



# Programma di Sviluppo per la Tecnologia Energetica

Energia Nucleare



Per ulteriori informazioni sul progetto Energy Technology Roadmaps e per scaricare altre mappe, visitare il sito [www.iea.org/roadmaps](http://www.iea.org/roadmaps).

Nuclear Technology Roadmap, © OECD/IEA and OECD/NEA, 2010.

L'OECD/AIE/AEN è autore della versione originale in lingua inglese, ma non si assume responsabilità riguardo all'accuratezza o completezza della presente traduzione. Questa pubblicazione viene tradotta sotto la responsabilità unica della Rappresentanza Permanente dell'Italia presso OECD/AIE/AEN.

Il presente rapporto è il risultato dell'impegno di collaborazione tra l'AIE, l'AEN, i relativi Paesi membri e vari consulenti ed esperti di tutto il mondo. I lettori di questo rapporto prenderanno le proprie decisioni aziendali in modo indipendente, a proprio rischio e, in particolare, senza fare affidamento sul presente rapporto in maniera inappropriata. Nessun elemento del presente rapporto deve essere considerato consiglio professionale e non si rilascia alcuna dichiarazione o garanzia, né esplicita né implicita, in merito alla completezza o accuratezza del contenuto del presente rapporto. Le agenzie AIE e AEN non si assumono responsabilità di alcun tipo per danni diretti o indiretti derivanti da qualsivoglia uso del presente rapporto o del relativo contenuto. Le bozze sono state esaminate da numerosi esperti. Tuttavia, le opinioni espresse non rappresentano necessariamente le opinioni o le politiche di AIE, AEN o dei singoli Paesi membri.

# Premessa

Le attuali tendenze riguardanti l'uso e l'approvvigionamento di energia sono chiaramente insostenibili a livello economico, ambientale e sociale. Se non sarà intrapresa alcuna azione decisiva, le emissioni di anidride carbonica derivanti dal settore energetico saranno più che raddoppiate entro il 2050 e l'aumento della domanda di petrolio accentuerà le preoccupazioni relative alla sicurezza delle forniture. Possiamo e dobbiamo cambiare la rotta attuale, ma tale scelta comporterà una rivoluzione nel settore dell'energia e un ruolo cruciale in tal senso sarà svolto dalle tecnologie energetiche a bassa emissione di carbonio. L'efficienza energetica, molti tipi di energie rinnovabili, la cattura e il sequestro del carbonio, l'energia nucleare e le nuove tecnologie di trasporto richiederanno tutti uno sfruttamento su larga scala se si desidera raggiungere gli obiettivi stabiliti in materia di emissioni di gas a effetto serra. È necessario coinvolgere tutti i principali Paesi e ogni settore dell'economia. Quest'impegno appare tanto più urgente se vogliamo far sì che le decisioni sugli investimenti elaborate oggi non comportino, a lungo termine, il rischio di ritrovarsi con tecnologie inferiori al livello ottimale necessario.

Si accentua la consapevolezza del bisogno urgente di trasformare le dichiarazioni politiche e il lavoro di analisi in azioni concrete. Per dare il via a questo movimento, su richiesta del G8, l'Agenzia internazionale dell'Energia (AIE) sta creando una serie di programmi di sviluppo destinati ad alcune fra le più importanti tecnologie. Tali programmi di sviluppo forniscono una solida base analitica che consente alla comunità internazionale di scegliere su quali tecnologie investire. Ciascun programma di sviluppo definisce un percorso di crescita per una particolare tecnologia da oggi al 2050, e individua gli obiettivi intermedi d'impegno tecnologico, finanziario, politico e pubblico da raggiungere per realizzare tutto il potenziale tecnologico. I programmi di sviluppo includono anche un'attenzione particolare allo sviluppo e alla diffusione delle tecnologie presso le economie emergenti. La collaborazione internazionale sarà un fattore cruciale per il raggiungimento di tali obiettivi.

Il presente programma di sviluppo per l'energia nucleare è stato elaborato congiuntamente dall'AIE e dall'Agenzia per l'Energia Nucleare (AEN) dell'OCSE. A differenza di molte altre fonti energetiche a basso contenuto di carbonio, l'energia nucleare è una tecnologia in uso ormai da più di 50 anni. I più recenti modelli di reattori nucleari sfruttano questa esperienza per offrire maggiore sicurezza e migliori prestazioni e nei prossimi anni saranno pronti per lo sfruttamento su vasta scala. Vari Paesi stanno riattivando programmi nucleari precedentemente sospesi, mentre altri stanno prendendo in considerazione tale opzione per la prima volta. La Cina in particolare sta rapidamente avviando un programma di espansione nucleare. A più lungo termine vi è un grande potenziale per nuovi sviluppi delle tecnologie relative all'energia nucleare, che potranno potenziare il ruolo svolto dal nucleare in un futuro energetico sostenibile.

Permangono tuttavia notevoli ostacoli alla rapida espansione dell'energia nucleare. La cosa più importante è che i Governi stabiliscano politiche chiare e coerenti sul nucleare, per incoraggiare gli investimenti da parte del settore privato. Anche ottenere una maggiore accettazione da parte dell'opinione pubblica sarà fondamentale: a ciò contribuiranno sia la rapida attuazione di programmi per lo smaltimento geologico delle scorie radioattive, sia il continuato funzionamento delle centrali nucleari secondo criteri di sicurezza ed efficienza economica. Inoltre per soddisfare le esigenze di un'industria nucleare in espansione dovranno crescere anche le capacità industriali e le risorse umane specializzate. Raggiungere il risultato di 1 200 GW di capacità nucleare entro il 2050 richiederà la collaborazione di tutte le parti interessate nei Governi, nelle organizzazioni di ricerca, nell'industria, nel settore finanziario e nelle organizzazioni internazionali. Il presente programma di sviluppo definisce le fasi che essi dovranno realizzare nel corso dei prossimi anni.

**Nobuo Tanaka**  
Direttore esecutivo, AIE

**Luis Echávarri**  
Direttore Generale, AEN

# Ringraziamenti

Questa pubblicazione è stata redatta dal Dipartimento di sviluppo del nucleare dell'Agazia per l'Energia Nucleare e dal Dipartimento per le politiche tecnologiche dell'energia dell'Agazia Internazionale per l'Energia. Peter Taylor, direttore della Energy Technology Policy Division (Divisione politiche per le tecnologie energetiche), e Tom Kerr, coordinatore del progetto Programmi di sviluppo per le tecnologie energetiche, hanno fornito guida e orientamenti preziosi.

Martin Taylor dell'AEN e Cecilia Tam dell'AIE sono gli autori principali del presente programma di sviluppo. Altri contributi sono stati offerti da Steven Lee dell'AIE, Stan Gordelier e Evelyne Bertel dell'AEN. Delphine Grandrieux, Corinne Hayworth e Bertrand Sadin si sono occupati del layout e del progetto grafico. Maria Elena Urso della AEN ha curato la verifica tecnica della presente edizione italiana.

Il lavoro è stato diretto dal Comitato dell'AIE sulla Tecnologia e la Ricerca energetica e il Comitato dell'AEN per gli Studi Tecnici ed Economici sullo Sviluppo dell'Energia Nucleare e il Ciclo del Combustibile. I membri dei due comitati hanno fornito importanti suggerimenti e commenti contribuendo a migliorare il documento.

Questo programma di sviluppo ha inoltre beneficiato enormemente dei commenti, delle idee e della guida fornita da esperti del settore privato, Governi e organizzazioni non governative che hanno partecipato ai seminari ed esaminato le bozze. Gli autori desiderano ringraziare tutti coloro che hanno contribuito, troppo numerosi per poterli nominare uno a uno. Ringraziamenti speciali vanno all'Associazione mondiale per il nucleare, che ha ospitato uno dei seminari e organizzato la partecipazione del settore industriale, e a Steven Libbrecht di Prospex e Peter van Veen di De Ruijter Strategy per aver reso possibili i seminari.

**Per richiedere ulteriori informazioni su questo documento, contattare:**

**Cecilia Tam**, IEA Segretaria  
Tel.+33 1 40 57 67 55  
E-mail: [cecilia.tam@iea.org](mailto:cecilia.tam@iea.org)

**Martin Taylor**, NEA Segreteria  
Tel +33 1 45 24 10 67  
E-mail: [martin.taylor@oecd.org](mailto:martin.taylor@oecd.org)

# Principali risultati

- Lo stato attuale della tecnologia dell'energia nucleare è il risultato di oltre 50 anni di sviluppo ed esperienza operativa. I più recenti modelli di reattori nucleari oggi in costruzione uniscono gli insegnamenti tratti dall'esperienza maturata ai recenti sviluppi tecnologici per offrire un livello superiore di sicurezza e prestazioni. L'energia nucleare è una tecnologia a basso contenuto di carbonio matura, già disponibile oggi per un più ampio sfruttamento.
- In linea con lo scenario BLUE Map dell'AIE teso alla riduzione del 50% delle emissioni di anidride carbonica derivanti dalla produzione di energia, questo programma di sviluppo fissa un obiettivo di potenza nucleare installata pari a 1 200 GW entro il 2050, capace di fornire approssimativamente il 24% dell'elettricità a livello mondiale (dagli attuali 370 GW che forniscono il 14% dell'elettricità). In tal modo, l'energia nucleare offrirebbe, in quella data, il singolo contributo più importante alla produzione elettrica, costituendo così uno dei principali contribuenti alla "decarbonizzazione" dell'alimentazione elettrica.
- Questo livello di sfruttamento dell'energia nucleare non richiederà avanzamenti tecnologici significativi. Gli ostacoli a un più rapido sviluppo nucleare a breve e medio termine sono principalmente di carattere politico, industriale e finanziario. Tuttavia, lo sviluppo continuo delle tecnologie dei reattori e del ciclo del combustibile nucleare sarà importante affinché l'energia nucleare raggiunga il suo pieno potenziale in concorrenza con altre fonti di energia a bassa emissione di carbonio.
- Un sostegno politico chiaro e stabile all'energia nucleare, nel quadro di una strategia nazionale che soddisfi politica energetica e obiettivi ambientali, è un prerequisito indispensabile per qualsivoglia programma nucleare di successo. Sarà inoltre necessario mettere in atto strutture legali e normative efficienti ed efficaci. In particolare, nei Paesi che stanno avviando o riattivando programmi nucleari, i Governi dovranno assumere un ruolo attivo, collaborando con tutte le parti interessate per superare gli eventuali ostacoli.
- Il finanziamento di investimenti di grande entità, necessario alla creazione di centrali nucleari, costituirà un ostacolo importante in molti Paesi. Gli investitori del settore privato potrebbero considerare gli investimenti nel nucleare troppo incerti, almeno fino alla buona riuscita di progetti recenti in campo nucleare. In alcuni casi potrebbe essere necessario un sostegno governativo, ad esempio con garanzie sui prestiti. Anche la stabilità dei prezzi nei mercati dell'elettricità e del carbone contribuirà ad incoraggiare gli investimenti negli impianti nucleari.
- La capacità industriale globale di costruire impianti nucleari dovrà raddoppiare entro il 2020, affinché la potenza nucleare installata possa crescere nel decennio del 2020 e oltre, come previsto dallo scenario BLUE Map. Le capacità del ciclo del combustibile, in cui rientra altresì la produzione di uranio, dovranno anch'esse aumentare nella stessa misura. Ciò richiederà notevoli investimenti nei prossimi anni che proseguiranno solo quando sarà evidente la prospettiva di un numero sufficiente di ordini.
- Un'industria nucleare in espansione richiederà una disponibilità molto più ampia di risorse umane, tra cui scienziati e ingegneri altamente qualificati e personale specializzato. Anche le aziende di pubblica utilità, gli enti di regolamentazione, i Governi e le altre parti interessate avranno bisogno di un numero crescente di specialisti del settore nucleare. Le assunzioni da parte dell'industria e i programmi di formazione dovranno essere incrementati. Anche i Governi e le università giocano un ruolo essenziale nello sviluppo delle risorse umane.
- La gestione e lo smaltimento delle scorie radioattive costituisce una componente essenziale di tutti i programmi nucleari. In particolare, è necessario progredire nella costruzione e messa in funzione di strutture per lo smaltimento di combustibile esaurito e scorie ad alta attività. Sebbene le soluzioni tecnologiche si trovino in una fase avanzata di sviluppo, vi sono spesso difficoltà per ottenere un consenso politico e pubblico circa il loro sfruttamento.
- Il sistema internazionale di salvaguardia della tecnologia e dei materiali nucleari deve essere mantenuto e consolidato ove necessario. È inoltre indispensabile garantire la protezione fisica dei siti e dei materiali nucleari. Evitare la diffusione delle tecnologie sensibili consentendo al contempo l'accesso ad approvvigionamenti affidabili di combustibile costituirà una sfida sempre più importante. Tali questioni possono essere affrontate soltanto attraverso un sistema di cooperazione e accordi conclusi su scala internazionale.
- Varie tecnologie in fase di sviluppo tese alla costruzione degli impianti nucleari di prossima generazione offrono il potenziale per un miglioramento sotto il profilo della sostenibilità, dell'efficienza, della resistenza alla proliferazione, della sicurezza e dell'affidabilità. Alcune saranno idonee per un ventaglio più vasto di ubicazioni e per nuove applicazioni potenziali. Ciascuna comporta un progresso tecnologico significativo e richiederà una dimostrazione su scala reale prima di qualunque sfruttamento commerciale. Tali sistemi potrebbero iniziare ad apportare un contributo alla capacità nucleare prima del 2050.

# Indice

<b>Premessa</b>	<b>1</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>2</b>
<b>Principali risultati</b>	<b>3</b>
<b>Indice</b>	<b>4</b>
<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
Il progetto Energy Technology Roadmaps	5
Opportunità e sfide per l'espansione nucleare	6
Lo scopo del programma di sviluppo	8
<b>L'energia nucleare oggi</b>	<b>9</b>
La gestione delle risorse nucleari esistenti	9
La tecnologia dell'energia nucleare per uno sfruttamento a breve termine	12
La situazione del ciclo del combustibile nucleare	14
La gestione delle scorie radioattive	16
<b>Sfruttamento dell'energia nucleare fino al 2050: azioni e obiettivi intermedi</b>	<b>17</b>
La crescita della potenza nucleare nello scenario BLUE Map	17
La prospettiva di espansione nucleare verso il 2020	18
La preparazione a uno sfruttamento più rapido dopo il 2020	19
I requisiti del ciclo del combustibile nucleare	21
<b>Sviluppo e sfruttamento della tecnologia: azioni e obiettivi intermedi</b>	<b>25</b>
Lo sviluppo evolutivo delle tecnologie attuali	25
Le soluzioni per lo smaltimento del combustibile esaurito e delle scorie ad alta attività	25
Lo sviluppo di una nuova generazione di tecnologie nucleari	27
La situazione attuale e il potenziale di piccoli reattori modulari	32
L'energia nucleare come alternativa nel settore del riscaldamento e dei trasporti	33
<b>Politiche e aspetti finanziari e sociali: azioni e obiettivi intermedi</b>	<b>35</b>
L'importanza di un forte sostegno dei poteri pubblici	35
L'istituzione di quadri normativi e regolamentari	35
Il finanziamento di nuovi impianti nucleari	37
Il coinvolgimento della società civile	39
La capacità di costruzione nei Paesi che pianificano un programma nucleare	39
La non proliferazione, la protezione fisica e la sicurezza dell'approvvigionamento di combustibile nucleare	40
<b>Piano d'azione del programma di sviluppo</b>	<b>41</b>
Azioni ad opera dei Governi e di altri enti pubblici	41
Azioni ad opera delle industrie nucleari e fornitrici di elettricità	43
Azioni ad opera di altre parti interessate	44
<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>47</b>

# Introduzione

## Il progetto Energy Technology Roadmaps

V'è un'esigenza urgente di accelerare lo sviluppo di tecnologie energetiche pulite avanzate al fine di rispondere alle sfide globali di sicurezza energetica, cambiamento climatico e sviluppo sostenibile. Tale sfida è stata colta dai Ministri dei Paesi del G8, nonché di Cina, India e Corea durante il meeting del giugno 2008 ad Aomori, Giappone, in occasione del quale essi hanno chiesto all'AIE di preparare delle *roadmap* ovvero dei programmi di sviluppo per il progresso di tecnologie energetiche innovative.

*“Definiremo un’iniziativa internazionale con il supporto dell’AIE per elaborare programmi di sviluppo in materia di tecnologie innovative e cooperare tramite vecchi e nuovi partenariati, ad esempio per la cattura e il sequestro del carbonio (CCS) e a favore di tecnologie energetiche avanzate. Nel riaffermare il nostro impegno assunto a Heiligendamm teso a sviluppare, implementare e promuovere con urgenza tecnologie energetiche pulite, approviamo e incoraggiamo l’istituzione di un’ampia gamma di strumenti d’intervento in materia di energia nucleare quali assetti normativi trasparenti, incentivi economici e fiscali e partenariati tra settore pubblico e privato per favorire gli investimenti del settore privato nelle nuove tecnologie...”*

Per raggiungere tale ambizioso obiettivo, l'AIE sta elaborando una serie di Programmi di Sviluppo in materia di Tecnologia Energetica che interessano 19 tipi di tecnologie tanto sotto il profilo della domanda quanto dell'offerta. L'obiettivo complessivo è l'avanzamento dello sviluppo globale e l'adozione delle principali tecnologie necessarie al raggiungimento di una riduzione del 50% delle emissioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) entro il 2050.

L'AIE guida l'elaborazione di tali programmi di sviluppo, sotto una direzione internazionale e in stretta collaborazione con il settore industriale. Questo programma di sviluppo in materia di energia nucleare è stato elaborato congiuntamente dall'AIE e dall'Agenzia per l'Energia Nucleare (AEN) dell'OCSE.

I programmi di sviluppo consentiranno ai Governi e ai partner industriali e finanziari di identificare le azioni e di implementare le misure necessarie per accelerare lo sviluppo e l'adozione delle tecnologie richieste. Questo processo inizia fornendo una chiara definizione degli elementi necessari per ciascun programma di sviluppo. L'AIE ha definito un programma di sviluppo in materia di tecnologia energetica come:

*“... un insieme dinamico di requisiti tecnici, programmatici, legali, finanziari, di mercato e organizzativi individuati dalle parti interessate coinvolte nel processo di elaborazione dei suddetti requisiti. Questa iniziativa porterà al potenziamento e al miglioramento della condivisione tra i partecipanti di tutte le informazioni relative alla ricerca, sviluppo, dimostrazione e sfruttamento (RDD&D, dall'inglese Research, Development, Demonstration & Deployment) per ciascuna tecnologia. Il fine è l'accelerazione del processo di RDD&D nel suo complesso al fine di ridurre i tempi di adozione di ogni tecnologia specifica da parte del mercato”.*

Ogni programma di sviluppo identifica i principali ostacoli, opportunità e provvedimenti affinché i responsabili governativi e i partner industriali e finanziari possano accelerare le iniziative di RDD&D a vantaggio di tecnologie specifiche pulite tanto su scala nazionale quanto internazionale.

### Scenario BLUE Map, Energy Technology Perspectives 2010

Questo programma di sviluppo delinea un insieme di misure quantitative e di azioni qualitative che definiscono un percorso globale per lo sfruttamento dell'energia nucleare fino al 2050. Come punto di partenza si considera lo scenario BLUE Map predisposto nell'Energy Technology Perspectives (ETP) dell'AIE, che descrive in che modo si possono trasformare le tecnologie energetiche entro il 2050 per raggiungere l'obiettivo globale di dimezzamento delle emissioni annuali di CO<sub>2</sub> rispetto ai livelli del 2005. Si tratta di un modello MARKAL di tipo bottom-up che usa l'ottimizzazione dei costi per identificare i mix a costo minimo di tecnologie energetiche e carburanti atti a soddisfare la domanda di energia, dati alcuni vincoli come la disponibilità di risorse naturali. Il modello ETP è un modello globale basato su quindici regioni che permette di analizzare le scelte effettuate in materia di carburanti e tecnologie in seno a tutto il sistema energetico. La rappresentazione dettagliata delle opzioni contenuta nel modello comprende circa 1 000 tecnologie singole. Il modello è stato sviluppato nel corso di diversi anni e usato in molte analisi relative al settore energetico mondiale. Inoltre, il modello ETP è stato integrato da modelli dettagliati sotto il profilo della domanda per tutti i principali utilizzi finali nei settori dell'industria, dell'edilizia e dei trasporti.

## Opportunità e sfide per l'espansione nucleare

L'analisi contenuta nell'*Energy Technology Perspectives 2010* (ETP - AIE, 2010) prevede che entro il 2050 le emissioni di CO<sub>2</sub> relative all'energia raddoppieranno rispetto ai livelli del 2005 nello scenario *Baseline* il quale assume che nessuna nuova politica o provvedimento saranno messi in atto per contenere tali emissioni. Per abbattere questo aumento previsto delle emissioni di CO<sub>2</sub> sarà necessaria una rivoluzione nelle tecnologie energetiche che comprenda un'ampia varietà di soluzioni, quali maggiore efficienza energetica, maggiore utilizzo di energie rinnovabili, cattura e sequestro geologico dell'anidride carbonica prodotta dall'utilizzo residuo di combustibili fossili e maggiore sfruttamento dell'energia nucleare.

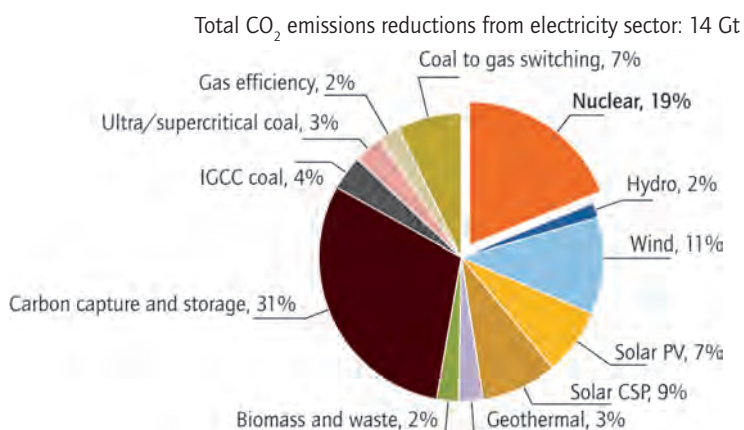
Lo scenario BLUE Map proposto dall'ETP, che valuta le strategie per la riduzione, entro il 2050, del 50% delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dal settore energetico rispetto ai livelli del 2005, conclude che l'energia nucleare giocherà un ruolo importante ai fini del conseguimento di questo obiettivo nel modo più efficiente dal punto di vista dei costi (Figura 1). Si prevede che la capacità nucleare mondiale raggiungerà all'incirca 1.200 GW entro il 2050, assicurando così circa il 24% dell'approvvigionamento globale di elettricità.

Si tratta quasi di raddoppiare il livello di 610 GW presente nello scenario *Baseline*.

L'analisi BLUE Map ipotizza vincoli sulla velocità con cui potrà essere sviluppata la capacità nucleare. Tuttavia, lo scenario BLUE High Nuclear proposto dall' ETP mostra che l'ipotesi di una maggiore capacità nucleare in grado di fornire circa il 39% dell'elettricità a livello mondiale entro il 2050 ridurrebbe il costo medio della generazione di elettricità di circa l'11% nel 2050 rispetto allo scenario BLUE Map. L'espansione dell'energia nucleare è dunque un elemento essenziale per una strategia efficiente dal punto di vista dei costi e finalizzata a una riduzione sostanziale delle emissioni a livello globale.

L'energia nucleare presenta un livello di sviluppo tecnologico e di sfruttamento molto diverso rispetto alla maggior parte delle altre fonti energetiche a basso contenuto di carbonio. Anche se la crescita dell'energia nucleare negli ultimi vent'anni ha registrato una stasi, si tratta di una tecnologia matura con oltre 50 anni di esperienza operativa e commerciale che non richiede progressi tecnologici rivoluzionari per poter essere ulteriormente diffusa. Le centrali nucleari di più recente progettazione, i cui primi esempi sono in costruzione, mirano ad assicurare livelli più elevati di prestazioni e sicurezza.

**Figura 1. Contributo delle diverse tecnologie alla riduzione annuale delle emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte dal settore elettrico nel 2050, in base allo scenario BLUE Map, confrontato con le emissioni al 2050 in base allo scenario Baseline**



Fonte: IEA, 2010.

Nota: le cifre riportate rappresentano solo il contributo aggiuntivo alla riduzione delle emissioni nello scenario BLUE Map; lo scenario Baseline ipotizza già una significativa espansione nucleare.

**PUNTO SALIENTE: l'energia nucleare dà un contributo fondamentale alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> nello scenario BLUE Map.**

Nonostante si tratti di una tecnologia consolidata, il raggiungimento del livello di sfruttamento dell'energia nucleare previsto dallo scenario BLUE Map costituirà una sfida notevole. Tuttavia, la maggior parte delle barriere potenziali alla rapida diffusione dell'energia nucleare a breve e medio termine è data da fattori politici, industriali o finanziari più che tecnologici.

Un fattore che differenzia l'energia nucleare dalla maggior parte delle tecnologie energetiche a basso contenuto di carbonio è che, almeno in alcuni Paesi, l'adozione o l'espansione di un programma nucleare può causare forti contrapposizioni nel mondo della politica e nell'opinione pubblica. Negli anni Ottanta le preoccupazioni riguardanti in particolare la sicurezza dell'energia nucleare (acute dagli incidenti di Three Mile Island e di Chernobyl) e lo smaltimento delle scorie radioattive portarono alla nascita di forti movimenti anti-nucleari in molti Paesi dell'OCSE, alcuni dei quali disponevano di ampi programmi nucleari. Di conseguenza, alcuni Paesi europei e gli Stati Uniti introdussero moratorie formali all'espansione nucleare, mirando, in alcuni casi, alla chiusura di impianti già funzionanti. Altri Paesi decisero di non proseguire lo sviluppo dei programmi nucleari pianificati.

Nonostante l'opposizione all'espansione del settore nucleare in alcuni Paesi sia diminuita negli ultimi anni, altri restano fermi oppositori. Questo potrebbe limitare la portata dell'espansione della capacità nucleare a livello mondiale. Nonostante la maggior parte dei grandi Paesi consumatori di energia stia quantomeno prendendo in considerazione un programma nucleare, l'attuazione di soluzioni efficienti per lo smaltimento delle scorie radioattive assieme al funzionamento sicuro dei reattori e degli impianti del ciclo del combustibile sarà decisiva per raggiungere la scala di espansione nucleare prevista dallo scenario BLUE Map.

Affinché un Paese avvii o continui a sviluppare un programma in materia di energia nucleare, sono necessarie politiche di sostegno chiare e continuative da parte del Governo nazionale. Ciò richiederà un vasto consenso sociale sul ruolo dell'energia nucleare nella strategia nazionale complessiva di approvvigionamento energetico e di raggiungimento degli obiettivi ambientali. Il sostegno governativo allo sviluppo del nucleare deve essere preceduto dalla messa a punto del quadro giuridico, normativo e istituzionale

necessario. Ciò comprende un sistema efficace di concessione delle licenze e di controllo normativo destinato agli impianti nucleari, oltre a una strategia per la gestione delle scorie radioattive.

Le altre sfide che un'importante espansione della capacità nucleare comporta includono:

- Il finanziamento dei grandi investimenti necessari, in particolare laddove la costruzione degli impianti nucleari deve essere affidata al settore privato.
- Lo sviluppo delle necessarie capacità industriali e delle risorse umane competenti per assicurare una crescita continuativa della capacità nucleare.
- L'espansione dell'approvvigionamento di combustibile nucleare commisurato all'aumento della potenza di generazione nucleare, con la garanzia che tutti gli utilizzatori di energia nucleare abbiano accesso a fonti affidabili di combustibile.
- L'attuazione di programmi per la costruzione e la gestione di depositi geologici per lo smaltimento di combustibile esaurito e scorie radioattive ad alta attività.
- Il mantenimento e, ove necessario, il rafforzamento dei sistemi di protezione e sicurezza del materiale e delle tecnologie nucleari sensibili, per evitarne un uso improprio a fini non pacifici.

Per fronteggiare tali sfide su ampia scala sarà ovviamente necessario qualche anno. Per questo motivo si può prevedere che lo sviluppo del nucleare sarà relativamente ridotto fino al 2020, ma saranno create le condizioni per un'espansione potenzialmente più rapida nei decenni successivi.

Nel lungo termine, affinché l'energia nucleare sviluppi appieno il proprio potenziale, sarà necessario un ulteriore avanzamento della tecnologia. Una nuova generazione di centrali nucleari dotate di cicli avanzati del combustibile, ora in fase di sviluppo, potrebbe offrire notevoli miglioramenti in termini di efficienza, sostenibilità, resistenza alla proliferazione, sicurezza e affidabilità. Esse potrebbero sfruttare appieno la possibilità di riciclo del combustibile nucleare incrementando notevolmente il potenziale energetico delle riserve di uranio. Sulla base dei programmi attuali, queste centrali potrebbero iniziare a contribuire alla capacità nucleare prima del 2050.

Il presente programma di sviluppo prende in esame unicamente l'uso di energia derivante dalla fissione nucleare, cioè la scissione del nucleo di elementi pesanti come l'uranio. Un processo molto diverso, la fusione nucleare, potrebbe essere sfruttato per la produzione di energia a lungo termine. Nella fusione, nuclei leggeri (isotopi dell'idrogeno) vengono fusi assieme liberando energia. Per ottenere questo risultato sono necessarie temperature e pressioni elevatissime, il che comporta problemi ingegneristici molto complessi che richiedono tecnologie completamente diverse rispetto a quelle usate per la fissione nucleare.

La ricerca in materia di fusione nucleare si concentra attualmente sull'International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), in costruzione in Francia. Il reattore ITER, le cui attività dovrebbero iniziare nel 2018, ha l'obiettivo di dimostrare la fattibilità della produzione di energia da fusione nei suoi 20 anni di vita operativa. Se tutto procederà secondo i piani, intorno al 2030 o 2040 potrà seguire un'ulteriore fase di dimostrazione di un sistema pratico di generazione di energia basato sulla fusione. Tuttavia, l'uso commerciale di tale tecnologia non è previsto prima del 2050 e potrebbe avere luogo anche tra molti decenni.

## Lo scopo del programma di sviluppo

Il presente programma di sviluppo prende in esame ciascuna delle sfide che si pongono per un maggiore sfruttamento del nucleare, nonché ciò che i Governi e le altre parti interessate devono predisporre per fronteggiarle. Si illustra inoltre il modo in cui si potrebbe ottenere la grande espansione dell'energia nucleare prevista nello scenario BLUE Map per i prossimi quattro decenni, quale parte di una strategia per ridurre significativamente le emissioni di CO<sub>2</sub> connesse alla produzione di energia.

L'elaborazione del presente programma di sviluppo ha compreso due seminari organizzati congiuntamente dall'AIE e dall'AEN, con la partecipazione di numerosi esperti provenienti dai settori del nucleare e dell'elettricità, nonché da Governi e organizzazioni internazionali. Il primo si è tenuto a Londra nel settembre del 2009, in cooperazione con la World Nuclear Association (l'organizzazione di categoria delle industrie

nucleari) e il secondo a Parigi nell'ottobre 2009 presso l'AIE.

Molti Paesi stanno attualmente valutando la possibilità di installare nuova capacità di generazione nucleare nel prossimo decennio e oltre. Nei prossimi anni si capirà se essi riusciranno a far avanzare questi programmi coerentemente nei tempi previsti. Di conseguenza, tale programma di sviluppo è destinato a essere un documento evolutivo, aperto a regolari aggiornamenti sulla base dei nuovi sviluppi del settore.

# L'energia nucleare oggi

La possibilità di produrre elettricità mediante l'energia nucleare fu dimostrata per la prima volta negli anni Cinquanta e le prime centrali nucleari commerciali entrarono in funzione all'inizio degli anni Sessanta. La capacità nucleare crebbe rapidamente negli anni Settanta e Ottanta, man mano che vari Paesi cercavano di ridurre la propria dipendenza dai combustibili fossili (Figura 2), specialmente dopo le crisi del petrolio degli anni Settanta. Tuttavia negli anni Novanta la crescita rallentò, tranne in Corea e in Giappone. I fattori che causarono tale stasi includono l'aumento delle preoccupazioni per la sicurezza a seguito degli incidenti di Three Mile Island e di Chernobyl, tempi e costi di costruzione per alcune centrali più elevati del previsto e una diminuzione del prezzo dei combustibili fossili.

Alla fine del 2009, vi erano 436 reattori di potenza in funzione in 30 Paesi, per un totale di 370 GW di capacità. La quota dell'energia nucleare nei Paesi con reattori in attività varia da meno del 2% a oltre il 75% (Figura 3). In totale, l'energia nucleare fornisce circa il 14% dell'elettricità a livello mondiale e il 21% dell'elettricità nei Paesi OCSE (Figura 4). L'energia nucleare e quella idroelettrica sono le uniche fonti a basso contenuto di carbonio attualmente in grado di fornire significative quantità di energia. Le centrali nucleari esistenti evitano ogni anno l'emissione in atmosfera di 2,9 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> rispetto alla generazione a carbone, ossia circa il 24% delle emissioni annue del settore energetico.

Anche se di fatto le centrali nucleari non producono direttamente CO<sub>2</sub>, non si può affermare che il nucleare sia del tutto privo di emissioni. All'elettricità prodotta dall'energia nucleare si possono attribuire emissioni indirette, dovute prevalentemente all'uso di combustibili fossili nel ciclo del combustibile. Tuttavia tali emissioni sono di almeno un ordine di grandezza inferiori alle emissioni dirette prodotte dall'uso di combustibili fossili e simili a quelle attribuibili alle fonti energetiche rinnovabili.

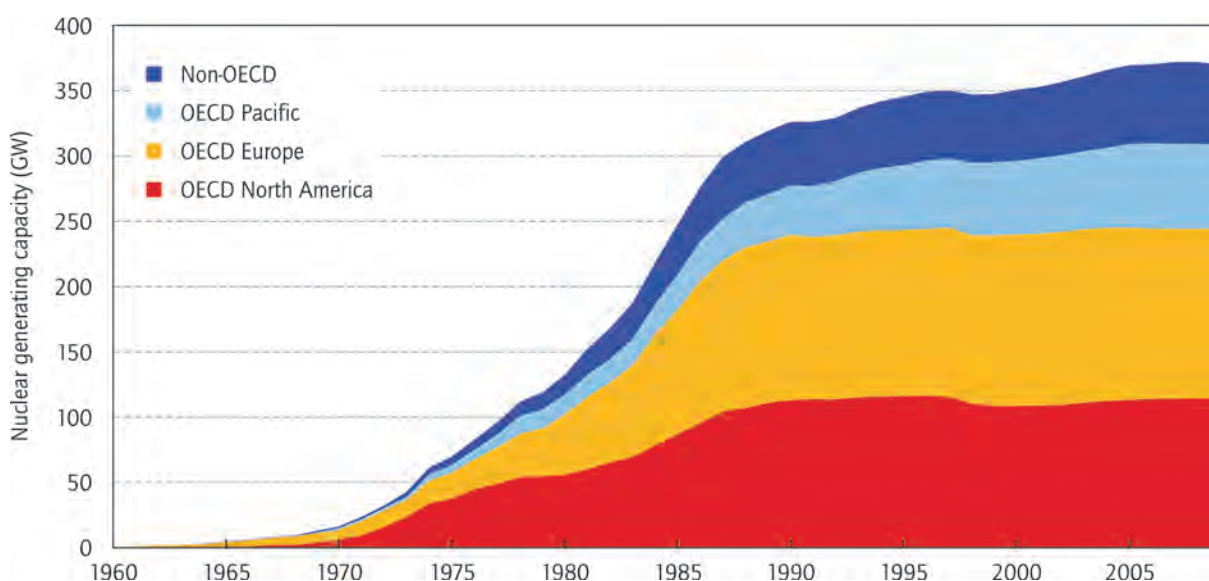
## La gestione delle risorse nucleari esistenti

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- Parallelamente alla continuata gestione secondo criteri di sicurezza ed efficienza economica delle centrali nucleari esistenti, le aziende di pubblica utilità dovrebbero investire, ove fattibile, sull'adeguamento e la preparazione a un prolungamento del ciclo di vita degli impianti esistenti.

La costruzione di una centrale nucleare richiede un notevole investimento di capitale, ma durante l'esercizio presenta costi operativi, di combustibile

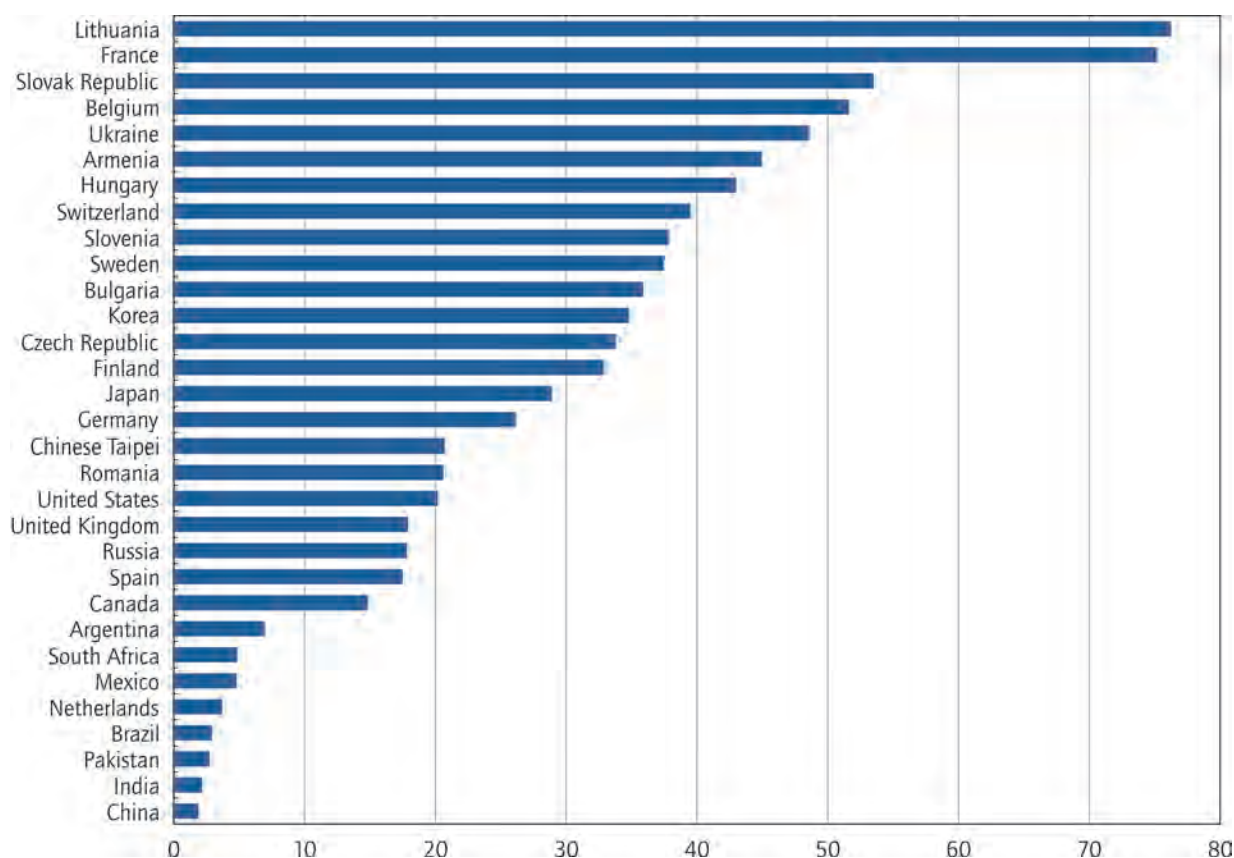
**Figura 2. Capacità di generazione nucleare mondiale, dal 1960 al 2009**



Fonte: IAEA PRIS.

**PUNTO SALIENTE:** *la capacità nucleare è cresciuta rapidamente negli anni Settanta e Ottanta, con un notevole rallentamento dagli anni Novanta in poi.*

**Figura 3. Quota di potenza nucleare sul totale dell'elettricità nel 2009 (%)**



Fonte: IAEA PRIS.

Nota: la Lituania ha chiuso la sua unica centrale nucleare alla fine del 2009 e attualmente non possiede potenza nucleare installata.

**PUNTO SALIENTE:** quindici Paesi ricavano più di un quarto della loro elettricità dall'energia nucleare.

e di manutenzione relativamente ridotti e prevedibili. Ciò significa che le centrali nucleari presentano bassi costi marginali di produzione, ma necessitano di molti anni perché i costi di capitale siano ammortizzati. Massimizzare il loro ciclo di vita è quindi un obiettivo economico sensato, anche se ciò comporta ulteriori investimenti per l'ammodernamento dei sistemi e dei componenti. Ciò contribuirà inoltre a ridurre le emissioni cumulative di CO<sub>2</sub> derivanti dal settore elettrico.

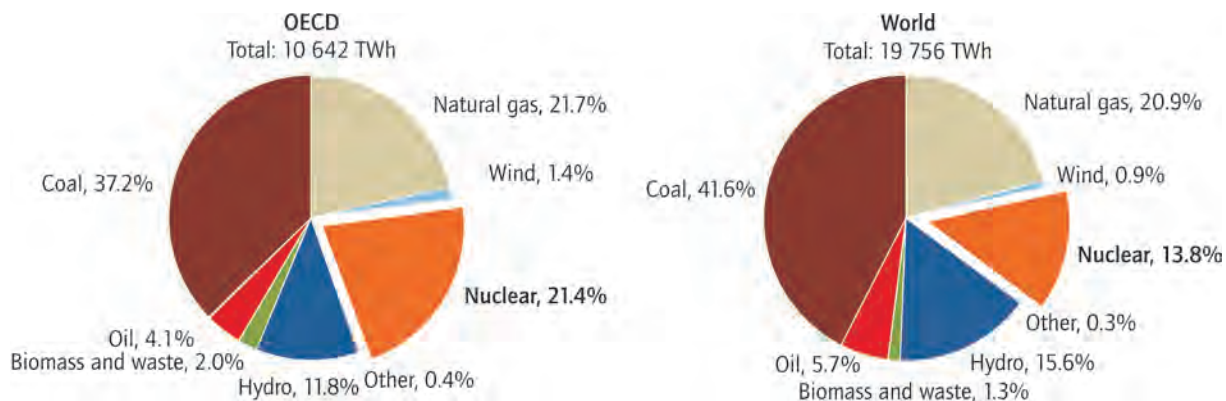
Un presupposto per massimizzare il potenziale dei reattori esistenti, oltre che per una futura espansione del nucleare, è il continuato funzionamento senza incidenti. Accanto a enti regolatori forti e indipendenti, è stato dimostrato che la sicurezza nel funzionamento (nonché una buona prestazione operativa) dipende dallo sviluppo e dalla costante presenza di una "cultura della sicurezza" tra tutte le persone coinvolte nella conduzione e nella manutenzione di una centrale

nucleare. Si tratta di una responsabilità gestionale importante per le aziende e per le organizzazioni coinvolte nelle attività del settore nucleare.

Si possono osservare tre tendenze principali, legate alla massimizzazione del rendimento cui mirano i proprietari delle centrali nucleari esistenti. In primo luogo, la prestazione operativa è generalmente migliorata dagli anni Novanta, gli spegnimenti non programmati sono diminuiti e la produzione annuale di elettricità è aumentata. In secondo luogo, la capacità di molte centrali nucleari è aumentata, spesso a seguito di investimenti in apparecchiature più avanzate. In terzo luogo, per molte centrali oggi si prevede un prolungamento dell'attività anche fino a 20 anni dopo il termine inizialmente programmato.

La prestazione media complessiva delle centrali nucleari in termini di fattore di disponibilità energetico (cioè la percentuale di tempo in cui l'impianto è stato disponibile a produrre alla

**Figura 4. Generazione di elettricità suddivisa tra le varie fonti, nel mondo e nei Paesi OCSE nel 2007**



Fonte: IEA, 2009.

Nota: "Other" comprende l'energia geotermica, solare, del moto ondoso e mareomotrice.

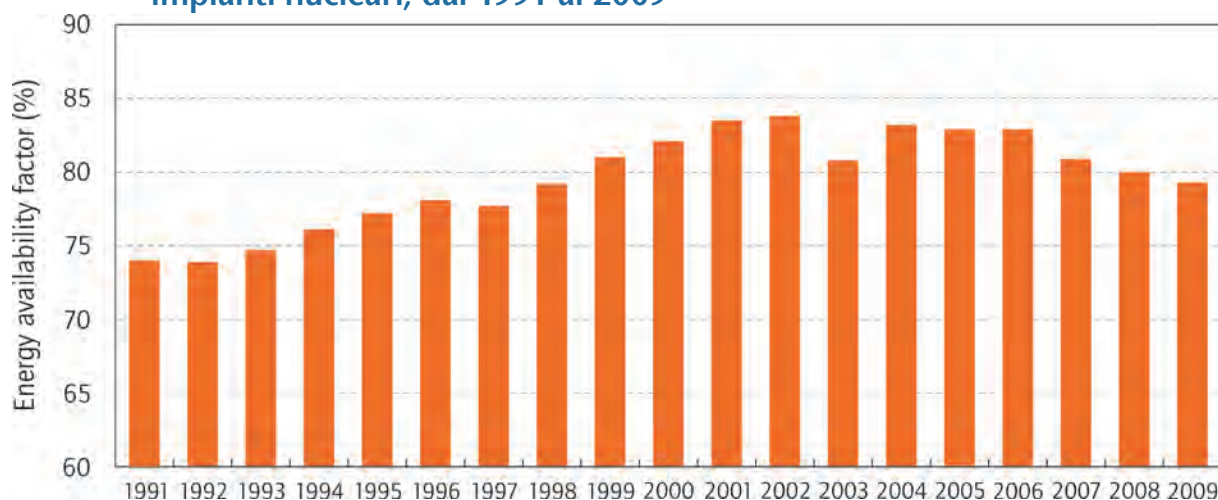
**PUNTO SALIENTE: l'energia nucleare e idroelettrica sono attualmente le principali fonti energetiche a basso contenuto di carbonio.**

massima potenza) è aumentata costantemente negli anni Novanta (Figura 5) e in vari Paesi sono raggiunti regolarmente fattori di disponibilità superiori al 90%. Negli ultimi anni la tendenza generalizzata all'aumento ha tuttavia subito un rallentamento, in parte dovuto allo spegnimento prolungato di vari reattori in alcuni Paesi.

Un altro modo per aumentare la produzione consiste nell'incrementare la potenza attraverso

modifiche all'impianto per poter produrre quantità maggiori di elettricità. In alcuni casi l'incremento si realizza unicamente mediante l'uso di strumentazione più moderna, in altri casi, invece, sono necessari notevoli investimenti per l'ammodernamento degli impianti, in particolare con turbine a più alta efficienza. Per molti reattori negli Stati Uniti e in Europa si è ottenuto o è previsto un incremento della produzione concessa su licenza, in alcuni casi perfino del 20%.

**Figura 5. Fattori di disponibilità energetica medi a livello mondiale per gli impianti nucleari, dal 1991 al 2009**



Fonte: IAEA PRIS.

**PUNTO SALIENTE: la prestazione operativa media delle centrali nucleari è migliorata sensibilmente negli anni Novanta e all'inizio del Duemila, ma è leggermente diminuita negli ultimi anni.**

La grande maggioranza delle centrali nucleari oggi in esercizio ha più di 20 anni e in molti casi più di 30. In prevalenza esse sono state progettate per un ciclo di vita operativo di 40 anni. Tuttavia la maggior parte dei componenti e dei sistemi può essere sostituita quando si deteriora o quando conviene installare apparecchiature più avanzate. Alcuni dei componenti principali, tra cui il nocciolo in pressione del reattore, non possono essere sostituiti, ma nella maggior parte dei casi sono idonei a un funzionamento prolungato. Per molti impianti si considera quindi realistico un ciclo di vita operativo compreso tra 50 e 60 anni. Si sta già valutando la possibilità di cicli di vita ancora più lunghi, fino a 80 anni, ma la fattibilità resta incerta.

In molti Paesi con centrali già in esercizio da tempo, gli enti regolatori dell'energia nucleare hanno definito requisiti tecnici per la concessione del prolungamento della licenza di funzionamento di taluni impianti. Ad esempio negli Stati Uniti, la Nuclear Regulatory Commission ha concesso licenze per 60 anni di funzionamento totale a oltre la metà degli impianti esistenti e altre sono in corso di valutazione. I proprietari di molti reattori hanno implementato programmi di adeguamento sia allo scopo di migliorare la prestazione operativa attuale e di incrementare la potenza in uscita, sia al fine di preparare l'impianto per un prolungamento della vita operativa.

## La tecnologia dell'energia nucleare per uno sfruttamento a breve termine

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- L'industria nucleare dovrebbe standardizzare i modelli più recenti di reattori nucleari costruendo impianti di riferimento in alcuni paesi del mondo, allo scopo di affinare il modello di base ed eventuali varianti regionali, nonché di stabilire catene di approvvigionamento e competenze a livello globale.
- L'industria nucleare dovrebbe procedere nel dimostrare che tali nuovi modelli possono essere costruiti nel rispetto dei tempi e dei costi previsti, tendendo costantemente alla riduzione dei tempi di costruzione e al controllo dei costi, adottando per quanto possibile modelli standardizzati, affinando il processo costruttivo e rafforzando ulteriormente le catene di approvvigionamento.

Il basso numero di ordini per centrali nucleari registrato dagli anni Ottanta in poi ha determinato negli ultimi quindici anni la contrazione dell'industria nucleare in Europa e nel Nord America, e una serie di fusioni. Di conseguenza, la capacità industriale complessiva e le risorse umane qualificate disponibili per la costruzione d'impianti nucleari si sono notevolmente ridotte, e ciò ha comportato l'affermarsi a livello mondiale di un piccolo gruppo di aziende in grado di progettare e costruire centrali nucleari, la maggior parte con interessi e risorse multinazionali.

Oltre a realizzare le poche centrali nucleari ordinate dopo il 1990, queste aziende dell'industria nucleare hanno proseguito l'attività di approvvigionamento di combustibile, manutenzione e adeguamento delle unità esistenti. Hanno anche proseguito lo sviluppo di progetti per nuove centrali nucleari, sulla base dell'esperienza acquisita nella costruzione e manutenzione dei reattori esistenti. La maggior parte di loro sembra attrezzata a ricevere ordini per nuove centrali.

Inoltre la Corea ha sviluppato una forte industria nucleare che sta ora compiendo i primi passi al di fuori del mercato nazionale. Anche Cina e India dispongono di una notevole industria nucleare che dovrebbe però rimanere concentrata sul mercato domestico, almeno a breve termine. Nonostante sia soggetta a significative distorsioni del mercato, l'offerta di centrali nucleari sta quindi diventando un'attività competitiva su scala mondiale.

Ciascuno dei progetti più recenti proposti dai principali fornitori offre un livello tecnologico analogo, a volte collettivamente indicato con il termine Generazione III o III+ (la maggior parte dei reattori esistenti sono considerati di Generazione II). L'obiettivo è stato di eliminare a livello progettuale molti degli inconvenienti incontrati nella realizzazione e nella conduzione di centrali esistenti. La semplificazione del progetto e l'uso di tecniche costruttive avanzate (ad esempio la costruzione modulare) sono aspetti importanti che hanno l'obiettivo di ridurre i tempi e i costi di costruzione. Questi modelli offrono miglioramento delle prestazioni e dell'affidabilità, maggiore efficienza nell'utilizzo del combustibile e sistemi di sicurezza più avanzati, oltre a produrre minori quantità di scorie radioattive. Le centrali sono progettate sin dall'inizio per restare in attività fino a 60 anni, con fattori di disponibilità superiori al 90%.

L'intenzione di ciascun fornitore è offrire, per quanto possibile, uno o più modelli standardizzati a livello mondiale, al fine di ridurre il rischio di ritardi nella realizzazione dovuti a modifiche progettuali. La standardizzazione potrà garantire vantaggi anche nella fase di esercizio, grazie allo scambio di informazioni ed esperienze tra gli operatori e alla maggiore mobilità di personale tra le imprese appaltatrici contrattisti di impianti simili.

I principali modelli oggi offerti a livello mondiale dalle maggiori aziende costruttrici di centrali nucleari, che si prevede assicureranno la gran parte della nuova capacità nucleare almeno fino al 2020, sono descritti nel Riquadro 1.

## Riquadro 1. Principali modelli per impianti nucleari disponibili per sfruttamento prima del 2020

L'**AP-1000** è il modello di punta di Westinghouse. Anche se detenuta a maggioranza dalla giapponese Toshiba, Westinghouse ha la sua sede centrale negli Stati Uniti. L'AP-1000 è un reattore ad acqua in pressione (PWR) avanzato con una potenza di circa 1 200 MW, di cui i primi tre esemplari sono in fase iniziale di costruzione in Cina. Questo modello è stato anche prescelto per la maggior parte dei nuovi impianti potenziali negli USA ed è offerto sia in GB sia in altri mercati.

L'**EPR** è il modello principale di AREVA, il più importante gruppo nucleare europeo, detenuto a maggioranza dallo stato francese. Si tratta anche in questo caso di un PWR avanzato che garantirà una potenza compresa tra 1 600 e 1 700 MW. Le prime unità sono attualmente in costruzione in Finlandia e in Francia. Due EPR sono in fase iniziale di costruzione in Cina e un ulteriore ordine è stato confermato in Francia. In GB si prevede l'ordine di un massimo di quattro esemplari, mentre una versione dell'EPR è stata scelta per alcuni potenziali nuovi impianti negli USA.

L'**ABWR** (Advanced Boiling Water Reactor) è l'unico tra i modelli recenti già in esercizio, con quattro unità presenti in Giappone. Altri due ABWR sono in fase di costruzione a Taiwan. La potenza di queste unità è di circa 1 300 MW, ma sono disponibili anche versioni da 1 600 MW. I modelli di base sono stati sviluppati in collaborazione dalla statunitense General Electric (GE) e dalle giapponesi Toshiba e Hitachi. GE e Hitachi hanno poi fuso i rispettivi rami di attività nel settore nucleare.

L'**ESBWR**, un'ulteriore elaborazione del modello ABWR, è il prodotto più recente offerto da GE-Hitachi. La sua potenza si situerà nel raggio dei 1 600 MW. Attualmente non sono ancora stati confermati ordini, ma il modello è stato selezionato per alcuni potenziali nuovi impianti negli USA.

L'**APWR** (Advanced PWR) è stato sviluppato per il mercato giapponese da Mitsubishi Heavy Industries (MHI) e si prevede l'avvio della costruzione di due unità nell'immediato futuro. La potenza sarà di circa 1 500 MW per unità. MHI offre una versione dell'APWR anche sul mercato USA ed è stata scelta per un potenziale progetto.

Il **VVER-1200** (conosciuto anche come AES-2006) è la versione più avanzata della serie VVER dei modelli PWR prodotti dall'industria nucleare russa, ora organizzata nel gruppo nucleare Rosatom di proprietà statale. Quattro unità VVER-1200 sono attualmente in costruzione in Russia, ciascuna con una potenza netta in uscita pari a 1 100 MW. Su altri mercati sono disponibili anche altri modelli, tra cui l'ultima versione del modello VVER-1000, che è stato esportato in vari Paesi tra cui Cina e India.

L'**ACR** (Advanced CANDU Reactor) è il modello più recente realizzato dall'Atomic Energy of Canada Ltd. (AECL), di proprietà del Governo canadese. La tecnologia CANDU differisce da quella di altri modelli per l'utilizzo di acqua pesante per la moderazione (o rallentamento) dei neutroni, ciò consente di utilizzare uranio naturale come combustibile. Tuttavia l'ACR da 1 200 MW sarà il primo modello CANDU a utilizzare combustibile arricchito. AECL offre anche il modello Enhanced CANDU 6, un'unità da 700 MW a uranio naturale. Nessun ordine è stato finora confermato per questi due modelli.

L'**APR-1400** è l'ultimo modello PWR coreano, con due unità da 1 340 MW in costruzione e varie altre programmate. Si basa su tecnologia originale ora di proprietà di Westinghouse, ulteriormente elaborata da aziende coreane in una serie di modelli più avanzati. L'accordo di licenza ne limita ancora la disponibilità sui mercati di esportazione, ma verso la fine del 2009 un consorzio a guida coreana (con la partecipazione di Westinghouse) si è aggiudicato un contratto per la costruzione di quattro APR-1400 negli Emirati Arabi Uniti.

Il **CPR-1000** è attualmente, con 16 unità in fase di realizzazione, il modello principale in costruzione in Cina. Questo modello da 1 000 MW è una versione aggiornata del modello di seconda generazione degli anni Ottanta prodotto da AREVA, la cui tecnologia è stata trasferita in Cina. Un accordo del 2007 con Westinghouse per la costruzione di quattro AP-1000 comprende il trasferimento di questa tecnologia alla Cina; le prime tre unità sono ora in fase di realizzazione e si prevede che questo modello costituirà la base per le centrali nucleari cinesi di prossima generazione.

I modelli indiani **PHWR** (Pressurised Heavy Water Reactor) si basano su precedenti modelli CANDU esportati dal Canada negli anni Sessanta. Per le unità più recenti la potenza installata è di 540 MW e sono in programma unità da 700 MW. Per quanto siano state ulteriormente sviluppate rispetto al modello originale, si tratta di modelli meno avanzati rispetto a quelli di terza generazione. L'India ha già importato due VVER dalla Russia e si prevede che i suoi ordini nel campo delle importazioni nucleari aumenteranno.

Esistono altri modelli che potrebbero essere disponibili nei prossimi anni. In particolare, versioni ridotte di alcuni modelli potrebbero essere offerte quando sono richiesti incrementi di potenza installata di piccola entità. Tuttavia non si prevede che questi contribuiranno in misura significativa all'espansione nucleare complessiva fino al 2020.

## La situazione del ciclo del combustibile nucleare

L'uranio, la materia prima per il combustibile nucleare, si estrae oggi in quantità significative in 14 Paesi (Tabella 1). Dall'inizio degli anni Novanta la quantità di uranio prodotto è stata pari a due terzi della quantità annuale richiesta per i reattori (attualmente circa 68.000 tonnellate). Il rimanente viene fornito principalmente da scorte di uranio costituite a partire dagli anni Cinquanta. Si tratta in parte di giacenze commerciali e in parte di riserve strategiche detenute dai Governi (tra cui materiale derivante da testate nucleari smantellate). Hanno contribuito, seppure in misura minore, il riciclo del combustibile nucleare e il recupero di uranio dai residui del processo di arricchimento (si veda in seguito).

Nonostante esistano ancora consistenti giacenze di uranio di vario tipo, si prevede che la produzione del minerale aumenterà nei prossimi anni fino a superare la domanda. I prezzi di mercato dell'uranio, depressi nel corso degli anni Novanta, sono aumentati negli ultimi anni. Ciò non ha determinato un rapido aumento della produzione, ma ha stimolato programmi per l'incremento della capacità estrattiva in miniere esistenti e nuove. Un'espansione significativa è programmata in Australia, Canada, Kazakistan, Namibia, Niger, Russia e Sud Africa. La capacità produttiva dell'uranio, attualmente pari a circa 55.000 tonnellate annue, potrebbe crescere fino a circa 100.000 tonnellate entro il 2015. Molti di questi investimenti tuttavia dipenderanno dalle condizioni del mercato nei prossimi anni.

Il combustibile nucleare vero e proprio è un prodotto manufatto (vedi riquadro 2 per maggiori informazioni). Ai prezzi attuali, l'uranio rappresenta solo il 50% circa del costo del combustibile nucleare, mentre l'arricchimento ne rappresenta il 40%. Seppure conversione di  $UF_6$  e arricchimento sono processi generici, ogni impianto nucleare o serie d'impianti analoghi presenta tipi di combustibile differente. Il progetto dettagliato, la composizione e la qualità dei componenti strutturali del combustibile possono influire in modo significativo sull'affidabilità complessiva e le prestazioni dell'impianto. I miglioramenti nella sicurezza e nelle prestazioni delle centrali registrati dagli anni Novanta si possono in parte attribuire alle innovazioni nella progettazione del combustibile, che hanno ridotto l'incidenza della fuoriuscita di materiale radioattivo

e aumentato l'energia estratta da ciascun elemento di combustibile.

La maggior parte delle strutture del ciclo del combustibile nucleare sono concentrate in un ristretto numero di Paesi dell'OCSE e in Russia, sebbene vari altri Paesi dispongano di capacità di entità minore (Tabella 2). Queste strutture dispongono di una capacità adatta a supportare la flotta esistente di reattori oltre a quelli che entreranno in funzione nei prossimi anni. Tuttavia, alcune strutture esistenti sono già in procinto di essere sostituite o ampliate, o lo saranno nei prossimi anni. In particolare, negli Stati Uniti e in Francia sono in costruzione nuove centrifughe per l'arricchimento più avanzate e più efficienti, allo scopo di sostituire gli impianti a diffusione esistenti (che verranno dismessi nei prossimi anni). Al contempo, altri fornitori d'arricchimento (che già operano negli impianti a centrifuga) stanno gradualmente ampliando la loro capacità in linea con la domanda. In Francia è anche in corso l'adeguamento della capacità di conversione di  $UF_6$ .

La gran parte di uranio naturale lavorato negli impianti di arricchimento (circa l'85% in peso) viene lasciato negli scarti di arricchimento (il flusso di scorie).

**Tabella 1. Produzione di uranio per Paese, 2008**

Paese	Produzione di uranio (tonnellate)
Australia	8 430
Brasile	330
Canada	9 000
Cina	769
Repubblica Ceca	263
India	271
Kazakistan	8 521
Namibia	4 366
Niger	3 032
Russia	3 521
Sud Africa	655
Ucraina	800
Stati Uniti	1 430
Uzbekistan	2 338
Altri	127
<b>Totale</b>	<b>43 853</b>

Fonte: WNA, 2009.

Negli ultimi anni, significative quantità di questo uranio impoverito sono state ulteriormente processate per creare altro uranio arricchito, estraendo parte dell' U-235 residuo (tipicamente lo 0,3% circa) dopo l'arricchimento iniziale. Tuttavia, man mano che l'offerta e la domanda di arricchimento si bilanceranno, si prevede che l'offerta di uranio da questa fonte andrà a diminuire.

È possibile riciclare il combustibile nucleare esaurito e usare l'uranio e il plutonio in esso contenuti per preparare altro combustibile nucleare (come descritto nel Riquadro 2). Sebbene per trarre il massimo vantaggio dal riciclo sarà necessario l'uso dei reattori veloci (come descritto più avanti in questo programma di sviluppo), un riciclo parziale del combustibile esaurito viene già effettuato con i reattori esistenti. Gli impianti di riprocessamento su ampia scala per l'estrazione di uranio e plutonio dal combustibile esaurito sono in funzione in Francia, Russia e nel Regno Unito, con un altro impianto di grandi dimensioni in costruzione in Giappone.

Il combustibile prodotto usando materiali riciclati è tecnicamente adatto per l'uso in molti reattori esistenti, dove sono presenti adeguate strutture di manipolazione del combustibile. Nella pratica, l'uso di combustibile riciclato è limitato dai requisiti delle licenze, come anche da fattori economici relativi al ciclo del combustibile e dalla capacità delle necessarie strutture ad esso dedicate. Di conseguenza, sono state accumulate riserve di uranio e plutonio. Attualmente, dal riciclaggio proviene tra il 4 e il 5% dell'approvvigionamento di combustibile nucleare, principalmente in Europa occidentale, Giappone e Russia. Si prevede un aumento graduale del riciclaggio nei prossimi anni, in parte dovuto al fatto che i prezzi più elevati dell'uranio renderanno tale processo economicamente più interessante. In teoria, il riciclaggio di tutto il combustibile esaurito in questo modo consentirebbe di ridurre il consumo di uranio di circa il 30%, sebbene ciò richiederebbe un aumento elevato nel riprocessamento e nella capacità di altre strutture dedicate al ciclo del combustibile.

**Tabella 2. Capacità annuale delle principali strutture commerciali per il ciclo del combustibile nucleare per reattori ad acqua leggeri (LWR), per Paese**

<b>Paese</b>	<b>Conversione UF<sub>6</sub> (tonnellate U)</b>	<b>Arricchimento di uranio (tSWU)</b>	<b>Produzione combustibile LWR (tonnellate HM)</b>
Belgio	–	–	700
Brasile	–	–	280
Canada	12 500	–	–
Cina	3 000	1 300	450
Francia	14 500	10 800	1 400
Germania	–	4 000	650
India	–	–	48
Giappone	–	150	1 724
Corea	–	–	600
Paesi Bassi	–	4 000	–
Russia	25 000	20 250	1 600
Spagna	–	–	300
Svezia	–	–	600
Regno Unito	6 000	3 000	860
Stati Uniti	15 000	11 300	3 650

Fonte: WNA, 2009.

Nota: alcune capacità sono approssimative, quelle effettive potrebbero essere inferiori. In vari Paesi sono in funzione strutture pilota o di piccola capacità qui non riportate. Inoltre non sono inclusi gli impianti di ciclo del combustibile per i reattori ad acqua pesante (conversione di UO<sub>2</sub> e produzione del combustibile). La capacità di arricchimento è indicata in migliaia di unità di lavoro di separazione (tSWU), combustibile fabbricato in tonnellate di metallo pesante (tHM).

## La gestione delle scorie radioattive

Vari tipi di scorie radioattive sono prodotte nel ciclo del combustibile nucleare; si va da oggetti leggermente contaminati dal contatto con materiali nucleari al combustibile nucleare esaurito e alle scorie ad alta attività provenienti dal ritrattamento. Questi possono essere classificati come scorie di livello basso, intermedio e alto; il livello intermedio è a sua volta suddiviso in scorie a vita breve e lunga.

La tecnologia per il trattamento, lo stoccaggio e lo smaltimento delle scorie di livello intermedio a breve durata e di livello basso è ben sviluppata e quasi tutti i Paesi con un programma nucleare di rilievo sono dotati di strutture di smaltimento per questo tipo di scorie. Mentre questi rappresentano i volumi maggiori di scorie radioattive, la grande maggioranza della radioattività è contenuta in volumi relativamente limitati di combustibile esaurito e, per i Paesi con combustibile nucleare riciclato, nelle scorie ad alta attività provenienti dal ritrattamento.

Inizialmente, il combustibile esaurito e le scorie ad alta attività contengono prodotti di fissione ad

alta radioattività ma dal ciclo di vita breve, che generano calore. Essi devono essere mantenuti in condizioni controllate per vari decenni prima dello smaltimento, al fine di far decadere questi prodotti di fissione. Lo stoccaggio iniziale del combustibile esaurito si effettua in una piscina ubicata nel sito del reattore. In alcuni Paesi il combustibile esaurito viene trasferito in una struttura di stoccaggio centralizzata dopo diversi anni. Una volta raffreddato, il combustibile può anche essere trasferito in fusti di metallo schermati per lo stoccaggio a secco. I rifiuti liquidi di alto livello del ritrattamento vengono vetrificati in contenitori di metallo per il deposito provvisorio.

In vari Paesi è stato dimostrato che questo tipo di stoccaggio può continuare in modo sicuro e a basso costo per lunghi periodi di tempo. Tuttavia, la dimostrazione della fattibilità dello smaltimento permanente di questo tipo di rifiuti, almeno in alcuni Paesi, sarà importante per instaurare fiducia nell'energia nucleare a livello sociale. La principale sfida da affrontare in futuro è pertanto sviluppare e implementare piani per lo smaltimento di combustibile esaurito, scorie ad alta attività e scorie di livello intermedio a lunga durata in depositi geologici profondi. Tale questione sarà ulteriormente discussa in seguito in questo programma di sviluppo.

# Sfruttamento dell'energia nucleare fino al 2050: azioni e obiettivi intermedi

## La crescita della potenza nucleare nello scenario BLUE Map

Lo scenario BLUE Map (IEA, 2010), *Energy Technology Perspectives 2010 (ETP)* di AIE prevede una capacità nucleare di quasi 1 200 GW nel 2050, rispetto ai 370 GW alla fine del 2009, facendo sì che il nucleare dia un contributo fondamentale al taglio del 50% delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dal settore energetico. Tale potenza nucleare installata dovrebbe fornire entro tale data quasi 9 600 TWh di elettricità annuali, o circa il 24% dell'elettricità prodotta in tutto il mondo. La BLUE Map mostra come, entro il 2050, l'energia nucleare diverrà la più grande fonte di elettricità, sorpassando il carbone, il gas naturale, l'energia idrica, eolica e solare (Figura 6).

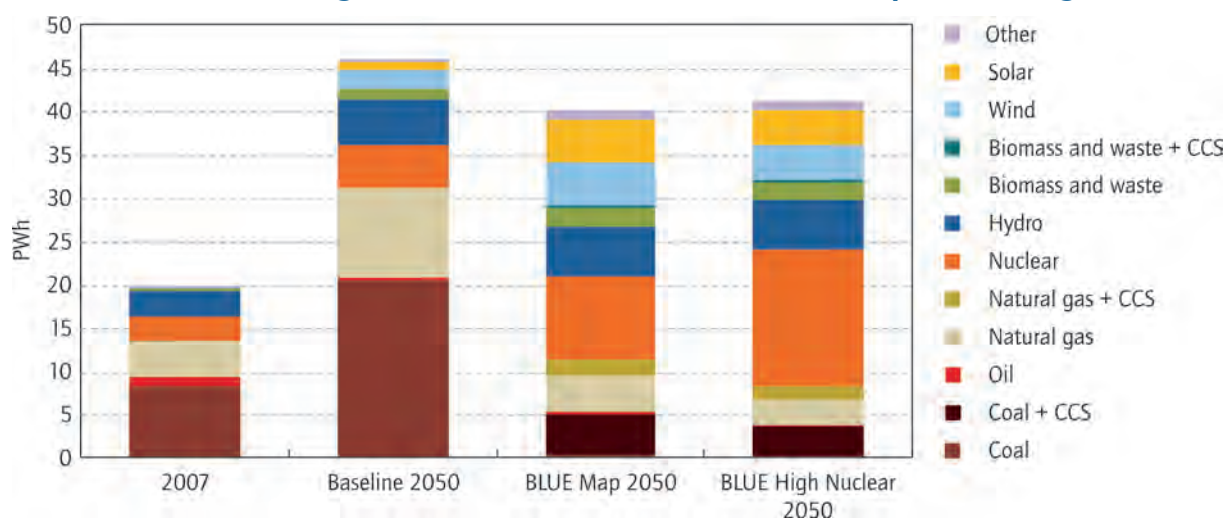
Sebbene 1 200 GW di capacità nucleare per il 2050 costituiscano un obiettivo ambizioso, l'obiettivo di triplicare la capacità nucleare in un periodo di 40 anni è certamente raggiungibile in base alle prospettive tecniche e industriali. Assumendo che per il 2050 tutti i reattori in funzione oggi saranno stati dismessi, sarebbe necessario mettere in funzione circa 30 unità da 1 GW ogni anno tra il 2010 e il 2050. Simili tassi di costruzione sono stati raggiunti negli anni Settanta e Ottanta (sebbene

per brevi periodi), anche se i Paesi in cui si stavano implementando programmi nucleari erano meno numerosi e le capacità industriali dell'epoca meno sviluppate.

In realtà, la percentuale di costruzione necessaria per raggiungere lo scenario BLUE Map sarà probabilmente inferiore. Come notato in precedenza, molte unità esistenti possiedono la licenza per un funzionamento di 60 anni e in tutto il mondo è possibile notare una tendenza verso cicli di vita più estesi. Pertanto, 60 GW di capacità esistente potrebbero restare in funzione fino al 2050. Inoltre, molti modelli attuali di reattori hanno una capacità superiore a 1 GW, tipicamente compresa tra 1,2 e 1,7 GW, ed è probabile che questi siano selezionati nei Paesi con alta domanda di elettricità e reti elettriche adeguate a grandi unità. Prendere in considerazione questi fattori implica che, nel corso di un periodo di 40 anni, potrebbe essere necessario costruire in media circa 20 grandi unità nucleari ogni anno. Ciò significa che il tasso di costruzioni di nuovi impianti nucleari avviate dovrà approssimativamente raddoppiare rispetto ai livelli attuali entro il 2020, per continuare a crescere più lentamente dopo tale data.

La crescita globale della capacità nucleare nello scenario BLUE Map presenta ampie variazioni regionali. Di gran lunga la più ampia espansione è prevista in Cina, da meno del 3% del totale della produzione cinese attuale a circa il 27% nel 2050.

**Figura 6. Produzione di elettricità a livello mondiale suddivisa per fonte nel 2007 e nel 2050, negli scenari ETP 2010 Baseline, BLUE Map e BLUE High Nuclear**



Fonte: IEA, 2010.

Nota: CCS sta per "cattura e sequestro geologico del carbonio". "Other" comprende l'energia geotermica, del moto ondoso e mareomotrice.

**PUNTO SALIENTE: nello scenario BLUE Map, l'energia nucleare sarà la maggiore fonte singola di elettricità nel 2050.**

Si prevede che anche l'India aumenti in maniera significativa la propria capacità, da meno del 2% a circa l'11% nel 2050. Sebbene si preveda che la capacità nucleare crescerà nei Paesi dell'OCSE, in particolare nel Nord America e nelle regioni del Pacifico, nella BLUE Map la loro quota di capacità globale nucleare cadrà da oltre l'80% attuale a meno del 50% nel 2050.

Lo scenario BLUE High Nuclear prevede una capacità nucleare pari a 2 000 GW nel 2050 che fornirà quasi 16 000 TWh di elettricità, ovvero il 39% della produzione mondiale totale (Figura 6). Lo scenario AEN High (AEN, 2008) stima una capacità nucleare di 1 400 GW per quella data. Questi ultimi due scenari richiedono chiaramente una forte accelerazione elevati del ritmo di costruzione di impianti nucleari, specialmente dopo il 2020 e incrementi significativi nell'approvvigionamento di combustibile. Tali scenari non sono descritti in dettaglio in questo programma di sviluppo. Tuttavia, qualsiasi espansione su larga scala dell'energia nucleare richiederà le stesse fasi iniziali entro il 2020 per stabilire una piattaforma che consenta un'espansione più rapida nei decenni successivi. La misura in cui la capacità nucleare si estenderà a lungo termine dipenderà ampiamente dalla competitività rispetto ad altre fonti energetiche a basso contenuto di carbonio.

## La prospettiva di espansione nucleare verso il 2020

Alla fine del 2009, 55 nuovi reattori di potenza erano ufficialmente in costruzione in 14 Paesi (Tabella 3). Di questi, la Cina presentava il programma più vasto, con 20 unità in costruzione. Svariate unità erano in costruzione anche in Russia. Tra i Paesi dell'OCSE, la Corea presentava il maggiore programma di espansione con 6 unità, mentre Finlandia, Francia, Giappone e Repubblica Slovacca costruivano ciascuna una o due nuove unità. Negli Stati Uniti, è stato riattivato un progetto nucleare di vecchia data. In totale, si prevede che queste nuove unità aggiungano circa 50 GW di nuova potenza alla potenza esistente di 370 GW (sebbene nei prossimi anni la chiusura di alcuni reattori più vecchi ridurrà di qualche gigawatt la capacità di produzione nucleare).

In prospettiva nel 2020, considerato che l'intero processo di pianificazione, licenza e costruzione di nuovi impianti nucleari richiede in genere dai 7 ai 10 anni, per la maggior parte della capacità nucleare che entrerà in funzione entro quella data i processi di pianificazione e brevettazione saranno già stati avviati. Le previsioni per questo periodo possono quindi essere basate sull'esame dei piani esistenti per le nuove costruzioni nucleari in tutto il mondo.

**Tabella 3. Impianti nucleari in costruzione alla fine del 2009**

Località	Numero di unità	Capacità netta (MW)
Argentina	1	692
Bulgaria	2	1 906
Cina	20	19 920
Finlandia	1	1 600
Francia	1	1 600
India	5	2 708
Iran	1	915
Giappone	1	1 325
Corea	6	6 520
Pakistan	1	300
Russia	9	6 996
Repubblica Slovacca	2	782
Taiwan	2	2 600
Ucraina	2	1 900
Stati Uniti	1	1 165
<b>Totale</b>	<b>55</b>	<b>50 929</b>

Fonte: IAEA PRIS.

Si prevede che alcuni Paesi con costruzioni nucleari in atto continueranno la propria espansione nucleare con ulteriori costruzioni, il cui inizio avverrà nei prossimi anni. In particolare, un'espansione significativa della capacità nucleare è prevista in Cina, India e Russia. Vari altri Paesi con impianti nucleari esistenti stanno adesso considerando attivamente l'installazione di nuova capacità nucleare, con decisioni definitive previste nei prossimi anni. Fra questi si annoverano Canada, Repubblica Ceca, Lituania, Romania, Regno Unito e Stati Uniti. Fra questi, gli Stati Uniti potrebbero essere in prima linea; si considera infatti la costruzione di oltre 30 nuove unità nucleari, con richieste di licenza presentate per 22 di queste prima della fine del 2009. I Paesi che non dispongono attualmente di impianti nucleari ma che stanno considerando l'installazione di capacità nucleare prima del 2020 comprendono: Italia, Polonia, Turchia ed Emirati Arabi Uniti. Questi ultimi hanno annunciato un ordine di quattro grandi unità alla fine del 2009.

Prendendo in considerazione i programmi attuali e le capacità dei Paesi che costruiscono e prevedono di costruire nuova capacità nucleare nei prossimi anni, accanto alle probabili chiusure di vecchi impianti, gli scenari elaborati da varie organizzazioni, incluse l'AIE e l'AEN, mostrano che la capacità nucleare raggiungerà tra i 475 e i 500 GW entro il 2020. Il valore più elevato fra quelli indicati tiene in considerazione la recente accelerazione della Cina nella realizzazione del proprio programma nucleare.

Per raggiungere un'espansione di 500 GW sarà necessaria, oltre agli impianti già in fase di costruzione, la realizzazione di circa altri 90 GW (prendendo in considerazione la chiusura di alcuni impianti obsoleti) a partire approssimativamente dal 2016, ovvero la realizzazione di 12 - 13 GW annui. Nel 2009 è iniziata la costruzione di undici grandi progetti nucleari per una capacità complessiva di poco superiore a 12 GW. Di questi, nove si trovano in Cina, uno in Corea e uno in Russia. Il 2008 ha visto l'inizio dei lavori di costruzione di altri dieci impianti (10,5 GW), sei dei quali in Cina e due in Corea e Russia rispettivamente. Nei due anni summenzionati si è registrata l'apertura del maggior numero di cantieri dal 1985, anche se l'espansione ha riguardato solo questi tre Paesi. Sebbene spetti soprattutto alla Cina il ruolo di protagonista nell'espansione nucleare, per mantenere tale ritmo dell'espansione altri Paesi dovranno avviare la realizzazione di nuove centrali nucleari nei prossimi anni.

Poiché negli ultimi decenni è stato costruito un numero relativamente esiguo di centrali nucleari, la capacità industriale disponibile per la costruzione

di impianti nucleari è attualmente limitata in molti Paesi. Come precedentemente rilevato, il consolidamento industriale ha condotto alla nascita di un numero ristretto di fornitori multinazionali che dispongono di catene produttive globali. Sebbene molti fornitori abbiano già iniziato a espandere le proprie capacità per far fronte alla domanda attuale e anticipata, occorreranno ancora risorse considerevoli. Ovviamente i fornitori di energia nucleare dispongono già delle risorse industriali e umane per la costruzione di un esiguo numero di centrali nucleari; la sfida sarà quella di aumentare tali capacità e la catena produttiva nell'arco dei prossimi anni per fronteggiare una domanda notevolmente maggiore.

## La preparazione a uno sfruttamento più rapido dopo il 2020

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- L'industria nucleare dovrebbe investire nello sviluppo delle competenze industriali e di risorse umane qualificate in tutto il mondo per incrementare la capacità globale di costruire centrali nucleari, ampliando le catene di fornitura ma rispettando al contempo gli elevati standard richiesti di qualità e sicurezza.
- Per i Paesi con programmi nucleari in fase di avviamento o riattivazione, i Governi dovrebbero assicurare che risorse umane adeguatamente qualificate e specializzate siano disponibili per soddisfare le esigenze poste dal programma nucleare, a livello di governo, di aziende di pubblica utilità del settore elettrico, dell'industria e degli enti di regolamentazione.

Raddoppiare la velocità di costruzione di impianti nucleari entro il 2020 per raggiungere i livelli di sfruttamento previsti dallo scenario BLUE Map richiederà, nei prossimi anni, grandi investimenti in capacità industriali ulteriori e nella qualifica e formazione del personale specializzato.

Storicamente, la costruzione di centrali nucleari ha raggiunto livelli sensibilmente superiori a quello attuale. Negli anni Settanta l'avvio di costruzioni di

centrali ha registrato un'impennata arrivando fino a circa 30 unità l'anno, con una media di oltre 25 l'anno in quel decennio (Figura 7). Si trattò di un aumento notevole rispetto al decennio precedente. Sebbene tali unità fossero di dimensioni minori rispetto ai modelli attuali, la tecnologia del tempo era a sua volta meno sviluppata. Inoltre, relativamente pochi Paesi parteciparono a questa prima rapida espansione nucleare e la capacità industriale complessiva è cresciuta fortemente a partire dagli anni Settanta. Una notevole espansione futura della produzione elettrica, e quindi della capacità nucleare, avrà luogo nei grandi Paesi non membri dell'OCSE a rapida industrializzazione (in particolare Cina e India).

Tuttavia, gli investimenti mirati all'aumento di capacità, se dovranno essere effettuati in un'ottica commerciale, avranno luogo solo dopo aver rilevato una sufficiente domanda a lungo termine. In questo modo le capacità potranno crescere gradualmente nel giro di alcuni anni, di pari passo con l'aumento della domanda. Nei prossimi anni sarà quindi necessario un livello crescente di commesse per la costruzione di nuove centrali nucleari, non solo per raggiungere una potenza nucleare di circa 500 GW entro il 2020, ma anche per permettere l'incremento delle capacità industriali e umane necessarie a un'espansione più rapida dopo il 2020.

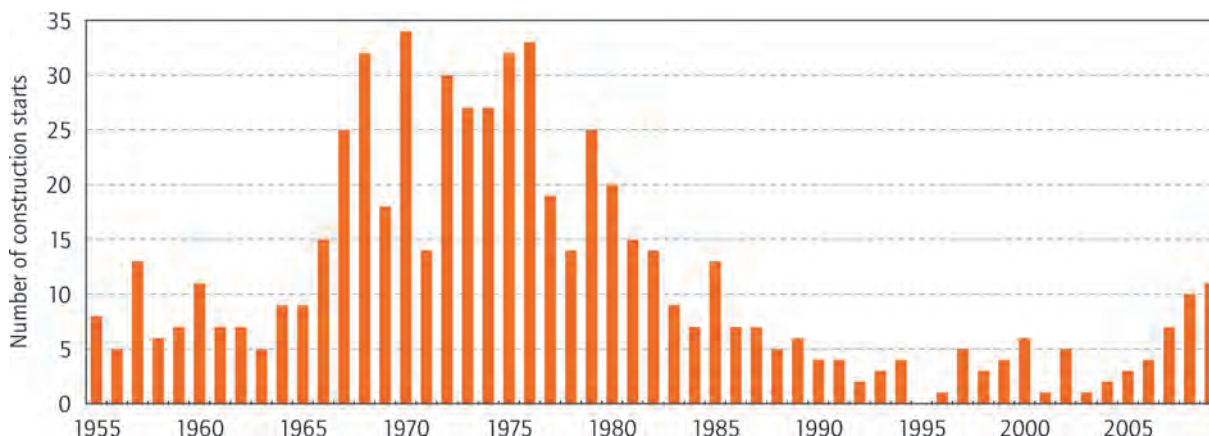
I progetti per la realizzazione di impianti per la produzione di energia nucleare sono altamente complessi. Il fornitore nucleare, così come l'azienda di progettazione e l'azienda che detiene la competenza tecnologica, forniranno direttamente solo i sistemi nucleari dell'impianto.

La fornitura e l'installazione di tutti gli altri sistemi e componenti spetterà a numerosi subappaltatori specializzati. Gran parte delle strutture di una centrale, comprese le strutture in cemento e i turbogeneratori, è analoga alle strutture impiegate per le centrali non nucleari ed è generalmente fornita da aziende specializzate nelle grandi opere di ingegneria edile. Nell'esecuzione di un progetto di costruzione di una centrale nucleare è anche fondamentale la funzione dell' "ingegnere progettista", inteso come colui che si occupa della progettazione generale, della programmazione e gestione dei costi e del coordinamento tra appaltatori e fornitori.

Perciò, la realizzazione di progetti nucleari richiede lo sviluppo e la gestione di complesse catene produttive. Man mano che cresceranno gli ordini per nuovi impianti nucleari, le catene produttive diverranno più ampie mentre i fornitori nucleari mireranno ad espandere la propria capacità di servire i mercati di tutto il mondo. Spesso, ciò implicherà il coinvolgimento di aziende locali e regionali operanti nel settore dell'edilizia e dell'ingegneria, man mano che l'industria dell'energia nucleare si estende a nuovi mercati.

La produzione della maggior parte dei componenti dei reattori potrà crescere in risposta alla domanda del mercato nel giro di alcuni anni al massimo, e si prevede che il tempo di approvvigionamento maggiore necessario per l'aumento della capacità sarà quello relativo alla forgiatura dei grossi componenti in acciaio, ampiamente utilizzati nella progettazione di impianti nucleari di ultima generazione. Sebbene la capacità di produzione di tali parti sia adeguata, la forgiatura di componenti

**Figura 7. Numero di costruzioni di centrali nucleari avviate ogni anno, dal 1955 al 2009**



Fonte: IAEA PRIS.

**PUNTO SALIENTE:** l'avvio della costruzione di centrali nucleari ha registrato un picco negli anni Settanta, dopo una rapida crescita negli ultimi anni Sessanta.

molto grandi per alcuni modelli può essere realizzata attualmente in un solo impianto al mondo (in Giappone) per tutti i mercati. Per aumentare tale capacità di forgiatura possono essere necessari cinque o più anni, visto che è necessario un investimento molto ingente e sono poche le aziende dotate della competenza necessaria. Alcuni grandi fornitori in Corea e Regno Unito stanno pianificando di espandere fortemente la propria capacità di forgiatura, sebbene la realizzazione di tali progetti dipenderà probabilmente dalle commesse ricevute dai clienti.

Il settore nucleare nel suo insieme, tra cui l'industria nucleare, le aziende di pubblica utilità e gli enti regolamentari, richiede risorse umane altamente qualificate e competenti. L'espansione dell'energia nucleare richiederà un maggiore numero di scienziati e ingegneri altamente qualificati e tecnici specializzati competenti, figure professionali che al momento scarseggiano. Molte aziende attive nel settore nucleare negli ultimi anni hanno ampliato i programmi di assunzione e formazione; anche i Governi e le università hanno un ruolo nel garantire la disponibilità dei corsi e della formazione adeguati.

Il lungo ciclo di vita delle centrali nucleari, che si estende per diverse generazioni umane, rende di cruciale importanza la gestione delle competenze. Il mantenimento delle competenze è importante per realizzare un'estensione del ciclo di vita degli impianti esistenti sicuro ed efficace, nonché per la progettazione e la realizzazione di nuovi impianti, affinché sia possibile trarre vantaggio dall'esperienza maturata. C'è il rischio di perdere un know-how importante quando gli scienziati e gli ingegneri che hanno realizzato gli ambiziosi programmi nucleari degli anni Settanta e Ottanta andranno in pensione. Pertanto, la gestione delle competenze e la trasmissione del know-how ai giovani specialisti dovranno essere prioritari per il settore nucleare.

## I requisiti del ciclo del combustibile nucleare

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- L'industria nucleare dovrebbe espandere la produzione di uranio e la capacità degli impianti per il ciclo del combustibile in linea con l'aumento della potenza di generazione nucleare, inclusa l'implementazione di tecnologie avanzate più efficienti, ove disponibili.

Quando si considera una maggiore dipendenza dall'energia nucleare, è importante valutare la disponibilità di uranio e la capacità del ciclo del combustibile, al fine di garantire la sicurezza a lungo termine dell'approvvigionamento di combustibile. Nonostante l'esplorazione dell'uranio sia stata limitata negli ultimi vent'anni, il rapporto tra risorse di uranio note e consumo attuale è paragonabile a quello delle altre risorse energetiche minerali e rappresenta un fabbisogno pari a circa 100 anni. Si prevede (sulla base delle informazioni geologiche disponibili) che altre risorse di uranio ancora da scoprire potrebbero accrescere tale fabbisogno di approvvigionamento fino a circa 300 anni. Se si considerano le risorse "non convenzionali" stimate, in particolare l'uranio contenuto nelle rocce fosfatiche, le risorse potrebbero ampliarsi a circa 700 anni (Tabella 4). I 4 miliardi stimati di tonnellate di uranio contenuti nelle acque marine potrebbero costituire una riserva virtualmente inesauribile, se fosse messo a punto un metodo di estrazione vantaggioso sotto il profilo economico.

**Tabella 4. Rapporti approssimativi tra risorse di uranio e attuale consumo annuo, per diverse categorie di risorse, che indicano anche l'impatto potenziale del riciclo in reattori veloci**

	<i>Risorse convenzionali note</i>	<i>Totale delle risorse convenzionali</i>	<i>Con risorse non convenzionali</i>
Con i reattori e cicli del combustibile attuali	100	300	700
Con reattori veloci e cicli del combustibile avanzati	> 3 000	> 9 000	> 21 000

Fonte: NEA, 2008.

Il livello di produzione di energia nucleare previsto dallo scenario BLUE Map potrebbe, sulla base della tecnologia e delle pratiche attuali nel ciclo del combustibile, determinare un consumo di uranio di circa 5,6 miliardi di tonnellate tra il 2010 e il 2050. Tuttavia, diversi sviluppi tecnologici potrebbero aumentare la quantità di energia prodotta da ciascuna tonnellata di uranio nel corso dei prossimi decenni, riducendone pertanto il consumo totale. Tali sviluppi comprendono il miglioramento delle pratiche operative e di gestione del combustibile, avanzamenti nella progettazione del combustibile e dei materiali e efficienze termiche più elevate nelle centrali di nuova generazione e in quelle ammodernate.

Inoltre, ulteriori benefici deriveranno anche dallo sfruttamento di nuove tecnologie di arricchimento. Dato che esiste una compensazione tra quantità di uranio naturale e lavoro di arricchimento necessario per produrre una data quantità di uranio arricchito, la proporzione di U-235 estratto dall'uranio naturale dipende in larga misura dai costi relativi dell'arricchimento e dell'uranio naturale. Il maggior utilizzo della tecnologia di arricchimento tramite centrifuga, che comporta costi operativi minori rispetto alla più vecchia tecnologia a diffusione, dovrebbe condurre a una maggiore efficienza dell'utilizzo dell'uranio.

Allo stesso modo, i nuovi impianti a centrifuga, più avanzati ed efficienti, sostituiranno gradualmente i modelli obsoleti negli attuali impianti a centrifuga. Inoltre, è attualmente in fase di sperimentazione una nuova tecnologia di arricchimento a laser e si stanno prendendo in considerazione piani per la messa in funzione della prima centrale commerciale di arricchimento al laser entro il 2015. Tali sviluppi potrebbero non solo consentire l'estrazione di più U-235 dalle riserve esistenti di uranio impoverito, ma anche un utilizzo più efficiente dell'uranio appena estratto dalle miniere in futuro.

Ciononostante, la domanda di uranio in BLUE Map costituisce ancora una percentuale importante delle risorse di uranio convenzionale noto, pari a circa 6,3 milioni di tonnellate (NEA, 2010). Tuttavia, come sottolineato in precedenza, le risorse aggiuntive e non convenzionali potrebbero accrescere notevolmente la quantità di uranio disponibile. In risposta all'aumento delle quotazioni dell'uranio, le spese annue per l'esplorazione di uranio si sono triplicate dal 2002, partendo da una base contenuta. Con il crescere dell'espansione dell'energia nucleare, è prevedibile

un ulteriore aumento sostenuto dell'attività di esplorazione di uranio; molte sono le zone potenzialmente interessanti per ulteriori grandi scoperte in grado di sostituire le risorse sfruttate.

Benché sia poco probabile che le risorse di uranio siano di per sé un fattore limitante all'espansione dei programmi nucleari, la questione di assicurare la tempestiva disponibilità sul mercato di un adeguato approvvigionamento di uranio potrebbe destare preoccupazione. Lo sviluppo di nuove miniere, sia per sostituire esistenti miniere esaurite, sia per espandere la capacità produttiva globale, richiederà ingenti investimenti nei prossimi decenni. L'ottenimento di licenze e l'apertura di nuove miniere, spesso in aree remote, possono richiedere parecchi anni. Il passato recente ci ha insegnato che nonostante l'incentivo di quotazioni dell'uranio particolarmente elevate, la produzione può richiedere alcuni anni per allinearsi.

Le società minerarie esistenti nel settore dell'estrazione dell'uranio e le società appena entrate in questo settore saranno pronte a investire in nuove capacità se riceveranno i giusti segnali sui prezzi e se avranno sufficienti garanzie nell'ambito dell'azione governativa e regolamentare. Gli imprenditori coinvolti nello sviluppo di centrali nucleari potrebbero cercare di assicurarsi almeno una parte dell'approvvigionamento di uranio prima della costruzione, mediante contratti a lungo termine o anche investimenti diretti in nuove capacità produttive. I poteri pubblici dei Paesi dotati di risorse di uranio commercialmente utilizzabili devono intervenire per garantire un ambiente di sostegno politico favorevole e procedure regolamentari efficaci.

Esistono molteplici tecnologie per l'estrazione dell'uranio e i progressi della tecnologia estrattiva potrebbero migliorare la capacità di utilizzo di alcune risorse di uranio. L'estrazione tradizionale sottoterra e a cielo aperto costituisce attualmente circa il 60% della produzione. Le tecniche di "in-situ leach" (ISL), ovvero il lavaggio del minerale, sono state più ampiamente implementate durante quest'ultimo decennio e attualmente forniscono quasi il 30% della produzione. I vantaggi delle tecniche ISL comprendono minori costi di capitale iniziale, la capacità di sfruttare depositi di dimensioni minori e un minor impatto ambientale. Anche la produzione di uranio come sottoprodotto (normalmente dell'oro o del rame) è significativa e potrebbe essere aumentata in futuro.

A più lungo termine, lo sfruttamento commerciale di reattori avanzati e di cicli del combustibile che riciclano il combustibile nucleare potrebbe consentire di ottenere maggiori quantità di energia da ciascuna tonnellata di uranio (Tabella 4). Lo sviluppo di tali sistemi nucleari avanzati sarà ulteriormente discusso in questo programma di sviluppo. Data la disponibilità prevista di riserve di uranio, l'aumento della capacità nucleare nello scenario BLUE Map entro il 2050 potrà essere raggiunto senza il loro sfruttamento su vasta scala. Tuttavia, se le riserve di uranio a basso costo dovessero scarseggiare, l'attrattiva economica esercitata dal riciclo del combustibile nucleare aumenterà.

Come rilevato in precedenza, gli impianti esistenti del ciclo del combustibile nucleare per la conversione dell' $UF_6$ , l'arricchimento e la produzione di combustibile sono adeguati ai livelli di domanda previsti per i prossimi anni e nel breve termine esistono progetti per la sostituzione e l'espansione delle capacità di produzione tali da soddisfare le esigenze del mercato. Inoltre, i Paesi in cui sono in atto notevoli programmi per lo sviluppo dell'energia nucleare, come Cina e India, hanno previsto di aumentare le capacità interne di produzione di combustibile nucleare. In generale, è possibile aumentare la capacità di produzione di combustibile in tempi più brevi rispetto a quelli richiesti per espandere la capacità di generazione nucleare. Per questo motivo, la sicurezza dell'approvvigionamento per i servizi

del ciclo del combustibile nucleare non dovrebbe rappresentare, in linea di principio, una grande preoccupazione.

Tuttavia, se la capacità nucleare aumenterà significativamente dopo il 2020, saranno necessari nuovi grandi impianti in altri Paesi.

La costruzione di nuovi impianti per la conversione e la fabbricazione di combustibile, secondo quanto richiesto, non dovrebbe comportare difficoltà tecniche, ma poiché la tecnologia utilizzata per l'arricchimento comporta aspetti delicati dal punto di vista della non proliferazione, tali aspetti limiteranno le ubicazioni possibili per le nuove strutture. Per alcuni Paesi preoccupati per la sicurezza dell'approvvigionamento energetico, questo potrebbe essere un disincentivo a fare affidamento sull'energia nucleare.

Per rispondere a tale preoccupazione si potrebbero istituire impianti di arricchimento "black box", in cui il Paese ospite non avrebbe accesso alla tecnologia. Inoltre i forum internazionali ospitano diversi dibattiti a livello internazionale sulla creazione di meccanismi volti a fornire garanzie sull'approvvigionamento di combustibile nucleare ai Paesi che non dispongono di impianti propri di arricchimento. Il progresso di tali proposte potrebbe facilitare l'espansione nucleare in un più ampio numero di Paesi dopo il 2020. In una prospettiva di più lungo termine, lo sviluppo dei sistemi avanzati che offrono maggiore resistenza alla proliferazione potrebbe fornire soluzioni tecnologiche a questo problema.

## Riquadro 2. Introduzione alla fissione nucleare e al ciclo del combustibile

### Reattori nucleari e fissione

La fissione nucleare è il processo fondamentale per la produzione di calore in una centrale nucleare. Un nucleo atomico pesante, assorbe una singola particella nucleare (un neutrone), che provoca la scissione del nucleo in due nuclei più piccoli (noti come prodotti di fissione), rilasciando ulteriori neutroni ed energia termica. Se, su base statistica, uno di questi neutroni causa un'altra fissione, si crea una reazione a catena nucleare stabile. Il calore viene rimosso dal combustibile nucleare attraverso un refrigerante (normalmente acqua) e utilizzato per produrre il vapore che alimenta un turbogeneratore.

Solo alcuni tipi di nuclei pesanti sono in grado di fissionare (materiali "fissili"). Il principale nucleo fissile (o isotopo) usato nella grande maggioranza delle centrali nucleari esistenti è l'uranio 235 (U-235), che è contenuto soltanto nella percentuale dello 0,71% nell'uranio naturale. Per la maggior parte dei tipi di reattori, la proporzione di U-235 nel combustibile deve essere aumentata del 4–5% in un impianto di arricchimento.

Generalmente l'U-235 subisce la fissione quando assorbe un neutrone lento (o "termico"). Poiché la maggior parte dei neutroni prodotti sono inizialmente "veloci", il reattore deve contenere anche un

“moderatore”, un materiale (di solito l’acqua) che rallenta i neutroni ai livelli dell’energia termica. La reazione nucleare è controllata mediante l’inserimento o la rimozione di barre di controllo contenenti materiali che assorbono i neutroni.

La maggioranza delle centrali nucleari esistenti, come gran parte dei modelli per nuovi impianti, utilizzano reattori ad acqua leggera (LWR) che utilizzano l’acqua comune sia come refrigerante che come moderatore. Questi si suddividono ulteriormente in reattori ad acqua pressurizzata (PWR), il tipo più comune, e reattori ad acqua bollente (BWR). Un ristretto numero d’impianti utilizza acqua pesante, che contiene deuterio (un isotopo dell’idrogeno). Si tratta di un moderatore più efficace e le centrali che lo adoperano possono utilizzare come combustibile uranio non arricchito. Alcuni impianti di vecchia generazione utilizzano altri tipi di reattori (quali i reattori refrigerati e moderati a gas grafite), ma questa tecnologia non è attualmente proposta per le nuove costruzioni.

### La produzione del combustibile nucleare

Il combustibile nucleare è un prodotto composto (per la maggior parte dei reattori attualmente in funzione) da pastiglie ceramiche di biossido di uranio arricchito ( $\text{UO}_2$ ) incapsulate in tubi di lega di zirconio, disposti in una griglia all’interno dell’elemento di combustibile nucleare. Oltre all’estrazione di uranio e alla produzione di minerale di uranio concentrato, il segmento di “front end” del ciclo del combustibile è composto da tre processi industriali nucleari principali:

- conversione del minerale di uranio concentrato in esafluoruro di uranio ( $\text{UF}_6$ );
- arricchimento dell’ $\text{UF}_6$  (per aumentare la proporzione dell’isotopo fissile U-235);
- Fabbricazione degli elementi di combustibile (compresa la preparazione di pastiglie di  $\text{UO}_2$  a partire dall’ $\text{UF}_6$  arricchito).

### Cicli del combustibile aperto e chiuso

La maggior parte dei combustibili nucleari rimane per tre o quattro anni nel reattore. Al momento della loro rimozione essi contengono normalmente circa il 96% di uranio (di cui la maggior parte è U-238, con meno dell’1% di U-235 e quantità minori di altri isotopi dell’uranio), 3% di prodotti di scarto e 1% di plutonio. Il combustibile esaurito potrebbe essere ritenuto un rifiuto da stoccare in condizioni controllate ed eventualmente smaltire in depositi geologici. Questo ciclo del combustibile è noto con il nome di ciclo “aperto” o “once through”.

Tuttavia, il combustibile esaurito può anche essere riciclato in un ciclo del combustibile “chiuso”, mediante l’estrazione dell’uranio e del plutonio in esso contenuti, successivamente utilizzati per la preparazione di altro combustibile nucleare. I prodotti di scarto, che costituiscono scorie altamente radioattive, sono separati per essere sottoposti a un ulteriore trattamento, seguito da uno stoccaggio temporaneo, in attesa dello smaltimento finale in un deposito geologico.

L’uranio riciclato può essere nuovamente arricchito in appositi impianti e utilizzato per produrre nuovo combustibile. Il plutonio può essere utilizzato in una miscela combustibile di ossido di plutonio e uranio (MOX), in cui il plutonio è il componente fissile principale.

### Cicli del combustibile avanzati e reattori veloci

Oltre il 99% dell’uranio naturale è costituito da U-238, un isotopo “fertile”. Ciò significa che esso non si fissiona in un reattore, ma può assorbire un neutrone per formare (dopo ulteriori fasi di decadimento) il componente fissile plutonio-239 ( $\text{Pu-239}$ ). Il combustibile al plutonio si può utilizzare nei reattori “termici” esistenti, ma il  $\text{Pu-239}$  subisce la fissione con neutroni veloci più efficientemente rispetto all’U-235 e può quindi essere usato come combustibile in reattori privi di moderatore, chiamati reattori “veloci”.

Negli attuali cicli del combustibile, che utilizzano principalmente U-235, la maggior parte dell’uranio rimane negli scarti dagli impianti di arricchimento, con circa 1,6 milioni di tonnellate di uranio “impovertito” stimati in stoccaggio. In un reattore veloce, l’uranio impoverito può essere collocato intorno al nocciolo in un “mantello”. L’U-238 contenuto assorbe i neutroni per creare il  $\text{Pu-239}$ , che viene poi estratto chimicamente per produrre nuovo combustibile. Questo processo è chiamato “autofertilizzazione” e può produrre più combustibile di quanto ne consumi. L’utilizzo della fertilizzazione su larga scala per trasformare l’U-238 in combustibile nucleare estenderebbe la vita delle riserve di uranio esistenti per migliaia di anni (Tabella 4).

Questo argomento sarà discusso in modo approfondito nella sezione su Sviluppo e sfruttamento della tecnologia del presente programma di sviluppo

# ***Sviluppo e sfruttamento della tecnologia: azioni e obiettivi intermedi***

## **Lo sviluppo evolutivo delle tecnologie attuali**

### **Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:**

- Contemporaneamente allo sfruttamento dei vantaggi che derivano dalla riproduzione, per quanto possibile, di modelli standardizzati, l'industria nucleare dovrebbe proseguire lo sviluppo evolutivo di modelli di reattori e combustibile nucleare, per trarre beneficio dall'esperienza acquisita con la costruzione di impianti di riferimento e con gli avanzamenti tecnologici, affinché l'energia nucleare resti competitiva.

Gli attuali modelli di impianti nucleari sono stati elaborati dai principali fornitori di energia nucleare su base commerciale, spesso in collaborazione con le principali aziende fornitrici di energia elettrica, per rispondere alla domanda attuale e prevista di nuova potenza nucleare. Ciò riflette lo stato dell'arte dell'energia nucleare quale tecnologia matura e commercializzata. Un obiettivo importante tanto per i fornitori quanto per i loro clienti è stato quello di realizzare modelli standard con adattamenti minimi, in modo da prendere in considerazione le condizioni e il quadro normativo locali. Per quanto esistano esempi passati di standardizzazione, nella prassi inizialmente adottata ciascuna centrale nucleare aveva spesso caratteristiche di progettazione proprie.

Apportare modifiche significative a questi progetti standard comporterà maggiori incertezze e costi aggiuntivi. Ciò suggerisce che una volta presentati i modelli attualmente offerti in centrali pilota, vi saranno forti incentivi ad apportare il minor numero possibile di modifiche alle unità realizzate successivamente. Sebbene vi siano alcune modifiche che sarà impossibile non apportare per soddisfare diversi requisiti delle normative vigenti a livello locale, il fatto di mantenere tali modifiche di progettazione sotto stretto controllo, sia durante la costruzione che la messa in funzione, sarà essenziale per la realizzazione dei potenziali vantaggi della standardizzazione. La costruzione di una serie di modelli standardizzati consentirà di apportare progressivi miglioramenti al processo di costruzione, in modo da ridurre lead time e costi complessivi.

Ciononostante, a un certo livello, i potenziali vantaggi generati dal fatto di apportare modifiche evolutive potrebbero superare i rischi potenziali. Ciò dipenderà in larga misura dalle preferenze delle aziende di pubblica utilità che

commissionano nuove centrali nucleari. Molte preferiranno la maggiore certezza di un modello provato e testato, ma altre potrebbero desiderare di aggiungere modifiche progettuali tali da offrire un potenziale per migliori performance e/o una maggiore produzione. Potrebbe esserci l'opportunità di introdurre tecniche di costruzione più avanzate ed efficienti. Emerge chiaramente che i continui sviluppi evolutivi dei progetti esistenti e la tempistica per l'introduzione di nuove caratteristiche e miglioramenti saranno essenzialmente frutto di decisioni commerciali intese a migliorare la competitività delle centrali nucleari.

Nel ciclo del combustibile, ci si può attendere che lo sviluppo e lo sfruttamento di tecnologie nuove e migliori da parte di operatori commerciali aumenterà la competitività degli impianti nucleari negli anni futuri. In particolare, l'utilizzo efficiente di tecnologie di arricchimento mediante centrifuga, e potenzialmente l'arricchimento laser, contribuiranno a migliorare il rendimento economico del ciclo del combustibile. Il continuo sviluppo di migliori tipi di combustibile dovrebbe anche incrementare l'efficienza del combustibile, così come l'affidabilità e il rendimento delle centrali nucleari. Inoltre, l'utilizzo di tecnologie e metodi migliori per le procedure di manutenzione presso le centrali nucleari dovrebbe ridurre il numero e la durata degli shutdown, con conseguente aumento della produzione dell'impianto.

## **Le soluzioni per lo smaltimento del combustibile esaurito e delle scorie ad alta attività**

### **Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:**

- I Governi dovrebbero elaborare politiche e provvedimenti volti a garantire un adeguato finanziamento a lungo termine per la gestione e lo smaltimento delle scorie radioattive e per lo smantellamento e istituire le necessarie strutture giuridiche e organizzative.
- I Governi dovrebbero assicurare lo sviluppo e l'implementazione di programmi per la gestione a lungo termine e lo smaltimento di tutti i tipi di scorie radioattive, in particolare per la realizzazione e la conduzione di depositi geologici per il combustibile irraggiato e le scorie ad alta attività.

Come osservato in precedenza in questo programma di sviluppo, la sfida principale per il futuro della gestione delle scorie radioattive consiste nello sviluppare e attuare piani per l'eventuale smaltimento di combustibile esaurito e scorie ad alta attività vetrificate. Le scorie ad attività intermedia di lunga vita possono anche essere smaltite nello stesso modo.

L'approccio seguito a livello mondiale propende per lo smaltimento di tali materiali in depositi geologici profondi. Diversi Paesi hanno realizzato laboratori di ricerca sotterranei in diverse ubicazioni geologiche per sviluppare diversi concetti di deposito per lo smaltimento e investigare sui fattori che condizionano la loro prestazione sul lungo periodo (Tabella 5). Le basi scientifiche e tecnologiche per l'attuazione dello smaltimento geologico sono già solide. Attualmente diversi Paesi dispongono di programmi attivi di RS&D volti alla creazione di depositi geologici entro il 2050. Se la loro attuazione avrà esito positivo, questi progetti in corso di attuazione e in fase di studio forniranno percorsi di smaltimento per buona parte del combustibile esaurito e delle scorie ad alta attività già accumulate e per quelle che saranno prodotte entro il 2050.

Svezia e Finlandia sono leader nell'avanzamento dei progetti per la costruzione e la messa in funzione di depositi. In entrambi i Paesi sono stati selezionati siti e si prevede che gli impianti saranno operativi verso il 2020. La Francia dovrebbe seguire a ruota entro il 2025. Nel frattempo, tuttavia, è stata adottata la decisione politica di abbandonare un programma di lungo periodo per lo sviluppo di un deposito geologico a Yucca Mountain, nel Nevada (Stati Uniti).

A più lungo termine, se il riciclo del combustibile esaurito verrà introdotto su larga scala, le scorte esistenti di tale materiale, oggi spesso trattate come scorie, potrebbero diventare una fonte energetica. In parte per questo motivo alcuni Paesi stanno progettando i loro depositi in modo tale da consentire il recupero del combustibile esaurito, almeno fino a quando non verrà presa una decisione circa la sigillatura definitiva del sito. L'utilizzo di cicli avanzati del combustibile potrebbe anche ridurre notevolmente la quantità di combustibile esaurito e delle scorie ad alta attività da smaltire. Sarebbero ancora necessari alcuni siti di smaltimento, ma di numero e dimensioni inferiori. Questi aspetti verranno approfonditi nella sezione seguente.

**Tabella 5. Laboratori di ricerca sotterranei (LRS) per lo smaltimento di scorie ad elevato tasso di radioattività**

<b>Paese</b>	<b>Geologia</b>	<b>Sito e stato</b>
Belgio	Argilla	Mol. HADES LRS in esercizio dal 1984.
Finlandia	Granito	Olkiluoto. ONKALO LRS in costruzione. R&S in loco dal 1992. Il sito è stato ora selezionato per un deposito.
Francia	Argilla/marna Argilla	Tournemire. Stabilimento per test sotterranei in esercizio dal 1992. Bure-Saudron. LRS in esercizio dal 2004.
Germania	Sale (cupola) Sale (cupola)	Asse. Ex-miniera usata per R&S fino al 1997. Gorleben. Ex miniera. R&S in loco dal 1985, sospesa nel 2000; sospensione revocata nel 2010.
Giappone	Granito Roccia sedimentaria	Mizunami. LRS in esercizio dal 1996. Horonobe. LRS in costruzione.
Russia	Granito, gneiss	Regione di Krasnoyarsk. LRS di cui si prevede l'inizio attività dopo il 2015. Si prevede che l'LRS sarà la prima fase del deposito.
Svezia	Granito Granito	Stripa. Ex-miniera usata per R&S dal 1976 al 1992. Oskarsham. Äspö LRS in esercizio dal 1995.
Svizzera	Granito Argilla	Grimsel. LRS in esercizio dal 1983. Mont Terri. LRS in esercizio dal 1995.
Stati Uniti	Sale (stratificato) Tufo saldato	Carlsbad, New Mexico. Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in funzione fin dal 1999 come deposito geologico per le scorie transuraniche non termo generatrici generate da attività di difesa. Yucca Mountain, Nevada. R&S in loco dal 1996. Richiesta di licenza per un deposito presentata nel 2008, ritirata nel 2010.

Fonte: NEA, 2008 (aggiornata).

## Lo sviluppo di una nuova generazione di tecnologie nucleari

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- I Governi dovrebbero continuare a dare sostegno a RS&D in materia di tecnologia nucleare avanzata per sfruttarne il potenziale a lungo termine di fornire energia sostenibile con migliori criteri economici, con sicurezza e affidabilità rafforzate, con più forte resistenza alla proliferazione e maggiore protezione fisica.
- La comunità internazionale dovrebbe continuare a rafforzare la collaborazione per lo sviluppo di reattori e cicli del combustibile avanzati.
- L'industria nucleare e le aziende di pubblica utilità dovrebbero partecipare, in cooperazione con gli istituti di ricerca sul nucleare, allo sviluppo dei sistemi nucleari di prossima generazione, affinché i progetti scelti per la dimostrazione siano quelli più idonei per la definitiva commercializzazione.

Quasi tutte le centrali nucleari in esercizio o in costruzione utilizzano reattori ad acqua leggera o pesante. Si prevede che nel 2050 queste tecnologie consolidate e i progetti evolutivi su di esse basati continueranno a essere prevalenti nella capacità nucleare. Tuttavia alcuni progetti avanzati potrebbero essere disponibili per lo sfruttamento commerciale intorno al 2030 e una maggiore diffusione sul mercato di tali sistemi potrebbe verificarsi dopo il 2040.

In alcuni Paesi sono attualmente in corso iniziative di RS&D su questi sistemi nucleari avanzati, soprattutto nel quadro di programmi internazionali come il Generation IV International Forum (GIF). Per dimostrare e implementare tali sistemi nucleari avanzati, che presenteranno caratteristiche notevolmente diverse rispetto alle tecnologie nucleari esistenti, saranno necessari alcuni notevoli passi in avanti in varie discipline tecnologiche (in particolare nella scienza dei materiali).

## I sistemi nucleari di IV generazione

Avviato nel 2001, il GIF è un progetto internazionale di collaborazione nel settore ricerca e sviluppo (R&S) per sistemi nucleari innovativi selezionati. Tra i partecipanti vi sono 12 Paesi all'avanguardia nel settore dell'energia nucleare (tra cui Canada, Cina, Francia, Giappone, Corea, Russia e Stati Uniti), oltre all'Euratom (una sezione dell'Unione Europea). Gli obiettivi principali definiti nel programma di sviluppo del GIF (GIF, 2002) rientrano nelle aree della sostenibilità, economia, sicurezza e affidabilità, resistenza alla proliferazione e protezione fisica (Riquadro 3). Gli obiettivi di sostenibilità del GIF includono un utilizzo più efficiente del combustibile e la minimizzazione dei rifiuti. Le principali iniziative di R&S verso questi obiettivi sono descritte nella sezione seguente, dedicata ai cicli avanzati del combustibile.

L'obiettivo economico dei sistemi nucleari avanzati è quello di essere competitivi rispetto alle opzioni energetiche alternative che si renderanno disponibili. A tal fine, gli obiettivi economici del GIF comprendono una riduzione sia del costo medio livellato del ciclo di vita per la generazione di elettricità, sia del costo totale d'investimento. Meccanismi per ridurre i costi sono in corso d'integrazione nei progetti di sistemi nucleari avanzati. Grande rilievo è dato alla standardizzazione e alla semplificazione del progetto, a metodi avanzati di costruzione e alla fabbricazione in sito dei componenti e sistemi principali.

La logica degli obiettivi di sicurezza e affidabilità del GIF è fondata sulla necessità di accrescere la fiducia da parte dell'opinione pubblica, nonostante in queste aree la storia pregressa delle centrali nucleari sia positiva. L'obiettivo è quello di integrare funzioni di sicurezza nei progetti degli impianti di quarta generazione usando metodi avanzati di valutazione del rischio e incorporando caratteristiche di sicurezza "passiva" o "intrinseca". Analogamente, il rispetto degli obiettivi di resistenza alla proliferazione e di protezione fisica implica caratteristiche progettuali nei reattori e nei cicli del combustibile che prevengano efficacemente l'uso scorretto dei materiali e delle strutture nucleari e che li proteggano da furti o atti di terrorismo.

Gli obiettivi GIF sono stati usati come criteri per la selezione di sei sistemi per ulteriore R&S in collaborazione (Riquadro 4). Diversi aspetti trasversali (tra cui cicli avanzati del combustibile) sono poi stati scelti per uno sforzo orizzontale. Nel quadro del GIF sono in corso di definizione disposizioni di sistema per ciascuna tecnologia selezionata tra i Paesi che partecipano alle relative iniziative di R&S. Disposizioni più dettagliate sono anche in corso di definizione per specifiche aree di R&S.

## Riquadro 3. Obiettivi GIF per i sistemi a energia nucleare di IV generazione

**I sistemi nucleari di IV generazione permetteranno:**

### **Sostenibilità**

- Di generare energia sostenibile in grado di soddisfare gli obiettivi di protezione ambientale dell'atmosfera, favorire la disponibilità a lungo termine di combustibile nucleare e un utilizzo efficiente del combustibile per la produzione di energia su scala mondiale.
- Di minimizzare e gestire le scorie radioattive e in particolare ridurre il relativo onere a lungo termine, migliorando così la tutela della salute pubblica e dell'ambiente.

### **Efficienza sotto il profilo economico**

- Di ottenere un vantaggio chiaro, relativamente ai costi del ciclo di vita, rispetto alle altre fonti energetiche.
- Di ottenere un livello di rischio finanziario confrontabile rispetto ad altri progetti energetici.

### **Sicurezza e affidabilità**

- Sicurezza e affidabilità di funzionamento eccellenti.
- Ridottissime probabilità di danneggiamento del nocciolo del reattore.
- Di eliminare la necessità di un piano di risposta all'emergenza esterno al sito.

### **Resistenza alla proliferazione e protezione fisica**

- Accrescere la garanzia che tali sistemi siano progettati per disincentivare il più possibile un uso improprio o il furto di materiali utilizzabili per la costruzione di armi e fornire una maggiore protezione fisica contro atti di terrorismo.

Fonte: GIF, 2002.

I sei sistemi comprendono tipi di reattori molto diversi dal punto di vista tecnico. Tutti sono comunque potenzialmente compatibili con gli obiettivi GIF e ciascuno presenta un certo numero di vantaggi e specifiche problematiche da affrontare nella R&S. L'attuale livello di avanzamento tecnologico dei sei sistemi è piuttosto differenziato e alcuni concetti (in particolare SFR e VHTR) sono stati oggetto di notevoli iniziative di RS&D. Inoltre, i membri del GIF hanno finora riservato maggior attenzione ad alcuni concetti piuttosto che ad altri.

L'intento di approfondire le indagini su una varietà di opzioni tecnologiche mira a far emergere, nel tempo, quelle più promettenti. L'obiettivo generale è quello di consentire la dimostrazione di almeno alcuni tra i sei sistemi entro il 2030, affinché i primi sistemi di quarta generazione siano disponibili per la commercializzazione prima del 2040. Tuttavia, l'ambito della collaborazione entro il quadro di riferimento GIF finora non si estende alla fase di dimostrazione. Si prevede che i Governi, le organizzazioni di ricerca e i partner industriali nei Paesi partecipanti avvieranno iniziative separate in questa fase, mediante progetti sia nazionali sia internazionali.

Le iniziative per dimostrare la tecnologia VHTR sono le più avanzate, sebbene a temperature inferiori rispetto

a quelle previste. Tali progetti sono particolarmente indicati per le applicazioni per la produzione di calore e verranno discussi successivamente nella sezione sulle applicazioni non elettriche. Tra le altre tecnologie, si prevede che SFR verrà dimostrato per primo. Prototipi di SFR sono stati costruiti in alcuni Paesi nel passato e grandi impianti SFR sono in funzione in Russia e Giappone. Nel 2006 la Francia si è impegnata per realizzare un prototipo di quarta generazione SFR, noto come ASTRID, che potrebbe entrare in funzione all'inizio del 2020. Il Giappone intende realizzare un prototipo di quarta generazione SFR entro il 2025.

La Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP), avviata nel 2007, è un'iniziativa europea lanciata nell'ambito dello Strategic Energy Technology Plan dell'Unione Europea. Il progetto coinvolge istituti di ricerca, il settore industriale, scientifico e altre parti interessate provenienti dall'Europa. Gli obiettivi SNETP comprendono la dimostrazione di sistemi nucleari di quarta generazione e l'utilizzo di energia nucleare per applicazioni non elettriche. In particolare, SNETP ha istituito la European Sustainable Nuclear Industrial Initiative, il cui obiettivo è quello di progettare e costruire due prototipi di reattori veloci di quarta generazione (uno SFR e l'altro GFR o LFR) nei prossimi 10-15 anni.

## Riquadro 4. Concetti per sistemi di energia nucleare di IV generazione selezionati da GIF

I sei concetti per i sistemi avanzati a energia nucleare che il Generation IV International Forum (GIF) ha selezionato come più promettenti per ulteriore lavoro di ricerca sono:

### **Reattore veloce refrigerato a sodio (Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)**

Diversi prototipi di SFR sono già stati realizzati e messi in esercizio in alcuni Paesi e pertanto questa è considerata come una delle tecnologie di quarta generazione più affermate. Gli SFR utilizzano uno spettro neutronico veloce, sodio liquido come refrigerante e un ciclo del combustibile chiuso. I progetti di taglia medio-grande (fino a 1 500 MW) utilizzano combustibile a ossidi misti di uranio e plutonio, con impianti centralizzati per il riciclo. Sono al vaglio anche progetti di taglia ridotta, intorno a 100 MW, che utilizzano combustibili metallici e impianti di riciclo che servono più reattori. Gli SFR presentano una temperatura di uscita relativamente bassa (550 °C) e tale caratteristica ne limita l'uso per applicazioni non legate all'elettricità. La riduzione delle spese d'investimento e l'incremento della sicurezza passiva sono obiettivi importanti di R&S, insieme allo sviluppo di tecnologie avanzate di ritrattamento del combustibile.

### **Reattore ad altissima temperatura (Very High Temperature Reactor, VHTR)**

Il vantaggio principale del concetto VHTR consiste nel fatto che può generare le più elevate temperature (fino a 1 000 °C) necessarie per la produzione d'idrogeno e per alcune applicazioni di calore di processo. I sistemi VHTR tuttavia non consentono l'uso di un ciclo del combustibile chiuso. I progetti di riferimento sono da circa 250 MW per la produzione di elettricità o da 600 MW per la produzione di calore, refrigerati a elio e con spettro neutronico termico moderato a grafite. Il combustibile dovrebbe essere sotto forma di particelle rivestite, formate in blocchi o sfere secondo il modello di nocciolo. I modelli VHTR si basano su prototipi di reattori raffreddati a gas ad alta temperatura costruiti in Germania e negli USA e buona parte delle attività di R&S sono state completate. Le sfide ancora da affrontare riguardano lo sviluppo di migliori materiali resistenti al calore, la progettazione e la fabbricazione del combustibile.

### **Reattore supercritico refrigerato ad acqua (Super-Critical Water-cooled Reactor, SCWR)**

Tra i progetti di quarta generazione, SCWR è il progetto più strettamente legato alla tecnologia LWR esistente. Gli SCWR dovrebbero funzionare a temperature e pressioni più elevate, superiori al punto critico termodinamico dell'acqua, consentendo così una semplificazione della progettazione ed efficienze termiche notevolmente migliorate. I progetti di riferimento forniscono fino a 1 700 MW, usano combustibile a ossidi di uranio e presentano temperature di uscita fino a 625 °C. Per gli SCWR sono possibili spettri neutronici termici o veloci; il secondo tipo utilizzerebbe un ciclo del combustibile chiuso basato su impianti centralizzati. Le principali sfide nel campo R&S riguardano la soluzione dei problemi di sicurezza nella progettazione del nocciolo, oltre che lo sviluppo di materiali resistenti alla corrosione per le strutture destinate al combustibile e alle strutture del nocciolo.

### **Reattore veloce refrigerato a gas (Gas-cooled Fast Reactor, GFR)**

Il progetto di riferimento per il sistema GFR prevede un reattore da 1 200 MW refrigerato a elio, con spettro neutronico veloce e ciclo del combustibile chiuso con impianto di trattamento e rifabbricazione del combustibile esaurito in loco. Per la generazione di elettricità tale reattore dispone di una turbina a elio ad alto rendimento termico a ciclo diretto. L'elevata temperatura di uscita (850 °C) potrebbe anche essere sfruttata per la produzione d'idrogeno o di calore di processo. Le sfide principali nel campo R&S comprendono lo sviluppo di nuovi combustibili (ad esempio, combustibili rivestiti in ceramica o particelle di combustibile) e materiali, oltre che la progettazione del nocciolo e della turbina a elio.

### **Reattore veloce refrigerato a piombo (Lead-cooled Fast Reactor, LFR)**

Il sistema LFR dovrebbe presentare un reattore a spettro veloce refrigerato a metallo liquido e un ciclo del combustibile chiuso. Il piombo fuso è un refrigerante relativamente inerte che oltre a essere abbondante offre vantaggi in termini di sicurezza. I progetti attualmente allo studio comprendono modelli di taglia ridotta (20 MW) e media (600 MW). Nel primo caso si tratterebbe di un impianto prodotto in fabbrica con intervalli molto lunghi tra le ricariche (15-20 anni). Inizialmente i modelli LFR verrebbero sviluppati per la produzione di elettricità, ma versioni ad alta temperatura consentirebbero anche la produzione di idrogeno. Gli obiettivi principali in termini di R&S riguardano i combustibili, i materiali e il controllo della corrosione.

### **Reattore a sali fusi (Molten Salt Reactor, MSR)**

Il progetto MSR di riferimento riguarda un'unità da 1 000 MW con uno spettro neutronico epitermico (cioè intermedio tra termico e veloce) e come combustibile una miscela circolante di sali fusi che funge anche da refrigerante. La miscela di combustibile è composta di fluoruri di sodio, zirconio e uranio, che fluiscono all'interno del nocciolo attraverso canali in grafite. Alla miscela di combustibile si potrebbero aggiungere anche plutonio e altri attinidi (elementi pesanti), realizzando un ciclo del combustibile chiuso. La chimica dei sali fusi, la gestione e la resistenza alla corrosione, oltre che i materiali e il ciclo del combustibile, sono le sfide principali in materia di R&S.

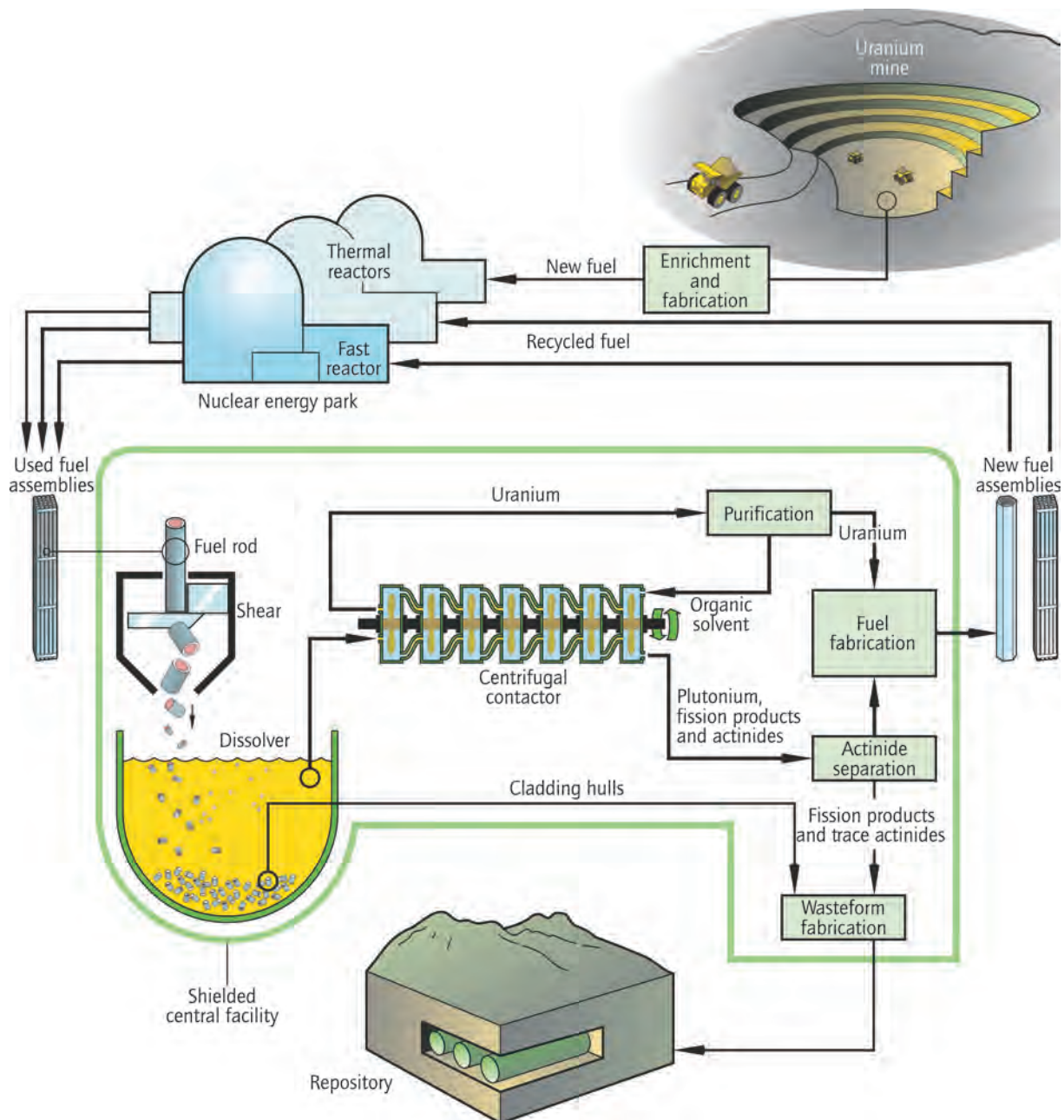
Fonte: GIF, 2002; GIF, 2009.

## I cicli avanzati del combustibile

I cicli del combustibile chiusi, che comportano il ritrattamento del combustibile esaurito e il riciclo di materiali fissili e fertili inclusi nella maggior parte dei modelli di reattore di quarta generazione,

fanno sperare nel prolungamento della vita delle risorse di uranio fino ad alcuni millenni (Tabella 4). Potrebbero quindi ridurre sia l'esigenza di estrarre l'uranio, sia i volumi di scorie radioattive prodotte per ogni unità di elettricità generata. I cicli più avanzati potrebbero inoltre facilitare la gestione

**Figura 8. Concetto per un ciclo di carburante chiuso comprendente reattori veloci e tecnologia avanzata per il reprocessing dell'acqua**



Fonte: GIF, 2002.

**PUNTO SALIENTE:** i cicli a carburante chiuso sono in grado di estendere le risorse di uranio per molti millenni.

delle scorie riducendone l'attività a lunga vita e quindi minimizzando le quantità di scorie ad alta attività da collocare nei depositi geologici.

Come affermato in precedenza nel presente programma di sviluppo, le tecnologie per il ritrattamento del combustibile esaurito e per il riciclo dell'uranio e del plutonio in esso contenuto in nuovo combustibile sono già state implementate su scala commerciale in alcuni Paesi. Tuttavia tecnologie di ritrattamento più avanzate, in fase di sviluppo nel contesto dei sistemi di quarta generazione, potrebbero offrire vantaggi significativi in termini economici, di resistenza alla proliferazione e di minimizzazione delle scorie. In particolare, tali tecnologie potrebbero consentire di evitare la separazione del plutonio, ciò che contribuirebbe a ridurre le preoccupazioni circa la proliferazione.

Esistono diversi percorsi tecnologici per lo sviluppo di soluzioni avanzate di ritrattamento/riciclo, ma attualmente vengono seguiti due filoni principali di RS&D. Il primo si basa sull'ulteriore sviluppo degli attuali processi acquosi, che comportano la dissoluzione del combustibile esaurito in acido e la separazione chimica dei suoi componenti riciclabili dalle scorie. Con la tecnologia avanzata di ritrattamento acquoso, verrebbe dapprima separata la gran parte dell'uranio, poi l'uranio rimanente verrebbe separato insieme al plutonio. (Figura 8) La miscela U-Pu derivante verrebbe usata direttamente per produrre combustibile a ossidi misti. Poiché in parte si basa su esperienze e tecnologie esistenti, tale riciclo acquoso avanzato potrebbe essere pronto per la dimostrazione insieme ai primi reattori di quarta generazione.

Il secondo filone principale di RS&D è il "pyroprocessing" del combustibile esaurito, ad alte temperature, con tecniche non acquose. Il combustibile esaurito in forma metallica verrebbe disciolto in sali fusi o in metalli liquidi. Questa tecnologia presenta un gran numero di potenziali vantaggi, tra cui la possibilità di eseguire il riciclo su piccola scala, in loco, presso i siti dei reattori, senza bisogno di grandi impianti centralizzati di ritrattamento. Si trova tuttavia in uno stadio iniziale di sviluppo e alcune fasi sono state realizzate solo in laboratorio. Si prevede che una dimostrazione completa possa essere realizzata intorno al 2030.

La riduzione dei volumi delle scorie radioattive ad alta attività per un eventuale smaltimento in depositi è legata alla capacità dei cicli avanzati

di "bruciare" (cioè consumare mediante reazioni nucleari) gli isotopi pesanti a lunga vita (noti come attinidi minori o transuranici) che si formano nel combustibile nucleare durante l'irraggiamento nel reattore. Mentre nel breve periodo all'attività del combustibile esaurito contribuiscono in prevalenza i prodotti di fissione ad alta attività ma a vita breve, gli attinidi minori e alcuni prodotti di fissione a vita lunga sono dominanti negli orizzonti temporali molto più lunghi di rilievo per lo smaltimento in deposito. Di conseguenza, bruciando gli attinidi minori si può ridurre notevolmente la componente a vita lunga delle scorie ad alta attività.

Un'altra possibilità per diminuire il volume delle scorie a vita lunga è data dalle tecniche di "separazione e trasmutazione" (S&T). Con i sistemi S&T, gli attinidi minori vengono separati chimicamente dall'uranio e dal plutonio nel combustibile riciclato. Possono poi essere sottoposti a "trasmutazione", che comporta l'irraggiamento in un reattore dedicato o in un sistema sottocritico sostenuto da acceleratore (accelerator-driven system, ADS). Ciò provoca reazioni nucleari che trasformano gli attinidi minori in isotopi a vita più breve di elementi più leggeri. La prima dimostrazione di una trasmutazione ADS potrebbe aver luogo nell'impianto MYRRHA, in Belgio, che dovrebbe iniziare l'attività nel 2023.

## **Le altre iniziative relative ai sistemi nucleari avanzati**

Un altro importante programma internazionale per promuovere lo sviluppo di tecnologie nucleari avanzate è l'International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), organizzato dall'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (AIEA), che coinvolge 30 Paesi detentori o utilizzatori di tecnologie nucleari. Ha lo scopo di favorire azioni a livello nazionale e internazionale a supporto dell'innovazione nei reattori nucleari, nei cicli del combustibile e negli approcci istituzionali. In particolare INPRO ha definito un insieme di principi e di requisiti per valutare la sostenibilità di sistemi nucleari innovativi e per indirizzare i membri nelle loro iniziative di sviluppo.

La Global Nuclear Energy Partnership (GNEP), promossa originariamente dagli Stati Uniti nel 2006, è una struttura di collaborazione per quei Paesi che vogliono espandere l'uso dell'energia nucleare a scopi pacifici, in particolare promuovendo lo sviluppo e lo sfruttamento di reattori e cicli del combustibile avanzati. Conta attualmente 25 Paesi membri a pieno titolo e oltre 30 Paesi con statuto di osservatore. GNEP attribuisce particolare importanza

agli approcci tecnologici volti a ridurre il rischio di proliferazione di materiali e tecnologie sensibili, garantendo al contempo un approvvigionamento sicuro di combustibile nucleare. L'attività di sviluppo sarà realizzata sia nel quadro di accordi bilaterali esistenti e nuovi, sia attraverso le strutture GIF e INPRO.

Nella maggior parte dei Paesi, le iniziative di RS&D sui sistemi nucleari avanzati vengono condotte nell'ambito di uno o più programmi di collaborazione sopra descritti. L'India sta progredendo in modo indipendente verso la dimostrazione di un reattore veloce al sodio, di cui un prototipo è attualmente in fase di costruzione. Tuttavia, questa non è considerata tecnologia di quarta generazione. Nelle intenzioni, esso verrà seguito da un parco di SFR di dimensioni maggiori entro i prossimi 10 o 20 anni.

Inoltre, oggi l'India è l'unico Paese che sta sviluppando il potenziale dei cicli del torio come combustibile, con un impianto dimostrativo programmato per il 2020 e un prototipo su scala reale prima del 2050. Si ritiene che il torio sia più abbondante dell'uranio nella crosta terrestre e il torio naturale (che contiene l'isotopo Th-232) può essere irradiato in un reattore per creare l'isotopo fissile U-233. Questo può essere estratto in un impianto di ritrattamento e utilizzato per generare nuovo combustibile. Tuttavia i cicli del combustibile al torio non sono ancora stati interamente dimostrati su larga scala e rimangono ancora da risolvere alcuni problemi tecnici importanti, in particolare nel riprocessamento del combustibile al torio.

## La situazione attuale e il potenziale di piccoli reattori modulari

Progetti per piccoli reattori modulari (SMR), con potenze di generazione comprese tra alcune decine e alcune centinaia di megawatt, sono in fase di studio in numerosi Paesi, spesso attraverso la cooperazione tra Governi e industria. Tra i Paesi coinvolti vi sono Argentina, Cina, Giappone, Corea, Russia, Sud Africa e Stati Uniti. I progetti SMR comprendono un'ampia gamma di tecnologie, alcune delle quali sono varianti dei sei sistemi di quarta generazione selezionati dal GIF, mentre altre si basano sulla comprovata tecnologia LWR.

Tali reattori potrebbero essere implementati come unità singole o doppie in aree remote prive di grossi sistemi di reti, o per fornire piccoli incrementi di potenza su siti multiunità in reti più grandi. Presentano una semplificazione

progettuale e sarebbero principalmente costruiti in fabbrica, con un potenziale abbattimento dei costi per la produzione in serie. Il costo d'investimento inferiore e minori tempi di realizzazione rispetto alle grandi unità nucleari dovrebbero agevolare il finanziamento. Essi consentirebbero altri vantaggi nell'area della resistenza alla proliferazione, poiché alcuni modelli non richiederebbero ricariche di combustibile in loco, mentre altri avrebbero bisogno di ricarica soltanto dopo diversi anni. Alcuni potrebbero essere utilizzati con i cicli avanzati del combustibile e bruciare materiali riciclati.

Esistono diversi progetti per SMR basati sulla tecnologia LWR. Molti progetti sono stati promossi da aziende del settore nucleare, tra cui AREVA, Babcock & Wilcox, General Atomics, NuScale e Westinghouse. Altri sono in fase di sviluppo da parte di istituti di ricerca nazionali in Argentina, Cina, Giappone, Corea e Russia. Due piccoli impianti progettati per la produzione di elettricità e riscaldamento sono in fase di realizzazione in Russia, basati su reattori rompighiaccio a propulsione; saranno montati su chiatte per l'utilizzo in insediamenti costieri nella penisola di Kamchatka. Altri progetti sono in stato di realizzazione avanzato e le procedure di licenza iniziale sono già in corso. Gli impianti dimostrativi potrebbero entrare in funzione prima del 2020, se si renderanno disponibili i finanziamenti necessari. Tuttavia, al momento non sono stati presi impegni definitivi.

Molti progetti di SMR sono reattori nucleari ad alta temperatura raffreddati a gas (HTR). Il concetto di quarta generazione VHTR è un'estensione di questa tecnologia per temperature ancora più elevate. Gli HTR e VHTR sono adatti per applicazioni volte alla produzione di calore o alla cogenerazione, come sarà più ampiamente discusso nella sezione seguente.

Vi sono anche molti altri progetti per SMR avanzati, compresi reattori veloci raffreddati a metallo liquido. Questi sono in generale in una fase di sviluppo meno avanzata e alcuni sono oggetto di iniziative R&S nell'ambito della collaborazione GIF. Uno dei progetti meglio sviluppati è il 4S prodotto da Toshiba (Giappone), un sistema a "batteria nucleare" raffreddata al sodio in grado di funzionare per 30 anni senza necessità di nuovo combustibile. È stata proposta la realizzazione di un primo impianto di questo tipo per la produzione di 10 MW di elettricità in un insediamento remoto dell'Alaska e sono in corso le iniziali procedure di licenza. Altri concetti di SMR avanzati sono stati proposti da organizzazioni commerciali e di ricerca in numerosi Paesi e alcuni intendono avviare le operazioni per la licenza entro

i prossimi anni. Tuttavia, al momento non è stato annunciato nessun piano certo di realizzazione per simili prototipi.

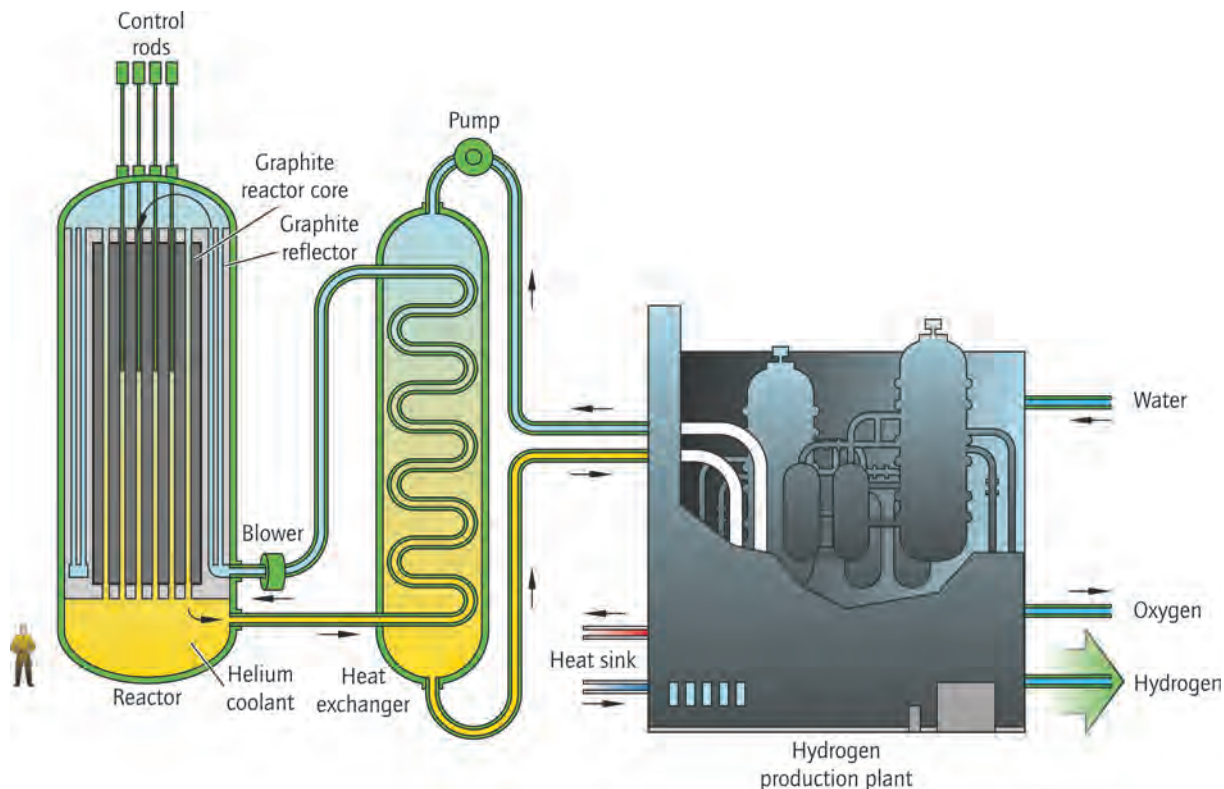
Se la realizzazione di più unità modulari in un unico sito diventasse un'alternativa competitiva alla realizzazione di una o due grandi unità, gli SMR potrebbero allora diventare una componente significativa per la capacità nucleare. Potrebbero anche consentire l'utilizzo di energia nucleare in siti non adatti per grandi unità e alcuni modelli potrebbero estendere il loro utilizzo ad applicazioni non destinate alla produzione di energia elettrica. Resta da vedere se i modelli SMR possono essere commercializzati con successo, con un costo complessivo per unità elettrica prodotta che sia competitivo rispetto agli impianti nucleari più grandi e ad altri tipi d'impianti di generazione. Per gli scopi del presente programma di sviluppo, si ipotizza che la maggior parte della capacità nucleare entro il 2050 sarà fornita da centrali di grosse dimensioni.

## L'energia nucleare come alternativa nel settore del riscaldamento e dei trasporti

Poiché le centrali nucleari vengono generalmente utilizzate in continuo per la produzione di elettricità di carico di base, esse contribuiranno in misura sempre maggiore al settore dei trasporti come fonte di elettricità a basso contenuto di carbonio nelle ore non di punta, per la ricarica di veicoli elettrici e ibridi plug-in, l'uso dei quali crescerà nei prossimi decenni. La diffusione di tali veicoli e di altre modalità di trasporto elettriche, con il conseguente aumento della domanda di elettricità, sono integrati nello scenario BLUE Map su cui si basa il presente programma di sviluppo.

Nonostante lo scenario BLUE Map consideri l'uso dell'energia nucleare solo per la produzione di elettricità, il nucleare presenta anche un notevole potenziale di penetrazione in altri settori energetici

**Figura 9. Schema per Reattore ad altissima temperatura (Very High Temperature Reactor, VHTR) di IV Generazione utilizzato per la produzione di idrogeno**



Fonte: GIF, 2002.

**PUNTO SALIENTE:** alcuni prodotti di IV Generazione forniranno le alte temperature necessarie per la produzione di idrogeno e per altre applicazioni per la trasmissione di calore.

non elettrici nell'intervallo temporale fino al 2050. Tra le possibili applicazioni vi sono l'uso per la generazione del calore di processo (ad esempio per l'industria petrolchimica), il teleriscaldamento, la desalinizzazione dell'acqua marina e l'elettricità e il calore per la produzione d'idrogeno.

Vi sono alcuni esempi di uso del calore derivante dalle centrali nucleari per questi scopi, ma il potenziale dell'energia nucleare sui mercati energetici non elettrici è rimasto finora in larga misura inutilizzato. Se tale situazione dovesse cambiare, i sistemi a energia nucleare dovranno essere adattati alle esigenze di questi mercati. In particolare, la commercializzazione degli HTR potrebbe aumentare le applicazioni per la produzione di calore dell'energia nucleare. Piccoli prototipi di HTR sono in funzione in Cina e Giappone e prototipi più grandi sono stati costruiti in Germania e Stati Uniti alcuni anni fa.

Un paio di prototipi HTR sono in fase di realizzazione in Cina e dovrebbero essere pronti per il collaudo nel 2013, con una produzione di elettricità prevista di oltre 200 MW. Negli Stati Uniti, il progetto Next Generation Nuclear Plant (NGNP) mira a dimostrare la fattibilità dell'uso della tecnologia HTR per la produzione d'idrogeno

e calore di processo ad alta temperatura.

Subordinato al finanziamento, il progetto NGNP potrebbe essere operativo prima del 2025. Anche in Giappone, Corea ed Europa si sta lavorando allo sviluppo della tecnologia HTR. Tuttavia, i progetti per la costruzione di un prototipo HTR modulare in Sud Africa sono stati accantonati a causa della mancanza di finanziamenti.

Tra i modelli di quarta generazione selezionati dal GIF per un ulteriore sviluppo, il VHTR è quello specializzato per applicazioni con calore ad alta temperatura (Figura 9). Si tratta di uno sviluppo dei modelli HTR, adattati a temperature ancora maggiori. Il raggiungimento di temperature così elevate richiederà ulteriore R&S, specialmente per quanto riguarda i materiali termoresistenti. Diversi altri modelli di quarta generazione sono in grado di generare temperature maggiori rispetto ai reattori esistenti, ampliando l'ambito delle loro potenziali applicazioni non elettriche.

Soddisfare la domanda di piccole applicazioni non elettriche, come la produzione distribuita di idrogeno o la desalinizzazione in aree poco popolate, potrebbe eventualmente costituire un ruolo importante per i reattori modulari di piccole dimensioni descritti sopra.

# Politiche e aspetti finanziari e sociali: azioni e obiettivi intermedi

## L'importanza di un forte sostegno dei poteri pubblici

**Per i Paesi che stanno portando avanti un programma nucleare, questo programma di sviluppo raccomanda quanto segue:**

- I Governi dovrebbero fornire un sostegno politico chiaro e forte al programma nucleare, nel quadro di una strategia nazionale che affronti gli obiettivi della politica energetica ed ambientale.
- I Governi dovrebbero collaborare con le aziende elettriche e del nucleare per garantire un approccio coordinato volto a superare gli ostacoli allo sviluppo nucleare, specialmente dove l'energia nucleare è utilizzata per la prima volta o dopo un lungo periodo di inattività della produzione nucleare.

Politiche di sostegno chiare e continuative da parte dei Governi sono un requisito essenziale per il successo dei programmi nucleari. Normalmente questo farà parte della strategia a lungo termine di un Paese per realizzare i propri obiettivi in termini di politiche energetiche e ambientali, che comprendano la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e il controllo delle emissioni di gas a effetto serra. Tra i Paesi che adottano tali politiche a lungo termine per lo sviluppo dell'energia nucleare vi sono la Francia, il Giappone, la Corea e di recente si è aggiunta la Cina.

Vi è ugualmente un'esigenza di forti politiche di sostegno nei casi in cui l'industria per l'approvvigionamento di elettricità appartiene al settore privato. Nessun investitore prenderebbe in considerazione l'idea di costruire una centrale nucleare nonostante l'opposizione governativa e a scoraggiare gli investitori sarebbe sufficiente anche un atteggiamento neutrale o di scarsa partecipazione da parte dei Governi.

Ci sono stati vari casi in cui progetti nucleari sono stati ritardati o cancellati, o impianti in esercizio sono stati obbligati a chiudere prematuramente in conseguenza di variazioni nelle politiche riguardanti l'energia nucleare. Data la probabilità che il periodo di costruzione di una centrale includa le elezioni nazionali e che durante la vita operativa di una centrale si possano avvicendare numerosi Governi, sono necessarie non solo politiche di sostegno da parte del Governo in carica, ma anche una strategia consolidata di lungo periodo che goda

di ampio sostegno politico. Lo sviluppo di tale strategia comprenderà l'esecuzione di consultazioni pubbliche e di dibattiti per raggiungere il consenso a livello nazionale sulla strada da seguire.

L'introduzione di un nuovo programma nucleare richiederà l'assunzione di un ruolo governativo particolarmente attivo. In alcuni Paesi, l'industria dell'approvvigionamento di elettricità è prevalentemente o del tutto sotto controllo statale e la decisione di portare avanti un programma nucleare sarà presa direttamente dal Governo. In altri casi, il Governo dovrà lavorare a stretto contatto con gli attori coinvolti, sia del settore pubblico sia di quello privato, per garantire che i progetti avanzino senza ostacoli. Ciò richiederà l'istituzione degli adeguati quadri normativi e regolamentari (si veda in seguito), ma il Governo dovrà spesso assumere un ruolo più esteso.

## L'istituzione di quadri normativi e regolamentari

**Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:**

- Nei Paesi che hanno già predisposto programmi nucleari, i Governi dovrebbero fare in modo che il sistema legislativo e di controllo regolamentare relativo all'energia nucleare crei un opportuno equilibrio tra protezione della popolazione e dell'ambiente e nel contempo garantisca la certezza e la tempestività necessarie per le decisioni sugli investimenti.
- Nei Paesi che avviano nuovi programmi nucleari, i Governi dovrebbero rispettare la migliore prassi internazionale nell'elaborazione della legislazione necessaria in materia di energia nucleare e nell'istituzione degli organismi regolatori, affinché siano efficaci ed efficienti.
- I Governi dovrebbero per quanto possibile facilitare la costruzione di progetti standardizzati per centrali nucleari in tutto il mondo mediante l'armonizzazione dei requisiti normativi di progetto.

Ogni Paese che intenda avviare un programma nucleare dovrà disporre delle idonee strutture giuridiche relativamente alle questioni nucleari.

Ciò comporta l'istituzione di un sistema per la regolamentazione, la concessione di licenze e il monitoraggio delle attività e delle strutture nucleari, sotto il controllo di un'agenzia indipendente e dotata delle risorse necessarie. Altre disposizioni giuridiche necessarie comprendono la definizione delle responsabilità in materia di scorie radioattive e di smantellamento, l'istituzione di una disciplina della responsabilità civile (che per molti Paesi include l'adesione a convenzioni internazionali) e la creazione di un sistema per la protezione fisica e la registrazione dei materiali nucleari. Molti Paesi hanno approntato una specifica "legge sull'energia nucleare" che tratta tutti gli aspetti dell'utilizzo di questa fonte energetica.

Inoltre, nel caso dei progetti nucleari saranno applicabili anche le norme ambientali e locali di pianificazione del territorio, che devono funzionare in modo efficace. Per i Paesi con un sistema di Governo federale è opportuna una chiara suddivisione delle responsabilità tra il livello di Governo statale e quelli regionali, in modo da evitare la duplicazione degli adempimenti amministrativi.

Nei Paesi in cui vi sono già programmi nucleari e che hanno istituito sistemi normativi e regolamentari relativi all'energia nucleare, la principale questione da esaminare nel prevedere un'ulteriore espansione del settore dell'energia nucleare è quella dell'efficacia ed efficienza del sistema esistente. In alcuni casi, i meccanismi di concessione delle licenze e le relative procedure si sono dimostrati una fonte di inutili ritardi nella costruzione di centrali nucleari che potrebbero essere evitati con opportune riforme.

Negli Stati Uniti, ad esempio, dopo importanti riforme, la procedura di concessione delle licenze consta ora di una sola fase, con cui si ottiene una licenza combinata di costruzione ed esercizio. Esiste anche la possibilità di concedere licenze preventive, per modelli di impianti nucleari e per siti potenziali, indipendenti l'una dall'altra. Le prime richieste con questo nuovo sistema sono già state presentate e sono ora al vaglio della Nuclear Regulatory Commission. Altri Paesi con programmi nucleari già istituiti hanno parzialmente riformato il proprio sistema di concessione delle licenze, per tentare di ridurre potenziali ritardi.

Oltre ad accrescere l'efficacia delle strutture normative nazionali, la collaborazione internazionale potrebbe facilitare la concessione di licenze per progetti di nuovi reattori. Questo potrebbe rappresentare un importante fattore a sostegno dello sfruttamento dell'energia nucleare a livello mondiale, consentendo di replicare in Paesi diversi progetti standardizzati e consolidati, con il minimo di modifiche progettuali.

Il Multinational Design Evaluation Programme (MDEP) è un esempio di collaborazione internazionale in materia di regolamentazione nucleare. Si tratta di un'iniziativa intrapresa dagli enti nazionali di regolamentazione in materia nucleare di dieci Paesi,

con il supporto dell'AEN, allo scopo di rendere più efficace l'uso delle risorse e delle conoscenze da parte delle autorità preposte alla valutazione dei progetti di nuovi impianti nucleari (MDEP, 2009). L'obiettivo primario dell'impegno MDEP è attualmente quello di istituire prassi regolamentari di riferimento. Per ora MDEP non intende istituire normative comuni o impegni vincolanti tra i suoi membri.

Una significativa convergenza di pratiche normative e regolamentari del nucleare semplificherebbe la valutazione, dal punto di vista normativo, di progetti standardizzati di reattori e faciliterebbe la concessione di licenze nazionali per impianti importati. È probabile che tale armonizzazione richieda accordi intergovernativi e intese organizzative più strette. Lo scopo finale sarebbe quello di fare in modo che gli enti di regolamentazione nazionali accettino le conclusioni delle valutazioni dei progetti eseguite da altri enti di regolamentazione, senza dover ripetere il lavoro. Si tratta di un obiettivo ambizioso e il suo pieno raggiungimento potrebbe richiedere diversi anni. Se però entro il 2020 si ottenesse un livello efficace di armonizzazione, ciò potrebbe contribuire notevolmente alla rapida espansione dell'energia nucleare ipotizzata nello scenario BLUE Map.

I Paesi che attualmente non dispongono di infrastrutture normative e giuridiche che hanno in cantiere nuovi programmi nucleari hanno la possibilità di trarre insegnamento dalle migliori prassi internazionali. Dato che vi sono diversi approcci alla regolamentazione e alla legislazione in materia di energia nucleare tra i Paesi in cui il nucleare è già presente, i Paesi che scelgono questa fonte energetica hanno a volte adottato i principi generali del Paese da cui intendono acquistare la tecnologia nucleare. Ciò semplifica il processo di concessione delle licenze, in quanto all'impianto di riferimento normalmente è già stata concessa la licenza nel Paese d'origine, per cui un simile approccio normativo dovrebbe evitare la necessità di modifiche progettuali. Tuttavia, in mancanza di una più ampia armonizzazione a livello internazionale, ciò potrebbe rendere più difficile l'utilizzo futuro di fornitori alternativi.

Codici e standard riconosciuti a livello internazionale sulla sicurezza nucleare sono altrettanto importanti per la diffusione delle prassi migliori. L'AIEA promuove un regime di sicurezza globale, che riguarda gli impianti nucleari, il ciclo del combustibile e le scorie radioattive, consolidato da numerose convenzioni e codici di condotta internazionali. Questi comprendono la Convenzione sulla Sicurezza Nucleare, che stabilisce indici di riferimento che i Paesi partecipanti possono sottoscrivere. La Direttiva Europea sulla Sicurezza Nucleare trasferisce i valori di tale convenzione nel diritto comunitario.

## Il finanziamento di nuovi impianti nucleari

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- I Governi dovrebbero fare in modo che la struttura dei mercati dell'elettricità e, ove appropriato, i mercati delle emissioni sostengano investimenti ampi e a lungo termine necessari per le centrali nucleari, dando le sufficienti garanzie su un adeguato ritorno d'investimento.
- I Governi dovrebbero incoraggiare gli investimenti in fonti di elettricità a basso tenore di carbonio, compresa nuova capacità nucleare, attraverso politiche e provvedimenti mirati a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>, quali programmi di scambio di quote di emissioni di carbonio, carbon tax o dando mandato alle aziende di pubblica utilità di utilizzare fonti a basso tenore di carbonio.
- I Governi dovrebbero considerare delle forme di sostegno o garanzia per gli investimenti del settore privato in nuove centrali nucleari, dove il rapporto rischio-rendimento farebbe altrimenti desistere i potenziali investitori, poiché le centrali nucleari richiedono investimenti ingenti con un recupero a lungo termine.
- La comunità finanziaria internazionale dovrebbe accrescere la propria facoltà di valutare i rischi d'investimento connessi ai progetti per l'energia nucleare, sviluppare appropriate strutture finanziarie e fornire idonee condizioni finanziarie per gli investimenti nucleari.

L'investimento totale stimato necessario a livello mondiale per i prossimi quarant'anni per espandere la capacità nucleare in linea con lo scenario BLUE Map è, sulla base dei presupposti del modello ETP dell'AIE, pari a circa 4 trilioni di USD (Tabella 6). Questo costituisce circa il 18% del totale stimato dell'investimento in capacità per la generazione di elettricità in BLUE Map di 22 trilioni di dollari nel periodo.

Un importante, recente studio dell'AIE e dell'AEN sulle previsioni dei costi per la generazione di elettricità in circa 200 centrali proposte in 17 Paesi dell'OCSE e in 4 Paesi non OCSE, il cui collaudo è previsto per il 2015, ha rivelato che l'elettricità nucleare è

in generale competitiva rispetto ad altre opzioni di generazione in termini di costi, considerati per l'intero ciclo di vita (AIE/AEN, 2010). Ciononostante, si prevede che in molti casi il finanziamento per la costruzione di nuove centrali nucleari sarà difficile, specialmente nel contesto dei mercati in cui l'energia è stata liberalizzata (NEA, 2009).

Ciò è dovuto a diversi fattori speciali che incidono sui rischi finanziari dei progetti nucleari percepiti dai potenziali investitori, tra cui:

- gli elevati investimenti finanziari e la complessità tecnica delle centrali nucleari, che presentano rischi sia durante la realizzazione, sia durante il funzionamento;
- il periodo relativamente lungo necessario per recuperare gli investimenti o rimborsare i prestiti, che aumenta il rischio legato alle incertezze del mercato dell'energia e del carbonio;
- la natura spesso controversa dei progetti nucleari, che origina ulteriori rischi di natura politica e normativa.

La chiave per un finanziamento di successo delle centrali nucleari, così come per altri grandi progetti infrastrutturali, è innanzitutto la riduzione al minimo dei rischi finanziari e successivamente la predisposizione dei progetti utilizzando i modelli contrattuali e proprietari più adeguati, in modo tale che i rischi rimanenti siano condivisi tra le parti interessate. Con il nucleare, i Governi svolgeranno un ruolo importante, almeno nella prima di queste fasi.

Lo snellimento dei regimi normativi, affinché funzionino in modo efficace ed efficiente, contribuirà alla riduzione dei rischi finanziari. Altre iniziative che solo i Governi possono intraprendere comprendono la creazione di accordi istituzionali e finanziari per la gestione e lo smaltimento delle scorie radioattive e per l'eventuale smantellamento delle centrali nucleari. Inoltre, i Governi dovranno garantire che gli accordi stretti nel mercato dell'elettricità forniscano sufficiente fiducia agli investitori sul fatto che i livelli di prezzo a lungo termine consentiranno un adeguato rendimento del capitale investito. I prezzi regolamentati dell'elettricità in alcuni mercati favoriranno il mantenimento di tale fiducia, ma, nei mercati liberalizzati, i rischi connessi ai prezzi saranno, di norma, maggiori. Anche gli incentivi per l'investimento in fonti energetiche a basso contenuto di carbonio, quali schemi per lo scambio di emissioni di carbonio, carbon tax o contratti a lungo termine a prezzi minimi, potrebbero incoraggiare gli investimenti nel nucleare.

L'elevato costo di investimento in una centrale nucleare comporta che gli aspetti economici e la fattibilità del suo finanziamento dipendano in larga misura dal costo del capitale (essenzialmente,

**Tabella 6. Stime del modello ETP dell'AIE per l'investimento in energia nucleare nello scenario BLUE Map per regione/Paese e decennio (USD costante 2008)**

Regione/Paese	Investimento necessario previsto (miliardi di USD)			
	2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Stati Uniti & Canada	75	342	243	224
OCSE Europa	60	333	105	88
OCSE Pacifico	68	296	153	97
Cina	57	193	295	350
India	9	57	91	230
America Latina	11	30	36	39
Altri Paesi asiatici in via di sviluppo	5	39	24	39
Economie in transizione	55	156	80	39
Africa e Medio Oriente	2	23	18	12
<b>Mondo</b>	<b>342</b>	<b>1 469</b>	<b>1 045</b>	<b>1 118</b>

Fonte: IEA, 2010.

il tasso di interesse sui prestiti e/o il tasso di rendimento del capitale investito). Una volta istituite politiche e misure di sostegno, in alcuni Paesi vi sono aziende elettriche di pubblica utilità molto grandi e ben capitalizzate in grado di finanziare la costruzione di centrali nucleari, almeno per quanto riguarda un limitato numero di centrali. Alcune di queste sono a partecipazione statale totale o parziale, mentre altre sono verticalmente integrate (con accesso diretto ai consumatori di elettricità), situazione che dovrebbe aiutare a ridurre i loro costi d'investimento. In una certa misura, le aziende di pubblica utilità potrebbero essere in grado di condividere i rischi con fornitori delle centrali nucleari e altri appaltatori, nonché con altri investitori (comprese banche e fondi d'investimento). Tuttavia, almeno per il momento, nulla lascia presagire che questi ultimi nutrano un grande interesse nei confronti degli investimenti nucleari.

In situazioni in cui le aziende di pubblica utilità non dispongano di sufficienti capitali e/o i mercati dell'energia siano più competitivi, alcuni Governi possono prendere in considerazione il sostegno diretto agli investimenti nell'energia nucleare, per incentivare la realizzazione di nuovi impianti nucleari, attraverso la diminuzione del costo del capitale. Un esempio è il programma di prestito garantito adottato negli Stati Uniti, che potrebbe fornire oltre 50 miliardi di dollari in garanzie per sostenere la costruzione di nuove centrali nei prossimi anni. Altre misure a favore del finanziamento al nucleare potrebbero prevedere

crediti governativi all'esportazione, prezzi minimi garantiti, prezzi del carbonio minimi garantiti o contratti di acquisto dell'elettricità a lungo termine. In alcuni Paesi, un sostegno importante potrebbe essere offerto dalle banche e dalle agenzie per lo sviluppo multilaterale.

A partire dal 2020, a condizione che la realizzazione e la messa in funzione delle prime centrali di terza generazione attualmente in costruzione e i progetti che seguiranno immediatamente diano buoni frutti, il finanziamento per il nucleare da parte del settore privato dovrebbe diventare più accessibile. Certamente, un tale sviluppo sarà necessario per dar luogo agli investimenti nel nucleare previsti dallo scenario BLUE Map. Al contempo, le banche e altri istituti finanziari dovranno sviluppare adeguate competenze per poter valutare correttamente i rischi del finanziamento al nucleare, studiando progetti tempestivi e prevedendo una partecipazione seppure limitata nel corso del prossimo decennio.

A lungo termine, sarà auspicabile la creazione di condizioni idonee per lo sviluppo di tutte le tecnologie per la produzione di energia a basso contenuto di carbonio, man mano che tali tecnologie saranno più mature e faranno meno affidamento sul supporto mirato dei Governi. Ciò garantirà l'adozione delle opzioni più vantaggiose in termini di costi per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> in ciascun Paese e regione, al maggior livello possibile.

## Il coinvolgimento della società civile

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- I Governi dovrebbero favorire il dialogo con le parti interessate e con i cittadini per illustrare il ruolo dell'energia nucleare nella strategia nazionale per l'energia, cercando di suscitare il sostegno dei cittadini attraverso il coinvolgimento della società civile nel processo decisionale.

L'introduzione dell'energia nucleare o l'espansione del suo ruolo richiedono il sostegno da parte di tutte le parti interessate della società civile, compreso il grande pubblico, in base a una valutazione razionale dei rischi e dei vantaggi. Sebbene le preoccupazioni circa la sicurezza energetica e la minaccia del cambiamento climatico globale abbiano suscitato negli anni recenti la consapevolezza pubblica dei vantaggi dell'energia nucleare, in molti Paesi sono ancora numerosi i fattori che continuano a minare il sostegno pubblico. Tra questi vi sono le preoccupazioni circa la sicurezza del nucleare, la gestione e lo smaltimento delle scorie radioattive e la potenziale proliferazione delle armi nucleari. La società civile è spesso restia ad accettare l'energia nucleare, soprattutto perché i suoi vantaggi non sono considerati tali da compensare gli aspetti negativi.

La creazione di canali di comunicazione con tutte le parti interessate è un passo necessario per promuovere una migliore comprensione dei rischi e dei vantaggi dell'energia nucleare, nonché del ruolo che potrà svolgere accanto ad altre opzioni per la produzione di energia. Oltre alla fornitura d'informazioni, tuttavia, la società civile dovrebbe essere coinvolta in un processo politico volto a decidere il futuro dei programmi per l'energia nucleare, nel contesto di una strategia nazionale globale per realizzare gli obiettivi politici relativi ad energia e ambiente. Un maggiore coinvolgimento pubblico nel delineare il futuro dell'energia nucleare è essenziale per costruire la fiducia e garantire un ampio consenso sociale.

Oltre alle centrali nucleari stesse, anche l'individuazione di siti per il ciclo del combustibile può generare preoccupazioni e opposizione. In particolare, l'individuazione di impianti per lo stoccaggio e lo smaltimento delle scorie radioattive è stata spesso oggetto di aspre controversie. In diversi Paesi, si è reso necessario ritirare le proposte per tali strutture dinanzi all'opposizione pubblica.

Si è appreso parecchio da queste battute d'arresto e le aziende per la gestione delle scorie radioattive

nella maggior parte dei Paesi stanno attualmente compiendo maggiori sforzi per coinvolgere le comunità locali. In alcuni casi, in particolare in Finlandia e Svezia, tale approccio ha generato grandi progressi verso l'attuazione di piani per lo smaltimento delle scorie radioattive.

Altri Paesi dovrebbero adottare simili approcci, nel tentativo di progredire nello smaltimento delle scorie radioattive.

## La capacità di costruzione nei Paesi che pianificano un programma nucleare

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- La comunità internazionale dovrebbe continuare a rafforzare la cooperazione per la realizzazione di apposite istituzioni nei Paesi che intendono dar vita a nuovi programmi nucleari.
- Per i Paesi privi di industria nucleare, i Governi dovrebbero fornire supporto all'industria nazionale nello sviluppo delle capacità e delle competenze necessarie per partecipare efficacemente, come subappaltatori e fornitori di componenti, a progetti di costruzione di centrali nucleari, sia nel proprio Paese sia all'estero.

Se l'energia nucleare è destinata a svolgere un ruolo di maggior rilievo nel panorama degli approvvigionamenti energetici a livello mondiale, programmi per l'energia nucleare dovranno essere attuati in un numero crescente di Paesi di nuova industrializzazione, quelli nei quali si verificherà l'aumento maggiore della domanda di energia e di elettricità. La realizzazione e la messa in funzione di centrali nucleari in tali Paesi richiederà il trasferimento della tecnologia e l'aumento di capacità.

Le politiche dei Paesi dell'OCSE e di altri Paesi con programmi nucleari già avviati in merito alla cooperazione tecnica e all'assistenza nel settore nucleare saranno decisive a questo proposito. Nei Paesi che hanno intrapreso programmi per l'energia nucleare, è fondamentale verificare il corretto funzionamento del quadro normativo e delle infrastrutture legali necessarie prima di realizzare e commissionare le prime unità. I Paesi che si affacciano al nucleare devono anche sviluppare una "cultura della sicurezza" tra soggetti interessati, compresi gli appaltatori, subappaltatori e operatori oltre che i legislatori. Chiaramente, i Paesi coinvolti nell'esportazione di centrali nucleari ai nuovi Paesi

nucleari avranno la responsabilità di aiutarli a sviluppare l'infrastruttura giuridica e le competenze necessarie.

Sarà importante anche il ruolo svolto da una maggiore cooperazione internazionale, che comprenderà anche le agenzie intergovernative. L'AIEA in particolare ha messo a punto una serie di linee guida per aiutare i propri Stati membri che desiderano intraprendere programmi per l'energia nucleare, sulla base di una serie di obiettivi intermedi per lo sviluppo di una infrastruttura nazionale (AIEA, 2007). Attualmente l'Agenzia sta lavorando con più di 30 Paesi membri che stanno considerando la futura adozione di un programma nucleare.

Per molti Paesi in procinto di avviare un programma nucleare, lo sviluppo delle industrie locali e di istituti di ricerca sarà un fattore di grande attenzione. In quanto tali, i requisiti a contenuto locale saranno spesso parte del processo di gara d'appalto e di negoziazione dei contratti con i fornitori nucleari (che possono costituire dei consorzi con i partner locali). Gli obiettivi possono variare dalla creazione nel tempo di un'industria nucleare domestica su larga scala, al coinvolgimento delle industrie locali attive nel settore dell'ingegneria in qualità di subappaltatori per servizi e componenti da costruzione.

Una volta messe in funzione le centrali nucleari, alcuni servizi di assistenza e manutenzione possono anche essere forniti localmente. Oltre a ridurre i costi di importazione degli impianti nucleari, il coinvolgimento di partner locali può fungere da stimolo per lo sviluppo del settore ad alto contenuto tecnologico. Favorirebbe anche l'ampliamento della catena globale di approvvigionamento, in quanto, in un secondo momento, le industrie potrebbero diventare esportatrici.

## La non proliferazione, la protezione fisica e la sicurezza dell'approvvigionamento di combustibile nucleare

### Il presente programma di sviluppo raccomanda quanto segue:

- La comunità internazionale dovrebbe mantenere e rafforzare ove necessario la cooperazione per la non proliferazione e per le normative sul nucleare, la protezione fisica delle strutture e dei materiali nucleari e la sicurezza dell'approvvigionamento di combustibile nucleare.

Alcune tecnologie nucleari e alcuni materiali presentano il rischio potenziale di essere utilizzati per scopi non pacifici. Il trattato di Non Proliferazione Nucleare (NPT) del 1968 costituisce una pietra miliare dell'impegno internazionale per contrastare questa minaccia. Inoltre, il Nuclear Suppliers

Group, un'associazione informale tra 46 Paesi, ha elaborato alcune linee guida per il trasferimento delle apparecchiature nucleari, dei materiali e della tecnologia tra Paesi.

La grande maggioranza dei Paesi aderisce all'NPT, che richiede loro di sottoporsi alle ispezioni dei propri impianti nucleari condotte dall'AIEA. Tuttavia, molti Paesi non hanno ancora adottato il protocollo aggiuntivo del 1997 che attribuisce all'AIEA maggiori diritti per ispezionare i siti e ottenere informazioni. In un ridotto numero di casi i controlli esistenti sulla non proliferazione non hanno impedito la diffusione di tecnologie sensibili e alcuni Paesi sono rimasti al di fuori di tali controlli, tra cui quei pochi con attività nucleari significative. Soprattutto se l'energia nucleare è destinata a svolgere un ruolo molto più centrale e ad essere utilizzata in un maggiore numero di Paesi, sarà necessario effettuare controlli appropriati sulla non proliferazione.

Alcuni Paesi sono preoccupati dal fatto che maggiori controlli sulla non proliferazione possano limitare la loro capacità di sviluppare impianti propri per il ciclo del combustibile nucleare, soprattutto quelli per l'arricchimento dell'uranio e il riprocessamento del combustibile esaurito che utilizzano tecnologie più delicate. Ciò potrebbe limitare la loro indipendenza energetica se fanno ampio affidamento sull'energia nucleare. Di conseguenza, l'impegno attualmente profuso è concentrato sul rafforzamento degli aspetti di sicurezza di approvvigionamento di combustibile nucleare per i Paesi che utilizzano o prevedono di utilizzare energia nucleare con buone credenziali di non proliferazione, eliminando per loro l'incentivo a sviluppare impianti nazionali propri per l'arricchimento e/o il riprocessamento.

Numerosi progetti e proposte internazionali volti a raggiungere questo equilibrio sono stati promossi da singoli Paesi o gruppi di Paesi e sono attualmente in fase di esame da parte dell'AIEA. Comprendono misure quali la creazione di una o più banche per il combustibile nucleare (scorte di uranio arricchito) sotto il controllo dell'AIEA, o la creazione di impianti multilaterali per il ciclo del combustibile. Un accordo per l'istituzione della prima banca di combustibile dell'AIEA, che sarà ospitata in territorio russo, è stato firmato a marzo 2010. La Russia sta anche promovendo uno dei propri siti di arricchimento come centro multilaterale per il ciclo del combustibile. Tuttavia, non è ancora chiaro se tali iniziative saranno ampiamente accettate e se potranno essere attuate su larga scala.

La tutela fisica e la contabilità dei materiali nucleari sono innanzitutto responsabilità di ciascuno Stato che si avvale della tecnologia nucleare. Come enunciato più sopra, occorre definire talune disposizioni istituzionali e legali idonee prima che possano avere inizio attività nucleari. Tuttavia, con l'accentuarsi delle preoccupazioni legate al terrorismo, la sicurezza dei materiali nucleari è diventata un problema per la comunità internazionale. La cooperazione internazionale sarà necessaria per diffondere le migliori prassi e fornire certezza circa la sicurezza di tutti i materiali nucleari.

# Piano d'azione del programma di sviluppo

Questa sezione riepiloga le azioni identificate nel presente programma di sviluppo necessarie per raggiungere la capacità nucleare prefissata nello scenario BLUE Map dell'ETP. Sono riportate per indicare i soggetti interessati con le maggiori responsabilità di attuazione. Le tempistiche fornite sono approssimative e variano da paese a paese. In

particolare, i Paesi che non hanno un programma nucleare dovranno compiere ulteriori passi riguardo alla loro capacità e alla creazione di nuove istituzioni e ciò potrebbe richiedere più tempo. Occorre notare che queste azioni si riferiscono solo ai Paesi in cui è già stata presa la decisione di avviare un programma nucleare.

## Azioni ad opera dei Governi e di altri enti pubblici

Politiche di sostegno	Obiettivi intermedi e figure coinvolte
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fornire un sostegno politico chiaro e forte a un programma per l'energia nucleare, nel quadro di una strategia nazionale che affronti gli obiettivi della politica energetica e ambientale.</li> </ul>	<p>Già stabiliti in molti dei principali Paesi; per gli altri Paesi che perseguono un programma nucleare, entro il 2015.</p> <p>Capi di Governo, Ministeri dell'energia/ambiente.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Comunicare con le parti interessate e con il pubblico per illustrare il ruolo dell'energia nucleare nella strategia energetica nazionale, cercando di costruire il consenso pubblico attraverso il coinvolgimento nel processo decisionale.</li> </ul>	<p>In corso, via via che i programmi nucleari sono lanciati o riattivati.</p> <p>Leader politici, Ministeri dell'energia.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Collaborare con le aziende elettriche per garantire un approccio coordinato volto a superare gli ostacoli allo sviluppo nucleare, specialmente dove l'energia nucleare è utilizzata per la prima volta o dopo un lungo periodo d'inattività della produzione nucleare.</li> </ul>	<p>In corso, via via che i programmi nucleari sono lanciati o riattivati.</p> <p>Ministeri dell'energia/industria.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Dato che le centrali nucleari richiedono ingenti investimenti con lunghi periodi di recupero dei medesimi, occorre considerare l'ipotesi di fornire alcune forme di supporto o garanzie governative per l'investimento dal settore privato in nuove centrali nucleari, dove il rapporto rischio-rendimento potrebbe altrimenti scoraggiare i potenziali investitori.</li> </ul>	<p>Per i Paesi interessati, entro il 2015.</p> <p>Ministeri dell'energia/finanze.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Incoraggiare gli investimenti in fonti elettriche a basso tenore di carbonio, compresa una nuova capacità nucleare, attraverso politiche e provvedimenti mirati a ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>, quali programmi di scambio di quote di emissioni di carbonio o carbon tax; imporre alle aziende di pubblica utilità di utilizzare fonti a basso tenore di carbonio. La finalità ultima sarebbe quella di incoraggiare le riduzioni di emissioni più convenienti in termini di costi mediante provvedimenti neutri dal punto di vista delle tecnologie.</li> </ul>	<p>Per i Paesi che perseguono un programma nucleare, entro il 2015-20.</p> <p>Ministeri dell'energia/ambiente, legislatori.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Elaborazione di politiche e provvedimenti volti a garantire un adeguato finanziamento a lungo termine per la gestione e lo smaltimento delle scorie radioattive e per lo smantellamento; istituzione del necessario quadro giuridico e organizzativo per lo sviluppo e l'attuazione tempestiva di piani per la gestione e lo smaltimento delle scorie radioattive.</li> </ul>	<p>Attuati in molti Paesi che utilizzano l'energia nucleare; per gli altri Paesi che perseguono un programma nucleare, prima del funzionamento dei reattori, entro il 2015-20.</p> <p>Ministeri dell'energia/ambiente, legislatori.</p>

<b>Strutture giuridiche e normative</b>	<b>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Per i Paesi che già dispongono di programmi nucleari, fare in modo che il sistema legislativo e di controllo regolamentare relativo all'energia nucleare assicuri un opportuno equilibrio tra protezione della popolazione e dell'ambiente e garantisca nel contempo la certezza e la tempestività richieste per le decisioni sugli investimenti, apportando eventuali riforme. Ove applicabile, questo si dovrebbe estendere agli impianti per l'estrazione di uranio e del ciclo del combustibile nucleare.</li> </ul>	<p>Riforme introdotte in alcuni Paesi; altri potrebbero seguire entro il 2015.</p> <p>Uffici giuridici/per l'energia, legislatori, enti di regolamentazione sul nucleare.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Per i Paesi che avviano nuovi programmi nucleari, rispettare le migliori prassi internazionali nell'elaborazione della legislazione necessaria in materia di energia nucleare e nell'istituzione degli organismi regolatori, affinché siano efficaci ed efficienti.</li> </ul>	<p>Per i Paesi interessati, entro il 2015-20.</p> <p>Uffici giuridici/per l'energia, legislatori, enti di regolamentazione sul nucleare.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fare in modo che la struttura dei mercati dell'elettricità, e, ove appropriato, dei mercati delle emissioni, sostenga investimenti ampi e a lungo termine richiesti nelle centrali nucleari, dando le sufficienti garanzie che le entrate realizzate forniscano un adeguato ritorno sull'investimento.</li> </ul>	<p>All'avvio dei programmi nucleari, intorno al 2015-20.</p> <p>Uffici giuridici/per l'energia, legislatori, enti di regolamentazione del mercato.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Per quanto possibile, facilitare la costruzione di modelli standardizzati per impianti nucleari in tutto il mondo mediante l'armonizzazione dei requisiti normativi di progetto. In particolare, i Paesi che introducono nuovi programmi nucleari dovrebbero evitare di imporre requisiti a sé.</li> </ul>	<p>Requisiti comuni dovrebbero essere stabiliti dal 2020.</p> <p>Uffici giuridici/per l'energia, legislatori, enti di regolamentazione sul nucleare.</p>

<b>Sviluppo industriale, istruzione e formazione</b>	<b>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Per i Paesi che avviano o riattivano programmi nucleari, fare in modo che risorse umane adeguatamente qualificate e specializzate siano disponibili per soddisfare le esigenze poste dal programma nucleare, a livello di Governo, aziende di pubblica utilità del settore elettrico, industria ed enti di regolamentazione. I Paesi con le principali industrie nucleari avranno bisogno di risorse umane sufficienti per promuovere le esportazioni di energia nucleare.</li> </ul>	<p>Azione entro il 2015 per assicurare un aumento significativo prima del 2020.</p> <p>Ministeri dell'Istruzione, dell'Università, del Lavoro.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Per i Paesi privi di industria nucleare, fornire supporto all'industria nazionale nello sviluppo delle capacità e delle competenze necessarie per partecipare efficacemente, come subappaltatori e fornitori di componenti, a progetti di costruzione di centrali nucleari, sia nel proprio Paese sia all'estero. Data la natura globale delle catene di fornitura per la costruzione di impianti nucleari, in quasi tutti i Paesi sarà necessaria la partecipazione di fornitori esteri.</li> </ul>	<p>Per i Paesi interessati, entro il 2015-20.</p> <p>Ministeri dell'energia/industria.</p>

<b>Sviluppo e sfruttamento della tecnologia</b>	<b>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Sviluppare ove necessario e implementare programmi per la gestione a lungo termine e lo smaltimento di tutti i tipi di scorie radioattive, in particolare per la realizzazione e la conduzione di depositi geologici per il combustibile esaurito e scorie ad alta attività. Ciò include il supporto alle necessarie attività di RS&amp;D.</li> </ul>	<p>I primi depositi saranno in attività entro il 2020 e gli altri principali Paesi con programmi nucleari seguiranno prima del 2030.</p> <p>Ministeri dell'energia/ambiente, autorità e agenzie di gestione delle scorie radioattive, soggetti che generano le scorie.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Continuare a sostenere RS&amp;D in materia di tecnologia nucleare avanzata (reattori e cicli del combustibile) per sfruttarne il potenziale a lungo termine di fornire energia sostenibile a parametri economici migliori, con incremento della sicurezza e dell'affidabilità e con maggiore resistenza alla proliferazione e protezione fisica.</li> </ul>	<p>Dimostrare i sistemi più promettenti di generazione nucleare di nuova generazione entro il 2030, con piena commercializzazione dopo il 2040.</p> <p>Uffici per l'energia/la ricerca, istituti per la ricerca nucleare.</p>

## Azioni ad opera delle industrie nucleari e fornitrici di elettricità

<b>Gestione del parco nucleare esistente</b>	<b>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Parallelamente alla conduzione continuata delle centrali nucleari esistenti secondo criteri di sicurezza ed efficienza economica, investire, ove fattibile, nell'adeguamento e preparazione a un prolungamento della durata del loro ciclo di vita. A tal fine, accertarsi che gli insegnamenti tratti dall'esperienza maturata siano ampiamente diffusi a tutti gli operatori delle centrali nucleari.</li> </ul>	<p>In via di sviluppo, con notevoli investimenti richiesti entro il 2015.</p> <p>Aziende di pubblica utilità del settore elettrico, fornitori nucleari.</p>
<b>Implementare nuova capacità nucleare entro il 2020</b>	<b>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Rendere pienamente effettivi i modelli più recenti di impianti nucleari costruendo centrali di riferimento in pochi Paesi nel mondo, per perfezionare il progetto di base ed eventuali varianti regionali; consolidare catene di approvvigionamento e competenze a livello globale.</li> </ul>	<p>Diversi nuovi modelli attualmente in fase di realizzazione saranno in esercizio entro il 2015; altri seguiranno nei prossimi anni.</p> <p>Fornitori nucleari, industrie della catena di approvvigionamento, aziende di pubblica utilità del settore elettrico.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Continuare a dimostrare che questi nuovi modelli possono essere costruiti nel rispetto dei tempi e dei costi previsti, tendendo costantemente alla riduzione dei tempi di costruzione e al controllo dei costi usando per quanto possibile modelli standardizzati, perfezionando il processo costruttivo e rafforzando ulteriormente le catene di approvvigionamento.</li> </ul>	<p>Dimostrare la possibilità di realizzare modelli standardizzati nel rispetto dei tempi e dei costi entro il 2020.</p> <p>Fornitori nucleari, industrie della catena di approvvigionamento, aziende di pubblica utilità del settore elettrico.</p>

<b>Sviluppo delle competenze per una rapida espansione dopo il 2020</b>	<b>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Investire nello sviluppo delle capacità industriali nel settore nucleare e nei settori ingegneristici collegati a livello mondiale, per incrementare il potenziale globale di realizzare centrali nucleari, e ampliare le catene di approvvigionamento mantenendo al contempo gli elevati standard di qualità e sicurezza richiesti. Sarà necessario un corrispondente aumento di risorse umane qualificate.</li> </ul>	<p>Notevoli investimenti necessari entro il 2015 se la capacità globale deve raddoppiare rispetto ai livelli attuali entro il 2020.</p> <p>Fornitori nucleari, industrie della catena di approvvigionamento, banche e altri investitori.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Espandere la produzione di uranio e la capacità degli impianti per il ciclo del combustibile in linea con l'aumento della potenza di generazione nucleare, compresa lo sfruttamento di tecnologie avanzate più efficienti ove disponibili.</li> </ul>	<p>Una notevole espansione della capacità è necessaria entro il 2015-20 e oltre.</p> <p>Fornitori di combustibile nucleare, banche e altri investitori.</p>

<b>Sviluppo e sfruttamento della tecnologia</b>	<b>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Contemporaneamente allo sfruttamento dei vantaggi che derivano dalla replicazione, per quanto possibile, di modelli standardizzati, proseguire lo sviluppo evolutivo di progetti di reattori e per il combustibile nucleare, per sfruttare l'esperienza acquisita con la costruzione di impianti di riferimento e gli avanzamenti tecnologici, affinché l'energia nucleare resti competitiva.</li> </ul>	<p>Gli insegnamenti tratti dagli impianti di riferimento saranno disponibili dal 2015; variazioni significative dei modelli standard improbabili prima del 2020.</p> <p>Fornitori nucleari, aziende di pubblica utilità del settore elettrico.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>In collaborazione con gli istituti di ricerca sul nucleare, partecipare allo sviluppo dei sistemi nucleari di prossima generazione (reattori e cicli del combustibile), affinché i progetti scelti per la dimostrazione siano quelli più idonei per la commercializzazione definitiva.</li> </ul>	<p>Dimostrare i sistemi più promettenti entro il 2030, con piena commercializzazione dopo il 2040.</p> <p>Fornitori nucleari, aziende di pubblica utilità del settore elettrico.</p>

## Azioni ad opera di altre parti interessate

<b>Finanziamento di centrali nucleari</b>	<b>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Accrescere la capacità, da parte della comunità finanziaria globale, di valutare i rischi d'investimento connessi ai progetti per l'energia nucleare, di sviluppare le appropriate strutture finanziarie e di fornire idonee condizioni finanziarie per investimenti nucleari. Partecipare al finanziamento dei progetti iniziali di costruzione d'impianti nucleari contribuirà al rafforzamento delle competenze nucleari nel settore finanziario.</li> </ul>	<p>Sviluppare maggiori competenze partecipando a progetti nucleari entro il 2020. Aumentare la disponibilità di finanziamenti provenienti dal settore privato dopo il 2020.</p> <p>Banche e aziende di servizi finanziari, agenzie di credito all'esportazione, banche/agenzie multilaterali di sviluppo.</p>

<b><i>Collaborazione internazionale</i></b>	<b><i>Obiettivi intermedi e figure coinvolte</i></b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantenere, e se necessario rafforzare, la collaborazione internazionale su temi quali la costituzione di istituzioni (institution-building) nei Paesi che stanno pianificando nuovi programmi nucleari, l'armonizzazione dei requisiti normativi, la gestione e lo smaltimento delle scorie radioattive, lo sviluppo di tecnologie avanzate per i reattori nucleari e per il ciclo del combustibile, la non proliferazione e la legislazione in campo nucleare, la protezione fisica delle strutture e dei materiali nucleari, la sicurezza dell'approvvigionamento di combustibile nucleare.</li> </ul>	<p>Le questioni importanti devono essere trattate entro il periodo 2015-20, se si mira a uno sviluppo sufficientemente ampio del nucleare dopo il 2020.</p> <p>Agenzie intergovernative dell'energia e dell'energia nucleare (in particolare l'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica, e l'Agenzia per l'Energia Nucleare dell'OCSE), organizzazioni internazionali non governative politiche e dell'industria.</p>



## Riferimenti bibliografici

- AEN, 2008 *Nuclear Energy Outlook*. [Prospettive dell'energia nucleare]  
Agenzia per l'Energia Nucleare dell'OCSE, Parigi, 2008.
- AEN, 2009 *The Financing of Nuclear Power Plants*. [Il finanziamento delle centrali nucleari]  
Agenzia per l'Energia Nucleare dell'OCSE, Parigi, 2009.
- AEN, 2010 *Uranium 2009: Resources, Production and Demand*.  
[Uranio 2009: risorse, produzione e domanda]  
Agenzia per l'Energia Nucleare dell'OCSE (in collaborazione con l'Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica), Parigi, 2010 (pubblicazione imminente).
- AIEA PRIS *Power Reactor Information System database*.  
[Banca dati del sistema informativo sui reattori nucleari]  
Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica, Vienna.  
Disponibile a questo indirizzo: [www.iaea.org/programmes/a2/index.html](http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html)
- AIEA, 2007 *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*.  
[Obiettivi intermedi nello sviluppo di un'infrastruttura nazionale per l'energia nucleare]  
Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica, Vienna, 2007.
- AIE, 2009 *World Energy Outlook*. Agenzia Internazionale dell'Energia, Parigi 2009.
- AIE, 2010 *Energy Technology Perspectives*. Agenzia Internazionale dell'Energia, Parigi 2010 (imminente).
- AIE/AEN, 2010 *Projected Costs of Generating Electricity, 2010 Edition*.  
[Proiezione dei costi di generazione elettrica, edizione 2010]  
Agenzia Internazionale dell'Energia e OECD Agenzia per l'Energia Nucleare dell'OCSE,  
Parigi, 2010.
- GIF, 2002 *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*.  
[Un programma di sviluppo tecnologico per i sistemi nucleari di quarta generazione]  
Generation IV International Forum (GIF), 2002.  
Disponibile a questo indirizzo: [www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm](http://www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm)
- GIF, 2009 *Proceedings of the GIF Symposium, Paris, 9-10 September 2009*. Generation IV  
International Forum (GIF), 2009.  
Disponibile a questo indirizzo: [www.gen-4.org/GIF/About/index.htm](http://www.gen-4.org/GIF/About/index.htm)
- MDEP, 2009 *Multinational Design Evaluation Programme Annual Report 2009*.  
[Programma multinazionale di valutazione dei progetti. Rapporto annuale 2009]  
Disponibile a questo indirizzo: [www.nea.fr/mdep/](http://www.nea.fr/mdep/)
- WNA, 2009 *The Global Nuclear Fuel Market, Supply and Demand 2009-2030*.  
[Il mercato globale del combustibile nucleare: domanda e offerta 2009-2030]  
World Nuclear Association, Londra, 2009.



International  
Energy Agency

# Online bookshop

Buy IEA publications  
online:

**[www.iea.org/books](http://www.iea.org/books)**

PDF versions available  
at 20% discount

Books published before January 2009  
- except statistics publications -  
are freely available in pdf

International Energy Agency • 9 rue de la Fédération • 75739 Paris Cedex 15, France

**iea**

Tel: +33 (0)1 40 57 66 90

E-mail:  
**[books@iea.org](mailto:books@iea.org)**

## AGENZIA INTERNAZIONALE DELL'ENERGIA

L'Agenzia Internazionale dell'Energia (AIE), organismo indipendente, è stata fondata nel novembre 1974. Il suo compito è duplice: promuovere la sicurezza energetica nei Paesi membri mediante una risposta comune alle perturbazioni nell'approvvigionamento di petrolio e fornire consulenza ai Paesi membri sulle politiche energetiche più valide.

L'AIE realizza un vasto programma di collaborazione in campo energetico tra 28 economie avanzate, ciascuna delle quali è tenuta a conservare scorte di petrolio equivalenti a 90 giorni delle sue importazioni nette.

Gli obiettivi dell'Agenzia sono i seguenti:

- Garantire l'accesso dei Paesi membri a fonti affidabili e abbondanti di tutte le forme di energia; in particolare, mediante la messa in atto di meccanismi di risposta efficaci in caso di perturbazioni nell'approvvigionamento di petrolio.
- Promuovere politiche energetiche sostenibili che stimolino la crescita economica e la protezione ambientale in un contesto globale, in particolare in termini di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra che contribuiscono al cambiamento climatico.
- Aumentare la trasparenza dei mercati internazionali mediante la raccolta e l'analisi di dati sull'energia.
- Sostenere la collaborazione a livello mondiale sulle tecnologie energetiche per garantire l'approvvigionamento futuro di energia e mitigarne l'impatto ambientale, mediante il miglioramento dell'efficienza energetica e lo sviluppo e lo sfruttamento di tecnologie a basso contenuto di carbonio.
- Individuare soluzioni alle sfide energetiche globali tramite l'impegno e il dialogo con i Paesi non membri, l'industria, le organizzazioni internazionali e le altre parti interessate.

I Paesi membri dell'AIE sono: Australia, Austria, Belgio, Canada, Corea, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Italia, Giappone, Lussemburgo, Norvegia, Nuova Zelanda, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo, Regno Unito, Repubblica Ceca, Repubblica Slovacca, Spagna, Stati Uniti, Svezia, Svizzera, Turchia e Ungheria. Anche la Commissione Europea prende parte ai lavori dell'AIE.

## AGENZIA PER L'ENERGIA NUCLEARE

L'Agenzia per l'Energia Nucleare (AEN) dell'OCSE è stata fondata nel febbraio 1958 con il nome di Agenzia Europea per l'Energia Nucleare dell'OECE (Organizzazione europea per la cooperazione economica, sostituita nel 1960 dall'OCSE); la denominazione attuale dell'Organizzazione è stata definita il 20 aprile 1972, quando il Giappone diventò il primo Paese membro non europeo a pieno titolo della stessa Organizzazione. L'AEN è composta da 28 Paesi membri dell'OCSE: Australia, Austria, Belgio, Canada, Corea, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Islanda, Italia, Giappone, Lussemburgo, Messico, Norvegia, Paesi Bassi, Portogallo, Regno Unito, Repubblica Ceca, Repubblica Slovacca, Spagna, Stati Uniti, Svezia, Svizzera, Turchia e Ungheria. La Commissione delle Comunità europee partecipa a sua volta alle attività dell'Agenzia.

La missione dell'AEN è:

- Sostenere i Paesi membri nella gestione e nello sviluppo, attraverso la cooperazione internazionale, delle basi scientifiche, tecnologiche e legali necessarie per un uso sicuro, ecocompatibile ed economicamente conveniente dell'energia nucleare a scopi pacifici.
- Fornire valutazioni autorevoli finalizzate a costruire una consapevolezza e conoscenza comune delle questioni fondamentali, che fungano da input per le decisioni governative in materia di energia nucleare, nonché per più ampie analisi dell'OCSE in materia di politiche pubbliche adottate nel settore dell'energia e nell'ambito dello sviluppo sostenibile.

Le aree specifiche di competenza dell'AEN includono la sicurezza e la regolamentazione delle attività nucleari, la gestione delle scorie radioattive, la radioprotezione, la scienza nucleare, le analisi economiche e tecniche del ciclo del combustibile nucleare, le responsabilità e le leggi sul nucleare e l'informazione pubblica. La banca dati dell'AEN fornisce dati nel campo nucleare e servizi di programmi informatici ai Paesi partecipanti.

Nell'ambito di tali attività e per compiti affini, l'AEN lavora in stretta collaborazione con l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (AIEA) con la quale ha concluso un accordo di cooperazione, e con altre organizzazioni internazionali nel campo del nucleare.

## ORGANIZZAZIONE PER LA COOPERAZIONE E LO SVILUPPO ECONOMICO

L'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE) è un organismo unico in cui i Governi di trentuno Paesi collaborano per fronteggiare insieme le sfide economiche, sociali e ambientali poste dalla globalizzazione. L'OCSE è in prima linea nello sforzo di comprendere e aiutare i Governi ad affrontare i nuovi sviluppi e preoccupazioni quali la governance aziendale, l'economia dell'informazione e le sfide che l'invecchiamento della popolazione comporta. L'OCSE costituisce la sede in cui i Governi possono mettere a confronto le proprie esperienze politiche, cercare soluzioni a problemi comuni, individuare le buone pratiche e lavorare per coordinare le politiche a livello nazionale e internazionale.

Paesi membri dell'OCSE sono: Australia, Austria, Belgio, Canada, Cile, Corea, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Islanda, Irlanda, Italia, Giappone, Lussemburgo, Messico, Norvegia, Nuova Zelanda, Paesi Bassi, Polonia, Portogallo, Regno Unito, Repubblica Ceca, Repubblica Slovacca, Spagna, Stati Uniti, Svezia, Svizzera, Turchia e Ungheria.

La Commissione Europea prende parte ai lavori dell'OCSE.

Le pubblicazioni dell'OCSE diffondono ampiamente i risultati delle rilevazioni statistiche e ricerche condotte dall'Organizzazione su questioni economiche, sociali e ambientali, nonché le convenzioni, linee guida e standard sottoscritti dai suoi Paesi membri.

2010

2015

2020

2025

2030

