianto. Essi sono potenzialmente idonei alla cogenerazione di elettricità, calore e acqua potabile. I costi di investimento al netto degli interessi (*overnight capital cost*) per gli impianti in costruzione sono: EPR (Olkiluoto, Finlandia, 2003) 1875 €/kWe; EPR (Flamanville, Francia, 2007): 2063 €/kWe, incrementato a circa 2500 €/kWe nella seconda metà del 2008; EPR (2 unità, Taishan, Cina, 2007): circa 1100 €/kWe (particolare contratto tra EDF e società cinesi che include altri servizi quali la fornitura del combustibile); IRIS (2005): circa 3000 \$/kWe, di cui circa 50% imputabile a costi di sviluppo e licensing (valutazioni economiche per impianti *first of a kind*); AP1000 (4 unità, Sanmen e Haiyang, Cina, 2007): circa 2230 \$/kWe. Il costo overnight dichiarato da costruttori USA (2008) per gli impianti AP1000 (Westinghouse), ABWR e ESBWR (GE-Hitachi) è dell'ordine di 3000 \$/kWe. I costi dichiarati dalle utilities USA sono in generale più elevati ma comprendono interessi passivi durante la costruzione, inflazione e imprevisti (*overrun-contingency*). Il costo dell'elettricità (*levelised cost of electricity*, LCOE) si colloca tra 33 e 55 €/MWh per EPR e tra 33 e 78 \$/MWh per AP1000 a seconda delle ipotesi di calcolo.
- **POTENZIALE E BARRIERE** - I reattori Gen III/III+ si candidano a coprire la domanda di energia nucleare in attesa dell'avvento di reattori di IV generazione (dopo il 2030-2040) e ad essere i precursori del rilancio dell'energia nucleare a seguito del rialzo dei prezzi dei combustibili fossili, della necessità di contenere le emissioni di CO₂ e di assicurare un'affidabile sicurezza dell'approvvigionamento energetico. In base alle proiezioni IPCC-2007, la domanda di elettricità è destinata a raddoppiare entro il 2030 (rispetto al 2002) e, assumendo l'adozione di incentivi per la riduzione delle emissioni pari a 50 \$/tCO₂, la quota di produzione nucleare potrebbe passare dall'attuale 16% (pari a 2650 TWhe) al 18% (circa 6000 TWhe) nel 2030. In scenari più ottimistici, la quota nucleare raggiunge il 30%. I reattori di piccola taglia tipo IRIS si candidano invece a conquistare quote di mercato in paesi in via di sviluppo, con infrastrutture e reti elettriche limitate e con esigenze di cogenerazione. I reattori Gen III/III+ possono più agevolmente superare le tradizionali barriere allo sviluppo dell'energia nucleare quali il costo e il rischio di investimento, la gestione dei rifiuti, l'accettabilità sociale e la proliferazione nucleare.

PROCESSI E STATO DI SVILUPPO – Sviluppati negli anni '90, i reattori nucleari di III generazione (Gen III) costituiscono una evoluzione progettuale dei reattori di II generazione, cui appartiene gran parte degli impianti attualmente in esercizio. Essi si identificano essenzialmente nelle tre filiere *pressurized water reactor* (PWR), *advanced boiling water reactor* (ABWR) e *heavy water reactor* (HWR, o CANDU nella versione canadese). Alcuni impianti ABWR Gen III sono in funzione in Giappone dal 1996 (2 unità TEPCO a Kashivazaki Kariva), altri sono in costruzione o sono in corso di ordinazione. In termini di sicurezza, economicità, sostenibilità, e proliferazione nucleare, le caratteristiche tecniche della Gen III anticipano in parte quelli che saranno gli obiettivi dei reattori di IV generazione (Gen IV), ancora in fase di progettazione concettuale e disponibili presumibilmente dopo il 2030. La chiusura del

ciclo del combustibile nucleare con riciclo completo degli attinidi (uranio, plutonio e attinidi minori) e la trasmutazione

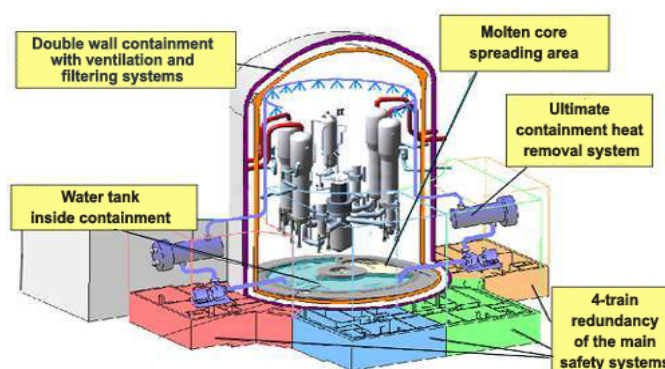


Fig. 1 – Reattore EPR: principali dispositivi di sicurezza

dei prodotti di fissione a vita lunga, rimane prerogativa della IV generazione. I progetti Gen III più innovativi (definiti anche Gen III+), sono i reattori EPR (*European Pressurized Reactor*) di Areva, AP1000 (*Advanced Pressurized*) di Westinghouse, ESBWR (General Electric) e IRIS del consorzio internazionale guidato da Westinghouse. Si tratta di impianti di tipo PWR sui quali si focalizza attualmente l'interesse internazionale e nazionale. Un altro progetto Gen III+ di rilevante interesse è il reattore PBMR (Pebble Bed Modular Reactor), sviluppato da Eskom (Sud Africa) che si caratterizza per l'uso di elio come refrigerante in luogo di acqua pressurizzata e per un ciclo termodinamico ad alta temperatura ed elevato rendimento in cui l'elio viene immesso direttamente in turbina. Rispetto ai reattori di II generazione, i reattori Gen III si caratterizzano per: ● la standardizzazione del progetto, ● la riduzione dei costi e dei tempi di costruzione, ● la semplificazione del *licensing*, ● la maggiore affidabilità di esercizio, disponibilità di impianto e vita operativa (fino a 60 anni), ● la riduzione del rischio di incidenti con potenziale fusione del nocciolo, ● i maggiori tassi di combustione (burn-up) del combustibile e il minor volume di rifiuti ad alta attività; ● la possibilità di monoriciclo di plutonio e uranio depleto mediante l'impiego di combustibile MOX (ossidi misti di uranio e plutonio), ● l'uso di sistemi di sicurezza passiva e/o il potenziamento dei sistemi attivi.¹

■ **Il Reattore EPR** (Fig. 1) è un reattore di tipo PWR da 1600 MWe (potenza netta) sviluppato da Areva, società franco-tedesca originata da Framatome e Siemens. Si tratta di una derivazione dei progetti PWR N4 (francese) e Konvoi (tedesco), con una riduzione dei costi pari almeno al 10%. È progettato per un funzionamento flessibile (*load-following*, potenza modulabile in base al carico) e per conseguire elevati burn-up del combustibile (circa 60 MWd/kg contro i 45-50 MWd/kg dei PWR Gen II) con efficienza netta prossima al 37%, ottenuta anche attraverso un gruppo turbo-alternatore innovativo che permette un guadagno di 70 MWe. Oltre all'uso di combustibile standard a base di uranio arricchito al 4.4%, è previsto il funzionamento con nocciolo interamente costituito da ossidi misti di U e Pu (MOX). I target operativi in termini di efficienza, disponibilità di impianto (92%) e vita operativa (60 anni) sono tra i più alti attualmente conseguibili. In EPR, la strategia di sicurezza interiorizza l'esperienza di circa 1500 anni-reattore di esercizio di reattori franco-tedeschi e si basa sulla ridondanza (quadrupla) dei sistemi di intervento attivi e sul miglioramento del sistema di contenimento realizzato in cemento armato a doppia parete di circa 1 m di spessore, con liner interno di rivestimento in acciaio. In tal modo è possibile: ● ridurre la probabilità d'incidente grave con fusione del nocciolo a valori minori di 10^{-5} eventi/reattore-anno; ● ridurre e confinare le conseguenze di incidenti gravi,

¹ I sistemi di sicurezza tradizionali *attivi* richiedono l'attuazione dei dispositivi preposti, anche se alcuni componenti (es. valvole di abbattimento della pressione) sono in grado di operare passivamente. L'affidabilità è quindi affidata alla ridondanza dei componenti. Al contrario, i sistemi di *sicurezza passiva* sono azionati da fenomeni fisici (gravità, convezione naturale) che si innescano spontaneamente in presenza di determinate condizioni (es. raffreddamento a circolazione naturale) anche in caso di malfunzionamento. Tali sistemi possono contenere ed estinguere eventi iniziatori di catene incidentali senza interventi attivi.

anche grazie al sistema di recupero e raffreddamento del nocciolo fuso; ● ridurre significativamente i rifiuti radioattivi (30% in meno in volume a parità di produzione) e la dose collettiva al personale (0.4 man-Sv contro 1, valore corrente nei paesi occidentali). L'accresciuta ridondanza dei sistemi (quattro in luogo dei due presenti nei reattori attuali) assicura, in caso di incidente, l'arresto immediato del reattore, la refrigerazione del nocciolo, e il mantenimento dei livelli di temperatura e pressione nel sistema di contenimento al di sotto dei limiti di progetto. A questo si aggiunge la protezione in c.a. degli edifici sensibili (reattore, sala controllo) contro aggressioni e impatti esterni, anche quelli dovuti a grandi aerei di linea, e il dispositivo di sicurezza (core-catcher) posizionato sotto il vessel, all'interno del sistema di contenimento. In caso di fusione del nocciolo, tale sistema è in grado di contenere, partizionare e raffreddare il materiale fuso (corium) fino a solidificazione senza conseguenze per l'esterno. Il primo impianto EPR è in costruzione in Finlandia (Olkiluoto), il secondo in Francia (Flamanville). Quest'ultimo vede una partecipazione italiana (Enel) nella misura del 12.5%. Altri due impianti EPR sono stati venduti alla Cina (Nov. 2007) e verranno costruiti nel sito di Tahishan nella provincia del Guangdong. Il progetto EPR rispetta gli *European Utility Requirements* (EUR), requisiti stringenti stabiliti sotto la spinta delle utilities franco-tedesche. Tali requisiti sono alla base della certificazione di vari reattori quali EPR e SWR-1000 (Areva), AP1000 e BWR-90 (Westinghouse), e ABWR (General Electric). Il reattore EPR, confermato come nuovo standard in Francia, è stato certificato dall'autorità di sicurezza francese nel 2004. Una versione americana del progetto (US-EPR) è stata sottoposta a procedura di certificazione presso l'organo di controllo americano (NRC) nel 2007.

■ **Il Reattore AP1000** prodotto da Westinghouse è una evoluzione del progetto AP-600 (Advanced Passive, 600 MWe). Anch'esso di tipo PWR, ha potenza elettrica netta di 1117 MWe, rendimento del 35%, e vita operativa di 60 anni. La tecnologia AP1000 si basa sulla lunga esperienza di esercizio dei reattori PWR Westinghouse. Rispetto a questi, si avvale di una notevole semplificazione impiantistica che riguarda i sistemi di sicurezza, la sala controllo, la strumentazione, le tecniche di costruzione, il numero di componenti, i volumi degli edifici in classe sismica, ottenendo così un impianto meno costoso nella costruzione e nella manutenzione, e più sicuro nell'esercizio. I criteri di sicurezza sono basati su livelli di difesa multipli e indipendenti (*defense in-depth*) per la mitigazione degli incidenti. La caratteristica peculiare è, tuttavia, l'uso di *sistemi a sicurezza passiva*, già sviluppati e licenziati per AP-600 grazie a prove sperimentali effettuate in Italia presso la SIET (Piacenza). Facendo affidamento su circolazione naturale, gravità, convezione e gas compressi, il reattore è in grado di auto-arrestarsi in caso di necessità e di assicurare la refrigerazione in condizioni di sicurezza anche in assenza di alimentazione elettrica e di operatori. L'AP1000 rispetta con ampi margini i criteri di sicurezza NRC. La probabilità di fusione del nocciolo (core damage frequency, CDF) risulta essere 1/100 di quella degli impianti attualmente in esercizio e 1/20 di quella accettabile in base ai requisiti delle utilities USA (Utility Requirements Document, URD) per reattori di nuova concezione (Tab. 1).

Tab. 1 – Requisiti e probabilità di fusione nocciolo				
CDF	NRC	URD	Current plants	AP1000
event/yr	1E-4	1E-5	5E-5	5E-7

I sistemi di sicurezza passiva che assicurano la *defense in-depth* sono costituiti da :

- Sistemi (*non-safety*) per il controllo di transitori nel corso del normale esercizio;
- Sistemi passivi di raffreddamento del nocciolo, isolamento e refrigerazione del sistema di contenimento (*Passive Core Cooling System, Containment Isolation, Containment Cooling System*);
- Sistemi di ritenzione del nocciolo, in caso di fusione, all'interno del contenitore in pressione e refrigerazione diretta del vessel dall'esterno mediante allagamento;
- Controllo del rilascio di prodotti di fissione e sistema di contenimento multi-barriers costituito da: 1) combustibile; 2) guaina; 3) vessel reattore-circuito primario; 4) *containment vessel* in acciaio; 5) contenitore esterno in c.a. con raffreddamento ad aria in convezione naturale rafforzata da evaporazione dell'acqua in un serbatoio posto in testa all'edificio reattore al fine di mantenere la pressione nel contenitore al di sotto del limite di progetto (Fig. 2). Il reattore AP1000 ha ottenuto la certificazione NRC in USA nel dicembre 2005. Nel maggio 2007, Westinghouse ha presentato richiesta di Generic Design Assessment (GDA) all'autorità di sicurezza britannica con il supporto di E.ON. e di varie utilities europee. Va segnalato inoltre che negli USA, nell'ambito del nuovo processo di *licensing* - Early Site Permit (ESP) e Combined Construction and Operating License (COL) - le utilities hanno scelto l'EPR in 5 casi e l'AP1000 in 4 casi. Per entrambi i reattori, i vendors hanno avviato nel 2007 il processo di pre-licensing presso l'autorità di sicurezza britannica (HSEEA) presentando richiesta di GDA. Quattro reattori AP1000 sono in via di realizzazione in Cina da parte del consorzio Westinghouse-Shaw (luglio 2007) nei siti di Sanmen e Haiyang.

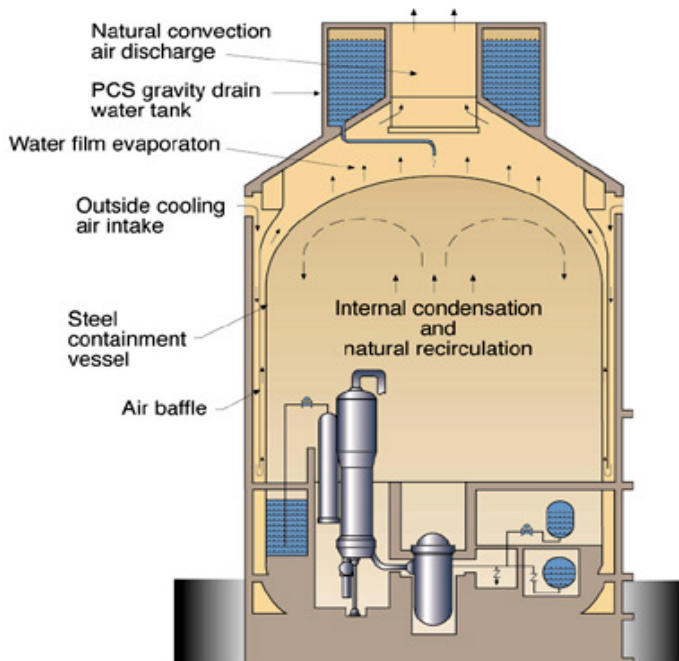


Fig. 2 AP1000: Contenimento e Raffreddamento

■ Il Reattore IRIS (*Safety by Design*) fa parte dei sistemi Gen III+ *Near Term Deployment* destinati ad essere introdotti nei prossimi 10-15 anni. Si tratta di un reattore modulare di tipo PWR di piccola taglia (335 MWe) sviluppato da un consorzio internazionale guidato da Westinghouse. La potenza del reattore è idonea alla localizzazione in paesi in via di sviluppo (con reti elettriche di piccole dimensioni) e per la produzione combinata di elettricità, calore e/o acqua potabile, con la prospettiva di centrali pluri-modulo gestite da un'unica sala controllo. La definizione *safety by design* implica una configurazione impiantistica semplificata caratterizzata dall'alloggiamento di tutti i componenti del circuito primario (generatori di vapore, pompe, pressurizzatore e barre di controllo) all'interno del vessel (Fig. 3).

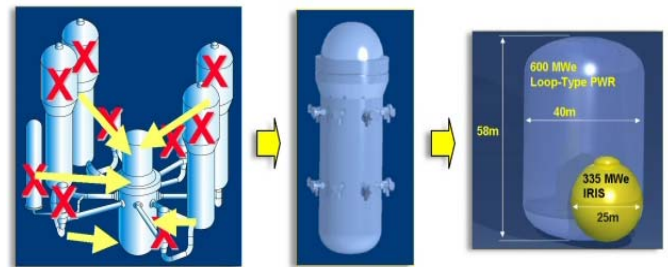


Fig. 3 – IRIS: Semplificazione Impiantistica

Ciò consente

- l'eliminazione di gran parte dei componenti del circuito primario, eventuale fonte di incidenti con perdita di refrigerante;
- l'eliminazione o la drastica riduzione (88%) degli incidenti di classe superiore (classe IV - Tab. 2);
- la drastica riduzione (fino a due ordini di grandezza) della probabilità di incidenti con danneggiamento del nocciolo e rilascio di radioattività;
- arresti per manutenzione con cadenza anche quadriennale e interventi minori attuabili in esercizio grazie alla ridondanza dei componenti modulari, il tutto a vantaggio della disponibilità di impianto. La mancanza di boro nel circuito primario permette inoltre di ridurre i rischi di frattura da corrosione sotto sforzo (v. Davis Besse, 2002). Il programma di sviluppo IRIS, iniziato nel 1999, prevede il completamento dei test di certificazione entro il 2011, l'approvazione del progetto negli Stati Uniti (NRC) nel 2012 e la disponibilità commerciale per il 2015.

Tab. 2 - IRIS: Indicatori Safety-by-Design

Criterio	Adv. PWR	IRIS
Defense-in-Depth, DID	Passive/ Active Safety	safety-by-Design no active system
Class-IV design basis events	8	1
Core damage frequency, CDF	10^{-6} - 10^{-7}	$\sim 10^{-8}$
Large/early release frequency, LERF	10^{-6} - 10^{-8}	$\sim 10^{-9}$

PRESTAZIONI E COSTI – La potenza dei reattori Gen III si colloca nel range 1100-1600 MWe (3100-4300 MWth) per i reattori di grande taglia, e nel range 100-350 MWe (300-1000 MWth) per quelli di piccola taglia (e.g., IRIS) destinati alla produzione combinata di elettricità, calore e/o acqua potabile. I rendimenti sono rispettivamente intorno a 35-37% e 33%, con fattori di carico (capacity factor) pari a 90-92%. In termini di emissioni di gas serra, un impianto nucleare da 1000 MWe permette di evitare l'emissione di circa 6.5 milioni di tonnellate di CO₂ rispetto ad un impianto a carbone di pari potenza. I tempi di costruzione previsti sono almeno di circa 5 anni, assumendo 1.5 anni per processi autorizzativi già collaudati e per la preparazione del sito, 3 anni per la costruzione e 0.5 anno per prove pre-avviamento. I costi di investimento (*overnight capital cost*²) dichiarati per le prime unità EPR in costruzione in Europa, vanno dai 1875 €/kWe stimati per l'EPR di Olkiluoto (Finlandia) nel 2003, ai 2063 €/kWe per l'EPR di Flamanville (Francia) nel 2007, recentemente incrementati a circa 2500 €/kWe. Per le due unità EPR in Cina (Taishan, 2007) il costo è di circa 1100 €/kWe, con condizioni di contratto particolari che prevedono una partnership tra Areva, EdF e società nazionali cinesi. I dati di costo disponibili per AP1000 si riferiscono alle 4 unità che verranno realizzate in Cina (Sanmen e Haiyang) e alle altre 6 ordinate dalle utilities USA. Il costo overnight per le unità cinesi è circa 2230 \$/kWe (2007), mentre per gli USA i costi overnight dichiarati dai *vendors* (Giugno 2008) sono: W-AP1000: 3000 \$/kWe; GE-Hitachi ESBWR: 3000 \$/kWe; GE-Hitachi ABWR: 3000 \$/kWe. I costi dichiarati dalle utilities USA sono in generale più elevati, ma includono interessi passivi, inflazione e overrun-contingency (la variabilità del cambio euro/dollaro può anche giocare un ruolo non trascurabile). Per la versione americana del progetto EPR (US-EPR), sottoposta a certificazione presso l'organo di controllo americano (NRC), il costo di capitale *overnight* livellato sulle prime 4 unità e comprensivo delle penalizzazioni first-of-a-kind (FOAK) è stimato in 2400 \$/kWe. Per il reattore IRIS è previsto un costo di circa 3000 \$/kWe per il primo esemplare (FOAK), sul quale però, i costi di sviluppo e licensing del progetto incidono, nella misura del 50%. I costi di generazione elettrica (LCOE³) relativi ai due reattori EPR e AP1000, sono compresi rispettivamente tra 33 e 55 €/MWh e tra 33 e 78 \$/MWh e sono stimati assumendo: ● overnight capital cost: 2000 €/kWe (EPR) e (2000-3000 \$/kWe (AP1000); ● tasso d'interesse: (5-10)%; ● costi O&M: 10-15 \$/MWh; costo del combustibile (incluso smaltimento scorie): 7-9 \$/MWh; ● costi di decommissioning: 800 \$/kWe. L'ipotesi di un tasso d'interesse del 12%, ponderato tra la parte di investimento finanziata con debito e la parte finanziata da investitori privati (equity), porterebbe ad un valore del LCOE pari a circa 63 €/MWh per EPR e 94 \$/MWh per AP1000.

POTENZIALE E BARRIERE – I reattori Gen III si candidano ad essere i protagonisti del rilancio dell'energia nucleare sotto la spinta dell'alto prezzo dei combustibili

fossili, della necessità di contenere le emissioni di CO₂ e di accrescere la sicurezza degli approvvigionamenti energetici. In base alle proiezioni dell'Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC, 2007) la domanda elettrica globale è destinata a raddoppiare entro il 2030. Assumendo meccanismi di incentivazione per la riduzione delle emissioni pari a 50 \$/tCO₂, la quota nucleare della produzione elettrica potrebbe passare dall'attuale 16% (2650 TWh) al 18% nel 2030. Una variante ottimistica dello scenario prevede una crescita della quota nucleare fino al 30%. I reattori Gen III si candidano a coprire la domanda in attesa dell'avvento di reattori Gen IV, oltre il 2030. I reattori di piccola taglia tipo IRIS potrebbero conquistare quote di mercato nei paesi in via di sviluppo, dotati di infrastrutture e reti elettriche limitate. Tali reattori presentano infatti particolari vantaggi sul piano economico per i ridotti investimenti richiesti, l'uso di dispositivi di sicurezza passiva e la modularità che consente di dislocare gli investimenti nel tempo, con evidenti vantaggi rispetto ai grandi impianti. Le tradizionali barriere allo sviluppo dell'energia nucleare rimangono l'alto costo di capitale, il rischio di investimento, la gestione delle scorie, l'accettabilità sociale e la proliferazione nucleare. I primi due aspetti appaiono oggi mitigati dal notevole rialzo del prezzo dei fossili, dall'esigenza di diversificare gli approvvigionamenti energetici e dagli incentivi per la riduzione delle emissioni, elementi che concorrono a rendere l'energia nucleare competitiva, con prospettive di futuri crescenti vantaggi. Misure di sostegno governative, quali crediti d'imposta sulla produzione, garanzie sugli investimenti e coperture assicurative dei rischi per i nuovi impianti accrescono i vantaggi dell'energia nucleare. L'esperienza di paesi quali Finlandia, Svezia, Francia e USA mostra che la gestione sicura delle scorie nucleari è oggi un problema di accettazione socio-politica più che di carattere tecnico-scientifico. L'accettabilità sociale dell'energia nucleare risente profondamente del sistema informativo e degli effetti economici indotti dal rialzo dei prezzi dei fossili. Recenti rilevazioni a livello europeo (Eurobarometer-297, Giugno 2008) mostrano un miglioramento del livello di accettabilità. Il rischio di proliferazione può essere contenuto sia attraverso l'implementazione di salvaguardie internazionali più efficaci, sia producendo e ritrattando il combustibile in centri internazionali sotto la tutela di organismi di controllo (IAEA), sia in virtù delle caratteristiche migliorative dei reattori Gen III (in particolare IRIS) che prevedono il prolungamento del ciclo di ricarica da 4 a 8 anni e l'inaccessibilità al combustibile per l'esercente del reattore, in accordo con i criteri delineati nell'ambito della Global Nuclear Energy Partnership (GNEP). La possibilità, inoltre, di riciclare il plutonio utilizzando combustibile a base di ossidi misti di Plutonio e Uranio o anche combustibili innovativi "non proliferanti" a matrice inerte, rende i reattori Gen III resistenti verso i rischi di proliferazione.

² Al netto degli interessi passivi, inflazione e overrun-contingency

³ Si definisce *Levelized Cost of Electricity* il costo medio dell'energia elettrica, comprensivo di costi di capitale, interessi passivi, esercizio, manutenzione, combustibile, trattamento rifiuti e decommissioning, mediato sulla vita del reattore e attualizzato alla data di inizio esercizio.

Tab. 3 – Impianti Nucleari di III Generazione: Prestazioni e Costi*

Prestazioni Tecniche	Valori tipici e range riportati in ambito internazionale		
Energy input (nuclear fuel), t/GWe-yr	27 (UOx); 24 (4%-enriched U); 195 (U-nat)		
Output (electricity), kWh/GWe-yr	6-7 billions (8)		
Efficiency, %	33 (IRIS); 37 (EPR)		
Construction time, yr	6 (reference value)		
Technical lifetime, yr	60		
Load (capacity) factor, %	90-92 (actual utilization factor)		
Max. (plant) availability, %	96-97 (max. utilization factor incl. time for O&M)		
Typical (capacity) size, MWe	1100-1600		
Installed (existing) capacity, GWe	14 (4 EPR, 8 AP1000 in construction/ordered in Finland, France, China, US)		
Impatto Ambientale	Valori tipici e range riportati in ambito internazionale		
CO ₂ emissions, kg/MWh	2-60		
Other gaseous pollutants, kg/MWh	SOx: 3-50; NOx: 2-100		
Nuclear waste, m ³ /MWh	LLW/ILW: 7-14 10 ⁻⁶ equal to 50-100 m ³ /GWe-yr (once-through cycle) LLW/ILW: 10-27 10 ⁻⁶ equal to 70-190 m ³ /GWe-yr (fuel recycling) HLW: 7 10 ⁻⁶ equal to 50 m ³ /GWe-yr (from direct spent fuel disposal) HLW: 3.6 10 ⁻⁶ equal to 5 m ³ /GWe-yr (glass from recycling) +20 m ³ other mat.)		
Land use, ha/MW	0.06-0.25 (1.6 GWe EPR); 0.01 (4x335 MWe IRIS modular reactor)		
Water use/consumption, m ³ /MWh	103 (once-through cooling; river/sea water use with ΔT=17°); 0.8 (dry cooling towers); 2.5 (recirculating wet cooling towers)		
Special materials use	Zirconium (3kg/MWe-y); steel (40 t/MWe); concrete (190 m ³ /MWe); copper, niobium, indium, cadmium, boron, beryllium, nickel, chromium.		
Valutazioni Economiche e Costi (US\$ 2008)	Valori tipici e range riportati in ambito internazionale		
Capital cost, \$/kWe	2000-3200		
Total O&M cost, \$/MWh	10-15		
Fuel cost, \$/MWh	7-9		
Economic lifetime, yr	60		
Decommissioning cost, \$/kWe	500		
Waste treatment cost, \$/MWh	1-2 (included in the fuel cost and equal to 20% of the fuel cost (US, France)		
Interest rate, %	10		
Electricity cost, \$/MWh (€/€ exch. Sept. 2008)	55-78 (LCOE: upper estimate based on AP1000 and EPR FOAK cost)		
Market share, %	3.8 (current market penetration for plants ordered and/or under-construction)		
Average Employment, unit-yr/MW	4.6-6.8 (life-cycle extrapolation including construction, operation, decommis.)		
Proiezioni	2020	2030	2050
Efficiency, %	35-37	35-37	35-37
Capital cost, \$/kWe	2200-3000	2500	2500
Total electricity cost, \$/MWh	55-78	55	55
Market share (global electricity share), %	16	18	18(30)
Figures suggested for projection studies			
Riferimenti e Ulteriori Informazioni – Nuclear Power in the World Today (WNA website, Aug. 2007); Nuclear Power Reactors (WNA website, Nov. 2007); Nuclear Energy Outlook (OECD-NEA 2008); Resources & Statistics (NEI website); A turnkey EPR Project Olkiluoto 3 (AREVA, Sep. 2005); Presentation Technique du Projet Flamanville 3 (presentation EdF, Nov. 2004); AP1000 Ready to Meet Tomorrow's Power Generation Today (Westinghouse, 2007); IRIS - A global approach to nuclear power renaissance (Nuclear News, Sep. 2003); A Technology Roadmap for Gen IV Nuclear Energy Systems (US-DOE-NERAC, 2002).			
Principali Istituzioni e Operatori - www.iaea.org ; www.nea.org ; www.iea.org ; www.cea.fr ; www.ipcc.ch ; www.areva.com ; www.westinghouse.com ; www.gepower.com ; www.edf.fr ; www.energy.gov/energysources/nuclear.htm ; www.gnep.energy.gov ; http://nuclear.energy.gov/neri/neNERIresearch.html ; http://www.eia.doe.gov/fuelnuclear.html			

(*) I dati in tabella sono in lingua inglese per facilitare confronti con fonti internazionali

Tab .4 - Informazioni sulle attività svolte da ENEA

Processi/tecnologie sviluppati da ENEA e motivazione delle scelte Termo-fluidodinamica del reattore IRIS in condizioni di configurazione compatta del circuito primario (tutti i componenti alloggiati nel vessel del reattore); schermaggio; analisi sismiche; valutazione costi. L'interesse ENEA è motivato dalla rilevanza della linea progettuale, dalle risorse impiantistiche e di competenze disponibili presso ENEA e presso la società partecipata SIET (Piacenza).
Realizzazioni e impianti dimostrativi Circuito per la simulazione integrale del primario, del secondario e del sistema di contenimento del reattore IRIS (presso SIET)
Obiettivi di R&S, risultati conseguiti e attesi da ENEA Dimostrazione della risposta in sicurezza del reattore IRIS ai transitori operazionali e incidentalia supporto del processo di licensing presso US-NRC, nell'ambito della partecipazione italiana al Consorzio IRIS.
Risorse impegnate in attività di R&S e dimostrazione Personale: ENEA: 4 professional-yr; SIET 15 p-yr; CIRTEN 6 p-yr. Budget 2007-2008: 3.5 milioni di Euro di cui 0.3 ENEA, 2.6 SIET, 0.65 CIRTEN); Budget 2009: 3 milioni di Euro.
Collaborazioni e Finanziamenti Esterni <ul style="list-style-type: none"> ● Accordo di Programma triennale per la ricerca di sistema fra ENEA e Ministero dello Sviluppo Economico : Tema "Nuovo Nucleare da Fissione"; budget annuale per attività su reattori di generazione III+: circa 3 milioni di Euro. ● Contratto SARNET (VI PQ) e SARNET 2 (VII PQ) della Commissione Europea. ● Collaborazione italiana ENEA-CIRTEN-Ansaldo Nucleare-Mangiarotti Nuclear al Consorzio Internazionale IRIS guidato da Westinghouse. ● Accordo bilaterale I-NERI ENEA Oak Ridge National Labs (US): Nuclear-related Technology Research and Development .
Brevetti, pubblicazioni, articoli, citazioni su primarie riviste/pubblicazioni scientifiche, congressi e siti web qualificati <ul style="list-style-type: none"> ● IRIS A global approach to nuclear power renaissance (Nuclear News, Sep. 2003), http://hulk.cesnef.polimi.it/ ● IRIS Design Overview and Status Update (13th International Conference on Nuclear Engineering Beijing, China, May 16-20, 2005 ICONE13-50442) ● IRIS – International Reactor Innovative and Secure: Progress in Development, Licensing and Deployment Activities (Proceedings of the 6th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids Dubrovnik, Croatia, 21-25 May 2006) ● IRIS – An advanced grid-appropriate PWR for near-term deployment ● The SPES-3 experimental facility design for the IRIS reactor integral reactor simulation ● The ELSY Project ● The Potential of the LFR and the ELSY project ● ELSY: Neutronic Design Approach ● EUROTRANS European Research Programme for the Transmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System ● Status and trend of core design activities for heavy liquid metal cooled Accelerator Driven Systems ● EFIT: The European Facility for Industrial Transmutation of Minor Actinides ● EFIT Fuel cycle analysis by deterministic and Monte Carlo methods ● A-BAQUS: a multi-entry graph assisting the neutronic design of an ADS ● Corrosion experiments in flowing LBE ● ENEA Experience in LBE technology ● Neutronic Analysis of the TRADE Demonstration Facility ● Inert matrix fuel behaviour in test irradiations ● Inert matrix and thoria fuel irradiation at an international research reactor ● Westinghouse AP1000 internals heating rate distribution calculation using a 3-D deterministic transport method ● Failure mode and effect analysis application for the safety and reliability analysis of a thermal-hydraulic passive system ● Resonance capture cross section of 207Pb ● New measurements of neutron capture resonances in 209Bi ● Neutron capture cross section of 232Th measured at the n_TOF facility at CERN in the unresolved resonance region up to 1 MeV ● Fission of light actinides: 232Th(n,f) and 231Pa(n,f) reactions ● NEA-IEMPT - Information Exchange Meeting on Actinides and Fission Products Partitioning and Transmutation ● ARWIF - Workshop on Advanced Reactors With Innovative Fuels ● FISA - EU Research and Training in Reactor Systems ● GLOBAL ● ICAPP - International Congress on Advances in Nuclear Power Plants ● ICENES - International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems ● IPASS - International Workshop on Passive Safety Systems in Advanced PWRs ● PHYSOR - International Conference on Reactor Physics ● EURADWASTE – European Commission Conference on the Management and Disposal of Radioactive Waste ● Workshop on Materials for HLM-cooled Reactors and Related Technologies ● AccApp – International Conference on Accelerator Applications ● NEA-HPPA - International Workshop on High Power Proton Accelerators

FORTUNATO VETTRAINO è Ricercatore Senior presso il Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare dell'ENEA (CR Bologna) dove ha lavorato per anni alla progettazione, costruzione e prova di elementi di combustibile dei reattori veloci autofertilizzanti nell'ambito dei progetti PEC, SPX-1 e PRISM, in collaborazione con CEA (Francia) e GE (US). Successivamente ha contribuito a studi progettuali per reattori a fusione (Demo) e alle analisi di sicurezza del progetto italiano Mars e del reattore affissione PIUS, in collaborazione con ABB Atom. E' stato project leader dello sviluppo di un nuovo tipo di combustibile per il bruciamento del plutonio in reattori ad acqua leggera (LWR), in collaborazione con Politecnico di Milano, Halden Reactor Project, ITU-Karlsruhe and Paul Scherrer Institute. Ha contribuito al progetto Accelerator Driven System dell'ENEA ed ha assicurato la partecipazione italiana al progetto internazionale IRIS. E' rappresentante italiano in gruppi di lavoro tecnici dell'International Atomic Energy Agency (IAEA, Vienna) e della Nuclear Energy Agency (OECD-NEA, Paris). Come delegato nel NEA Working Group on Nuclear Energy Economics e nel IAEA Small-Medium Reactor Analysis Group, si occupa di scenari energetici e analisi economiche nel settore nucleare. Ha conseguito la laurea in Ingegneria Nucleare presso l'Università di Roma nel 1975.

