



Carlo Di Leo

## ABSTRACT

**S**econdo stime attendibili, il consumo globale di elettricità dovrebbe subire un incremento del 150-160% entro il 2050. La costruzione di centinaia di nuove centrali nucleari dovrebbe contribuire a soddisfare questo fabbisogno, limitando il più possibile, nuove ed ulteriori emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera. Affinché questo scenario possa concretizzarsi, occorrono però nuovi impianti a basso costo, un serio piano per lo smaltimento delle scorie radioattive e la prevenzione dalla proliferazione nucleare. Triplicare la produzione di energia nucleare potrebbe dunque contribuire in modo decisivo a moderare il cambiamento climatico evitando l'emissione annua di uno o addirittura due miliardi di tonnellate di carbonio nell'atmosfera.

### I perché dell'opzione nucleare

Attualmente, dall'energia nucleare si ricava circa un sesto dell'elet-



## Un ritorno all'opzione nucleare

tricità mondiale. Insieme alla fonte costituita dall'energia idroelettrica, che ne produce poco più di un sesto, oggi il nucleare è la principale fonte energetica "senza carbonio". La tecnologia ha avuto problemi di maturazione, stampati nella memoria dell'opinione pubblica per gli incidenti di Three Mile Island (che non provocò vittime o danni alle persone, ma fece cambiare direzione al programma energetico statunitense), Chernobyl e Fukushima, ma in tempi più recenti, i nuovi impianti hanno dimostrato un'affidabilità ed un'efficienza davvero notevoli. E l'ampia disponibilità mondiale di uranio (presente anche in Ita-

lia) potrebbe alimentare una serie di reattori molto più ampia di quella attuale e per tutta la loro durata che è di circa 40 anni per uno. Ma quali sono i motivi che spingono molti tecnici e molti uomini politici a riprendere seriamente in considerazione l'opzione nucleare? Le ragioni di tale scelta sono da ricercarsi nella capacità che può avere una centrale nucleare nel generare enormi quantità di energia ad un costo contenuto, nonché nel buon impatto ecologico che può avere una centrale di questo tipo per la salvaguardia del patrimonio ambientale. Per comprendere meglio la prima ragione, ci si deve riferire ai principi



**L'urto del neutrone contro il nucleo dell'atomo di uranio, viene studiato col modello del nucleo composto**

fisici che sono alla base del funzionamento di un reattore nucleare. Per fissione (dal latino “*findere*” che significa “*dividere, spaccare o spezzare*”) si intende la scissione di un nucleo pesante (per esempio uranio-235 o plutonio-239) in due o più frammenti, provocata da un neutrone: a seguito di questa scissione viene liberata una forte quantità di energia contenuta nel nucleo colpito e vengono prodotte particelle  $\beta$ , raggi  $\gamma$ , neutrini e neutroni. In condizioni particolari, che saranno esaminate tra breve, questi neutroni possono provocare ulteriori fissioni in numero sufficiente a dare origine ad una reazione a catena.

L'urto del neutrone contro il nucleo dell'atomo di uranio, viene studiato col modello del nucleo composto.

L'ipotesi della formazione di un nucleo composto è giustificata dal fatto che l'intervallo di tempo che intercorre tra l'istante dell'urto e la scissione di questo in due frammenti è circa un miliardo di volte più grande del tempo che un neutrone impie-

gherebbe ad attraversare il nucleo. Nell'intervallo di tempo durante il quale il neutrone rimane nel nucleo si avrà perciò la formazione di un nuovo nucleo instabile, chiamato nucleo composto. Si è pertanto indotti a pensare che la reazione stessa avvenga in tre stadi successivi:

- Stadio 1, consistente nell'urto del neutrone col nucleo;
- Stadio 2, con formazione di un nucleo composto di massa  $M_c$ ;
- Stadio 3, con scissione del nucleo composto in due frammenti di massa  $M_1$  e  $M_2$ .

È provato sperimentalmente che la somma delle masse dei due frammenti è inferiore alla massa del nucleo composto: ed è proprio questa differenza di massa che spiega il liberarsi dell'energia di fissione  $E_f$  in accordo con l'equazione di equivalenza di Einstein che viene di seguito riportata:

$$E_f = [M_c - (M_1 + M_2)] \cdot c^2$$

essendo  $c$  la velocità della luce, pari all'incirca a 300 000 chilometri al secondo. Quando nel 1905 Albert Einstein formulò la teoria della relatività ristretta, indicò la velocità della luce con la lettera  $c$ , iniziale della parola latina “*celeritas*” che vuol dire “*velocità*”. Secondo la teoria di Einstein, oggi pienamente dimostrata in via sperimentale, quando una, anche piccola quantità di massa si trasforma in energia, l'energia che scaturisce da tale reazione, è data dal prodotto della massa che si trasforma in energia per la velocità della luce al quadrato. Pertanto, anche se la massa che si trasforma in energia è relativamente piccola, quando andiamo a moltiplicare questa massa per la velocità della luce al quadrato, otteniamo un'energia enorme. Ecco perché la fissione di un chilogrammo di uranio-235, produce la stessa quantità di energia che si ottiene bruciando 6 milioni di tonnellate di carbone, tanti da riempire 200 000 carri ferroviari.

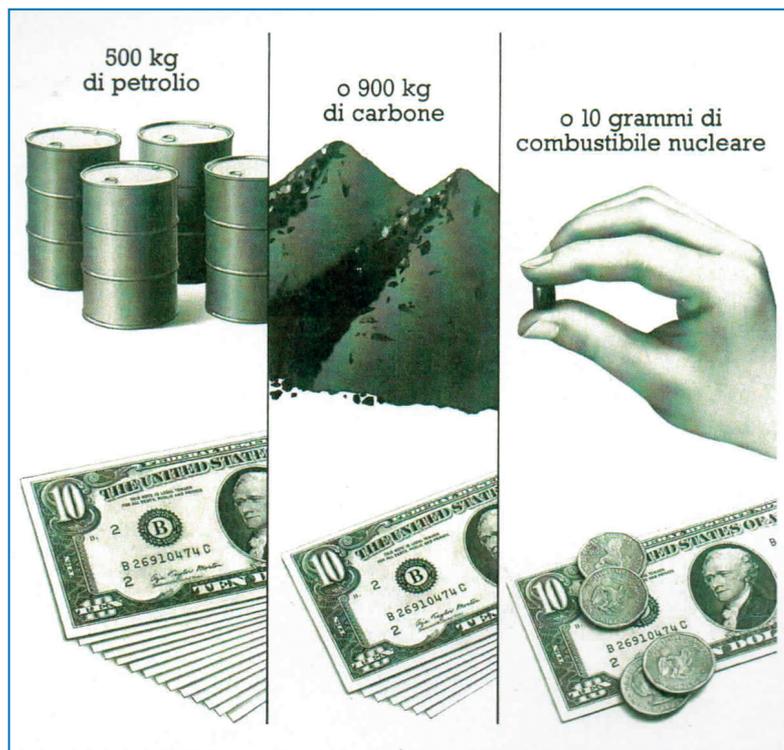


Figura 1 - Produzione dell'energia che un italiano consuma in un anno.

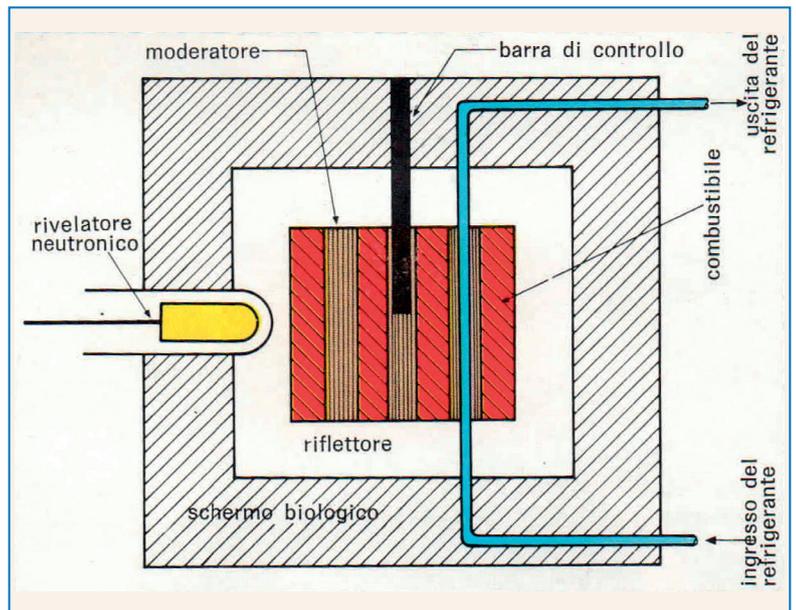
Nella *figura 1*, vi sono dei semplici disegni che ci dicono che per produrre l'energia elettrica che un italiano mediamente consuma in un anno, occorrono o 500 kg di petrolio, o 900 kg di carbone o soltanto 10 grammi di combustibile nucleare.

Il nocciolo di un reattore nucleare (o "core" in lingua inglese) è la parte del reattore in cui avvengono la fissione e la rimozione del calore generato come conseguenza. In *figura 2* vi è una rappresentazione schematica dei componenti del nocciolo.

Descriveremo ora il funzionamento di un impianto nucleare di potenza, tramite il quale l'energia liberata nella fissione viene trasformata in energia meccanica e successivamente elettrica. Il nocciolo è costituito dal combustibile, dal moderatore, dal refrigerante, dal materiale di controllo e dal materiale strutturale.

Il combustibile solido è racchiuso in barre cilindriche o in piastre di metallo (di acciaio, zirconio, alluminio, o altro materiale idoneo), separato dal moderatore che può essere acqua, acqua pesante, grafite o berillio, e che ha la funzione di rallentare i neutroni generati nel processo di fissione. Attraverso il combustibile ed il moderatore passa il refrigerante (acqua, anidride carbonica, aria, metalli liquidi ecc) che trasporta il calore dal reattore allo scambiatore. All'interno del nocciolo vi è un certo numero di barre di controllo di varie forme (cilindriche, cruciformi o a piastra) in materiale assorbente (boro, cadmio, afnio, indio, berillio), aventi la funzione di controllare il livello di potenza e, se necessario, spegnere il reattore.

Il nocciolo è circondato da un riflettore (generalmente acqua o grafite), al quale si ricorre per diminuire la fuga di neutroni, da un primo schermo (schermo termico) in grado di assorbire gran parte delle radiazioni (neutroni veloci e raggi  $\gamma$ ) che producono riscaldamento delle strutture e da un secondo schermo (schermo biologico) con funzione di natura sanitaria nei



*Figura 2 - Nocciolo di una centrale nucleare.*

confronti dei tecnici addetti alla centrale. All'interno del nocciolo sono presenti rivelatori dell'intensità del flusso neutronico e misuratori di temperatura. Il funzionamento di un impianto nucleare è mostrato per sommi capi in *figura 3*.

Nello schema di *figura 3* il refrigerante entra nel nocciolo alla temperatura di ingresso  $T_{in}$  e fuoriesce a temperatura di uscita  $T_{usc}$ ; lo stesso salto di temperatura si ha in senso inverso nel lato primario del generatore di vapore.

Sul lato secondario di questo, un flusso  $W_s$  di vapore ad alta pressione viene prodotto ed inviato ad una turbina che produce il movimento di un generatore di corrente; il vapore a bassa pressione in uscita dalla turbina viene condensato ed inviato quindi al generatore di vapore da una pompa di ricircolazione.

Sul circuito primario viene il più delle volte inserito un pressurizzatore, costituito da una massa di acqua alla temperatura di saturazione, in equilibrio con una massa di vapore: quest'ultimo, comprimendosi, limita le escursioni di pressione del refrigerante primario causate da variazioni di temperatura.



**All'interno del nocciolo sono presenti rivelatori dell'intensità del flusso neutronico e misuratori di temperatura**

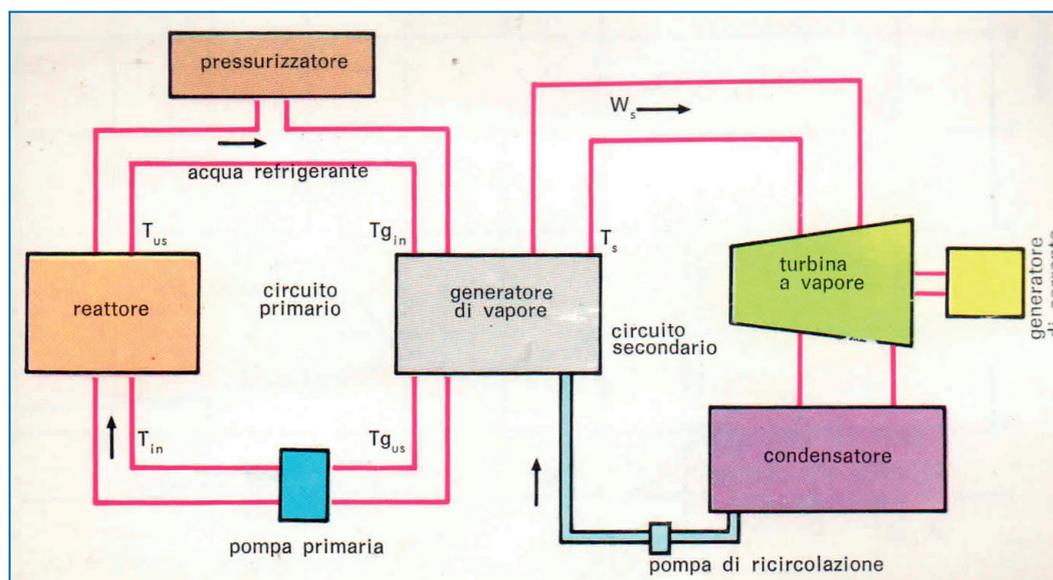


Figura 3 - Rappresentazione di un impianto nucleare.

Attualmente, le crescenti preoccupazioni per il riscaldamento globale e la conseguente richiesta per una regolamentazione delle emissioni di gas serra, stanno portando governi ed aziende energetiche, negli Stati Uniti e altrove, a considerare la costruzione di un numero rilevante di nuovi impianti nucleari.

### L'importanza del combustibile nucleare e la sua evoluzione.

Combustibili innovativi potrebbero migliorare la sicurezza e l'economia delle centrali nucleari. Per decenni il combustibile dei reattori nucleari è rimasto sostanzialmente lo stesso in tutto il mondo. Oggi, quattro nuovi progetti potrebbero rendere i noccioli dei reattori più sicuri ed efficienti. Le aziende stanno sperimentando e collaudando nuovi materiali, mentre i "legislatori scientifici" stanno sviluppando nuove regole per l'uso.

Gli ingegneri stanno riprogettando il combustibile all'uranio usato in quasi tutti i reattori del mondo per ridurre sia la possibilità di un'esplosione di idrogeno, sia il rilascio di radiazione nel caso di incidente, cioè quello che è avvenuto nel 2011 alla centrale giapponese di Fukushima Daiichi.

Di fatto, i nuovi combustibili che devono ancora essere perfezionati, sono già in fase di test. Come abbiamo visto poc'anzi nel nocciolo di un reattore i nuclei di uranio vengono spaccati rilasciando neutroni e calore. I sistemi all'interno e attorno al reattore prevengono il surriscaldamento del nocciolo. Migliorando il combustibile in modo che sia meno probabile che esso fonda o che si rompa in condizioni di calore elevato, e meno probabile che vicino ad esso si formi idrogeno, si può ridurre il rischio di rilascio di materiale in caso di incidente. Le stesse migliorie potrebbero permettere alle centrali di operare in maniera più efficiente e, dal punto di vista della generazione elettrica, più competitiva.

I quasi cento reattori nucleari in funzione negli Stati Uniti, usano combustibile a base di uranio, pressato in pellets cilindrici ciascuno con dimensioni di una gomma da matita. I pellets sono impilati in lunghe barre di combustibile in lega di zirconio, le quali, a loro volta sono immerse in acqua. Durante la fissione, i neutroni sono rilasciati attraverso lo zirconio ed entrano in altre barre di combustibile, dove innescano una reazione a catena in grado di generare calore.



**I quasi cento reattori nucleari in funzione negli Stati Uniti, usano combustibile a base di uranio, pressato in pellets cilindrici ciascuno con dimensioni di una gomma da matita**

Il calore converte l'acqua in vapore che, come abbiamo visto, mette in moto una turbina collegata ad un alternatore che genera elettricità. Lo zirconio è stato lungamente usato per la costruzione di barre di combustibile, proprio per la sua permeabilità ai neutroni. Si pensava che ricerca, estrazione, processamento e arricchimento (consistendo quest'ultimo nell'aumento in percentuale della frazione dei nuclei fissili o fissionabili) dell'uranio sarebbero stati difficili e costosi. Anche la scienza che progettava il nocciolo di un reattore per ottimizzarne la produzione di energia era giovane. I neutroni erano considerati troppo preziosi per essere persi. Ma come dimostrato a Fukushima, se lo zirconio è surriscaldato può reagire con acqua o vapore e produrre idrogeno potenzialmente esplosivo.

Oggi, la progettazione ed il funzionamento dei reattori sono più sofisticati, e l'uranio si è rivelato abbondante e facile da arricchire. Di conseguenza, gli operatori delle centrali, possono sacrificare un po' di neutroni. Il risultato è che scienziati ed ingegneri possono dedicarsi a progettazioni alternative che minimizzino la produzione di idrogeno e resistano a più calorie. Spronati dall'incidente di Fukushima ed in collaborazione con il Department of Energy (DOE) degli Stati Uniti, i produttori si stanno orientando verso quattro combustibili con alta resistenza agli incidenti, (accident-tolerant) ciascuno con un approccio distinto dagli altri. Poiché la loro adozione nei reattori esistenti comporterebbe poca o nessuna necessità di modificare i reattori stessi, i quattro tipi di combustibile potrebbero essere introdotti nelle macchine attuali già nel prossimo decennio.

Tre aziende in competizione e che producono la maggior parte del combustibile per l'industria, Framatome, GE Hitachi Nuclear Energy e Westinghouse Electric Company, hanno iniziato a testare piccole quantità di essi in opportuni reattori. L'idea alla base è quella di ridurre la proba-

bilità di reazioni pericolose dello zirconio, rivestendolo, sostituendolo o cambiando gli ingredienti di combustibile e pellet. Un quarto approccio, sviluppato da Lightbridge, combina uranio e zirconio in una lega meno reattiva e dalla forma di bastoncino di liquirizia, che trasferisce meglio il calore. L'uranio dovrebbe però essere arricchito a livelli più elevati di quelli permessi oggi, per cui la legislazione di alcuni Paesi (come gli USA) dovrebbe cambiare.

Per decenni i proprietari delle aziende hanno incontrato difficoltà ad ottenere l'approvazione legislativa di qualsiasi nuovo tipo di combustibile.

Adesso però ci riprovano, avvertendo l'esigenza di competere con il gas naturale, molto economico e con fonti rinnovabili come il solare e l'eolico. Nel processo di progettazione e produzione, i proprietari americani ricevono supporto da un'estesa infrastruttura dedicata alla ricerca e sviluppo nel nucleare, in particolare dai National Laboratories, anche se lo sforzo sta diventando sempre più globale.

Nel luglio 2018 scienziati statunitensi e dell'Unione Europea hanno organizzato un convegno presso l'Idaho National Laboratory, negli Stati Uniti per discutere come meglio condividere la ricerca portata avanti in entrambi i continenti.

L'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico sta sviluppando una struttura per dei test sui nuovi combustibili. Se i combustibili accident-tolerant si dimostrassero efficaci, l'energia nucleare riprenderebbe slancio in Giappone ove è ancora aperto il dibattito sul numero dei reattori da riattivare.

Senza dubbio dovranno essere superati molti ostacoli importanti. Prima che i nuovi combustibili siano pronti per entrare in commercio, devono essere condotti test di piccole quantità di combustibile nei noccioli e sviluppati modelli al computer delle prestazioni in condizioni operative sia normali, sia di incidente.



**Oggi, la progettazione ed il funzionamento dei reattori sono più sofisticati, e l'uranio si è rivelato abbondante e facile da arricchire**



**Si stanno sviluppando anche reattori nucleari a sali fusi, nei quali, combustibile e refrigerante possono essere combinati**

Stanno anche venendo alla luce tecniche più avanzate con cui sviluppare modelli.

La tecnologia per simulazioni del *Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors del DOE*, all'Oak Ridge National Laboratory, potrebbe accelerare la ricerca di base, lo sviluppo ingegneristico e l'entrata in commercio. Se i risultati dei test fossero convincenti, la catena di rifornimento di combustibile degli Stati Uniti, dal laboratorio di produzione a livello di rifornimento del reattore, dovrà riorganizzarsi e processi e procedure delle centrali andranno riadattati.

Il ripensamento del combustibile potrebbe essere il punto di partenza per un cambiamento più grande. Scienziati ed ingegneri progettano reattori ad alte temperature raffreddati a gas e che userebbero particelle di uranio avvolte in rivestimenti fatti di materiali esotici; pellet simili a palline di gomma controllerebbero la reazione nucleare al posto delle barre di moderazione inserite tra le barre di combustibile. Si stanno sviluppando anche reattori nucleari a sali

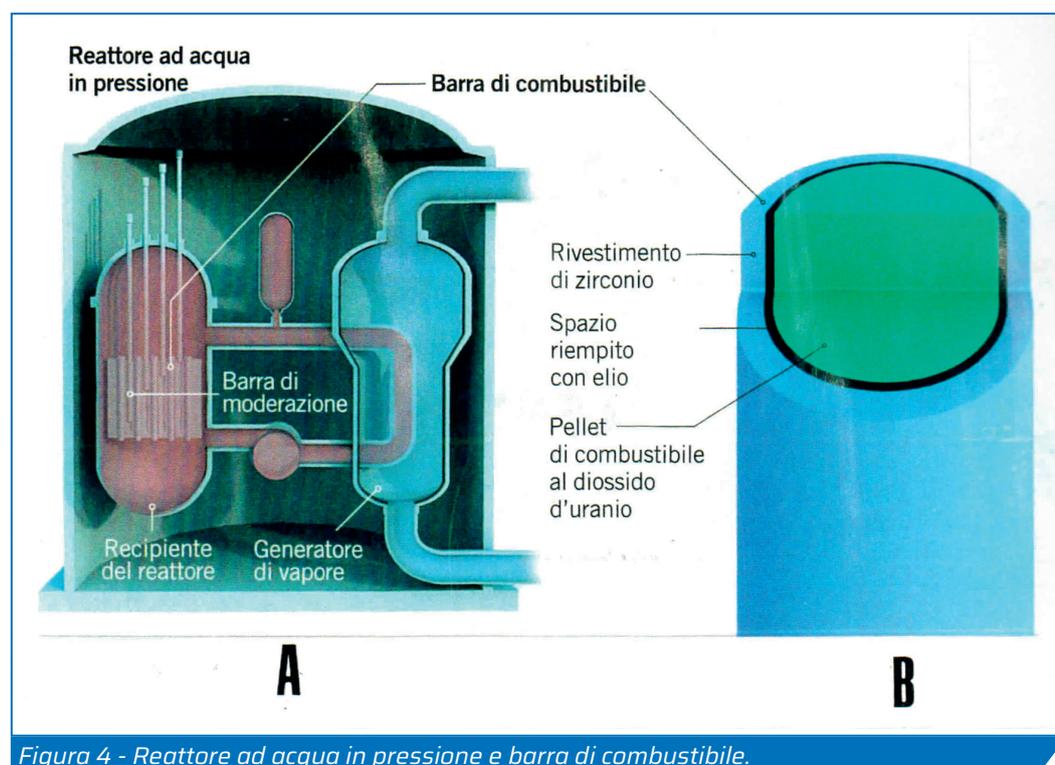
fusi, nei quali, combustibile e refrigerante possono essere combinati.

Come le industrie di gas naturale, le solari e le eoliche sono significativamente cambiate in pochi anni, anche l'industria dell'energia nucleare potrebbe essere pronta a reinventarsi.

Attualmente i produttori stanno sperimentando i combustibili con resistenza agli incidenti (*accident-tolerant*). Se surriscaldati, è assai poco probabile che questi combustibili generino condizioni simili a quelle che hanno portato alle esplosioni e all'emissione di radiazioni avvenute durante l'incidente di Fukushima del 2011.

Oggi, quasi tutte le centrali nucleari impiegano reattori ad acqua in pressione o ad acqua bollente. La fissione avviene in pellet impilati in barre rivestite, separati tra loro da uno spazio che permette l'espansione termica durante il funzionamento.

Le figure di seguito riportate mostrano quattro esempi di combustibili *accident-tolerant* ricordando che ciascun produttore sta lavorando su diverse varianti.



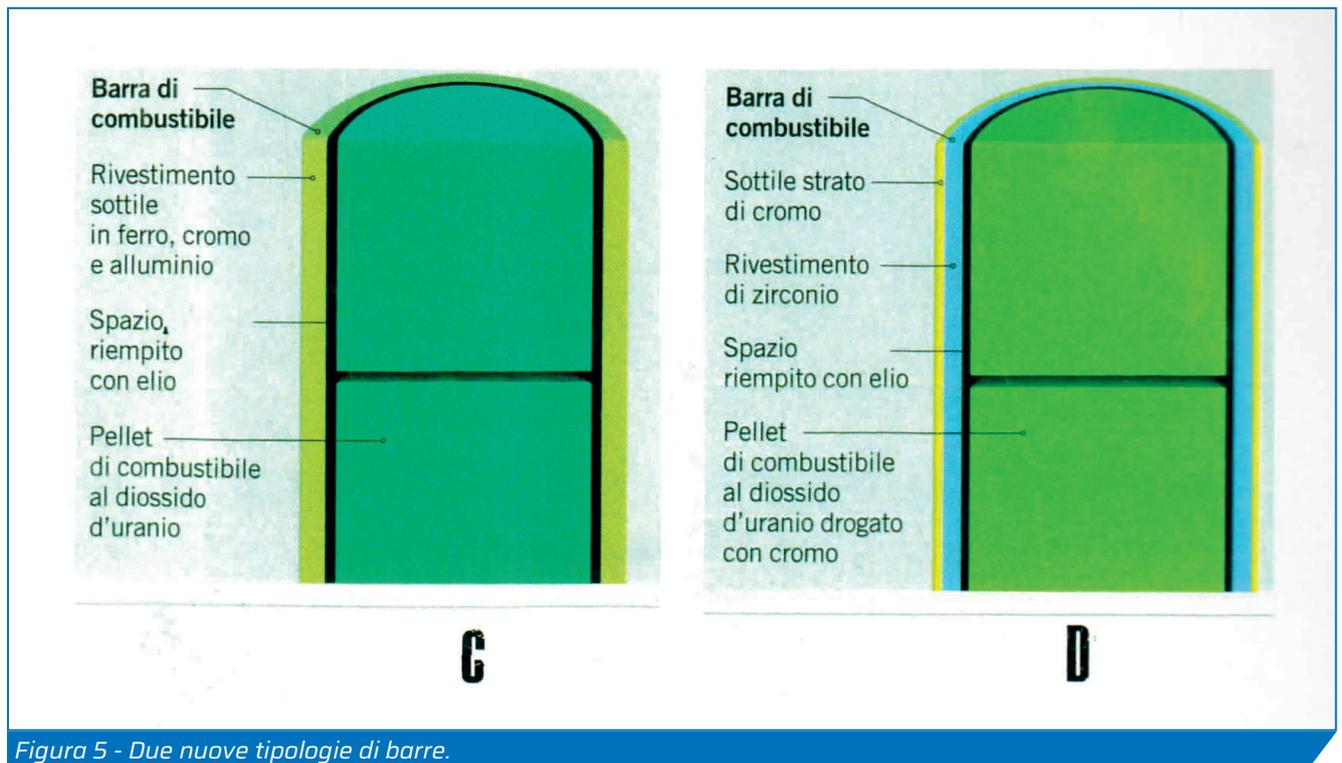


Figura 5 - Due nuove tipologie di barre.

La figura 4 contiene due immagini. Nell'immagine contrassegnata con la lettera A, è riportato un disegno molto sommaro, di un reattore ad acqua pressurizzata, mentre in figura B è riportata una tradizionale barra per un reattore di questo tipo. In un reattore, le barre di combustibile riscaldate trasformano l'acqua in vapore per generare elettricità. Nella barra C viene "reinventato" il rivestimento. La barra standard attorno al pellet di combustibile è fatta di un rivestimento in lega di zirconio. Permette il passaggio di neutroni generati dal processo di fissione supportando una reazione nucleare che si auto-sostiene. Ma se surriscaldato, lo zirconio può reagire con acqua e vapore producendo idrogeno gassoso che può accumularsi ed esplodere. Un rivestimento in ferro, cromo ed alluminio, invece non reagirebbe. Esso bloccherebbe parte dei neutroni, ma sarebbe più sottile permettendone il passaggio in numero sufficiente. Nella barra D (vedere figura 5), invece, si aggiunge del cromo.

L'aggiunta di un sottile strato di cromo, al rivestimento di zirconio, può impedire al rivestimento di reagire con l'acqua e produrre idrogeno allo stesso modo in cui uno strato antiruggine posto su un metallo, ne previene l'ossidazione. Il rivestimento così rinforzato è anche in grado di sopportare un maggior calore e durare più a lungo. Inoltre, l'aggiunta di cromo al pellet di uranio aiuta ad evitare che il combustibile si rompa o si deformi a del causa calore, rendendo l'intera struttura di barre di combustibile più resistente in caso di incidente e meno incline al rilascio di materiale radioattivo. Le ultime due configurazioni da analizzare sono la E e la F. L'aggiunta di un sottile strato di cromo al rivestimento di zirconio può impedire al rivestimento di reagire con l'acqua e produrre idrogeno, allo stesso modo in cui uno strato di antiruggine, posto su un metallo ne previene l'ossidazione. Il rivestimento così rinforzato è anche in grado di sopportare un maggior calore e durare più a lungo.



Oggi, quasi tutte le centrali nucleari impiegano reattori ad acqua in pressione o ad acqua bollente



**Il combustibile è costituito da uranio e zirconio, vincolati al rivestimento di zirconio**

Inoltre l'aggiunta di cromo in pellet di ossido d'uranio, contribuisce ad evitare che il combustibile si rompa o si deformi a causa del calore, rendendo l'intera struttura delle barre di combustibile più resistente in caso di incidente e meno incline al rilascio di materiale radioattivo.

Le ultime due configurazioni da analizzare sono la E e la F. Nella configurazione E è previsto un inserimento di silicio. In questo caso, il cambio di materiale del pellet da diossido di uranio a siliciuro di uranio, permette un maggior trasferimento di calore all'acqua circostante. Il combustibile può quindi operare a temperature più basse, rendendo meno probabile la produzione di idrogeno ed il rilascio di radiazioni durante un incidente. Il rivestimento di zirconio può essere ricoperto con cromo (immagine E, a sinistra), per ridurre la possibile generazione di idrogeno o sostituito con carburo di silicio, che non reagisce con l'acqua ed è meno probabile che si deformi o si rompa.

Infine, vi è la particolare configurazione F. In essa una opportuna riprogettazione elimina il pellet. Il combustibile è costituito da uranio e zirconio, vincolati al rivestimento di zirconio. I materiali hanno

tassi di dilatazione simili, quindi non vi è bisogno di spazio.

Combustibile e rivestimento fusi sono torti per creare una barra solida con più superficie per trasferire calore all'acqua. Il dislocatore, posto al centro della barra, aiuta a distribuire uniformemente il calore. Il maggior trasferimento permette al combustibile di operare ad una temperatura più bassa, rendendo meno probabili il surriscaldamento e relative condizioni per possibili incidenti. L'uranio deve essere arricchito al 20% invece del 5% degli altri combustibili mostrati.

In figura 7 è riportata una foto che mostra delle barre di combustibile pronte all'uso presso l'impianto nucleare di Dukovany, nella Repubblica Ceca.

In America nel lontano 2003 è stato realizzato presso il Massachusetts Institute of Technology uno studio intitolato "The Future of Nuclear Power", che ha analizzato i fattori necessari per mantenere in piedi l'opzione nucleare.

Lo studio descrive uno scenario in cui la produzione di energia nucleare nel mondo potrebbe triplicare arrivando ad un milione di megawatt entro il 2050, con un risparmio nelle emissioni globali compreso

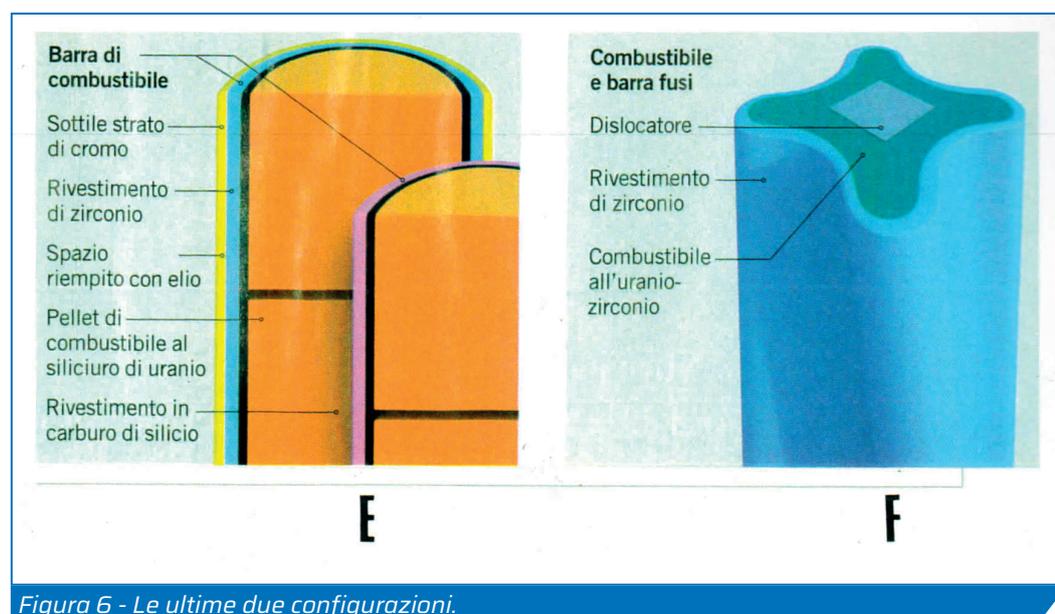


Figura 6 - Le ultime due configurazioni.

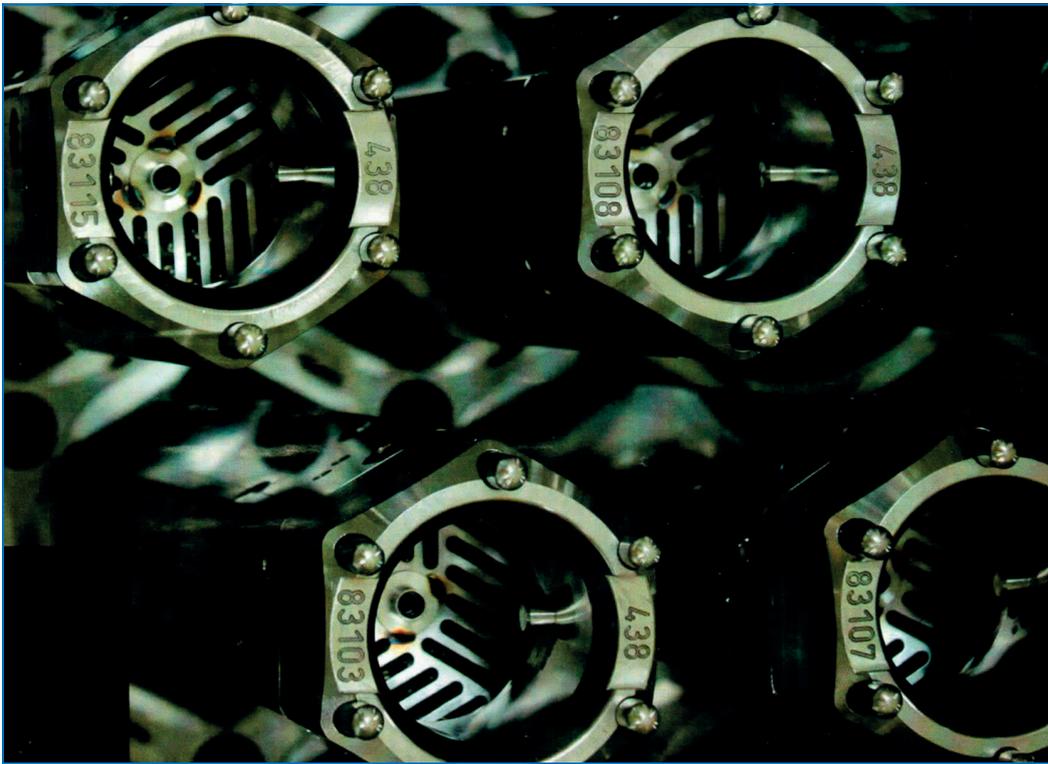


Figura 7 - Barre della centrale di Dukovany.

fra 0,8 e 1,8 miliardi di tonnellate di carbonio all'anno a seconda che siano sostituiti impianti a gas o a carbone.

A questa scala, l'energia nucleare contribuirebbe in modo significativo alla stabilizzazione delle emissioni di gas serra, processo che richiede un risparmio di 7 miliardi di tonnellate di carbonio all'anno, fino al 2050.

### Il ciclo del combustibile nei moderni reattori.

Come già accennato, da oggi al 2050 gli impianti nucleari per la produzione di energia potrebbero addirittura triplicare. Che impianti si dovrebbero costruire per consentire un'espansione nucleare di quell'entità? Una considerazione cruciale è che il ciclo del combustibile può essere aperto o chiuso. In un ciclo aperto, noto anche come "once-through", l'uranio è "bruciato" una volta sola in un reattore, ed il combustibile esausto viene immagazzinato in depositi geologici. Il combustibile esausto comprende il plutonio, che

potrebbe essere estratto chimicamente e convertito in combustibile per essere usato in un altro impianto nucleare. Questo secondo caso è detto ciclo chiuso, un'ipotesi che ha vari sostenitori. Alcuni Paesi, tra cui la Francia, usano centrali a ciclo chiuso, in cui il plutonio è separato dal combustibile esausto e viene ulteriormente bruciata una miscela di ossidi di uranio e plutonio. Una scelta a lungo termine potrebbe implicare il riciclo di tutti gli elementi transuranici (uno dei quali è appunto il plutonio) in un reattore veloce. In questo approccio viene praticamente eliminata tutta la componente del combustibile, con tempi di dimezzamento molto lunghi, fattore questo importante nel dibattito sulle scorie radioattive. Per rendere efficace questo schema, occorrono tuttavia ricerche approfondite e sviluppi che consentano il superamento delle relative sfide tecniche ed economiche.

Riciclare gli scarti per utilizzarli in un ciclo chiuso potrebbe sembrare la scelta ide-



Alcuni Paesi, tra cui la Francia, usano centrali a ciclo chiuso, in cui il plutonio è separato dal combustibile esausto e viene ulteriormente bruciata una miscela di ossidi di uranio e plutonio



**Il tipo di reattore che continuerà a dominare lo scenario mondiale per altri 20 anni o forse più è il reattore ad acqua leggera, che usa acqua comune e non acqua pesante (che contiene deuterio) come refrigerante e moderatore**

ale: si usa materiale grezzo per produrre la stessa potenza ed il problema dell'immagazzinamento a lungo termine viene in parte risolto, grazie alla minore quantità di materiale da conservare per diverse migliaia di anni. Tuttavia per i prossimi decenni è forse da preferire un ciclo aperto. Infatti, in primo luogo il combustibile riciclato è più costoso dell'uranio originario. In secondo luogo tutto fa pensare che vi sia uranio sufficiente a costi ragionevoli per sostenere la triplicazione della produzione di energia nucleare con centrali a ciclo aperto per l'intero ciclo di vita (da 40 a 50 anni per ciascun impianto). In terzo luogo, il beneficio ambientale per l'immagazzinamento a lungo termine delle scorie è superato dai rischi a breve termine dovuti al riprocessamento complesso e molto pericoloso e alle operazioni di produzione del combustibile. Infine, il riprocessamento che avviene in un sistema a ciclo chiuso, produce plutonio che può essere usato negli ordigni nucleari.

Il tipo di reattore che continuerà a dominare lo scenario mondiale per altri 20 anni o forse più è il reattore ad acqua leggera, che usa acqua comune e non acqua pesante (che contiene deuterio) come refrigerante e moderatore. La stragrande maggioranza degli impianti oggi in attività è di questo tipo il che ne fa una tecnologia matura e ben conosciuta in tutti gli aspetti.

I modelli di reattore sono oggi divisi in generazioni. I primi reattori prototipi, costruiti negli anni Cinquanta e nei primi anni Sessanta erano spesso di un solo tipo. I reattori di seconda generazione erano invece progetti commerciali costruiti in numerosi esemplari dalla fine degli anni Sessanta ai primi anni Novanta. La terza generazione ha portato perfezionamenti quali una migliore tecnologia del combustibile e la sicurezza intrinseca e passiva, vale a dire che in caso di incidente, il reattore si spegne automaticamente senza l'intervento attivo degli operatori.

Il primo reattore di terza generazione è stato costruito in Giappone nel 1996. Infine, i reattori di quarta generazione sono ancora in fase sperimentale, come i reattori a letto di sfere o i reattori veloci raffreddati al piombo. Infine vi sono i reattori III+ che sono simili a quelli della terza, ma con caratteristiche avanzate ulteriormente evolute. Con la possibile eccezione dei reattori a gas ad alta temperatura (di cui sono un esempio quelli a letto di sfere) i reattori di quarta generazione sono ancora lontani decenni da uno sfruttamento industriale e commerciale significativo.

Per valutare il nostro scenario fino al 2050 si prevede la costruzione di reattori III+ ad acqua leggera. Il reattore modulare a letto di sfere introduce l'interessante concetto di un impianto nucleare modulare. Invece di costruire un grande impianto da 1000 megawatt, si costruisce un insieme di moduli da 100 megawatt ciascuno.

Questo approccio può risultare di particolare importanza sia nei paesi in via di sviluppo che in quelli industrializzati, privi di una regolamentazione grazie al minore costo capitale necessario. I grandi impianti tradizionali presentano il vantaggio dell'economia di scala, che si riflette in un minor costo per chilowatt di potenza, ma questo obiettivo potrebbe essere raggiunto anche combinando un gran numero di moduli di piccole dimensioni.

Per quanto concerne in modo specifico il ciclo del combustibile, si osservi la *figura 8*, ove tale ciclo è schematizzato.

Per i prossimi decenni è preferibile un ciclo del combustibile aperto. L'uranio viene bruciato una sola volta in un reattore termico ed il combustibile esausto viene immagazzinato in depositi di scorie (in rosso). Alcuni paesi stanno usando un ciclo chiuso, in cui dal combustibile esausto si estrae il plutonio per poi miscelarlo con uranio per un ulteriore impiego in un reattore termico, che non è mostrato in figura. Un ciclo chiuso avanzato potrebbe essere

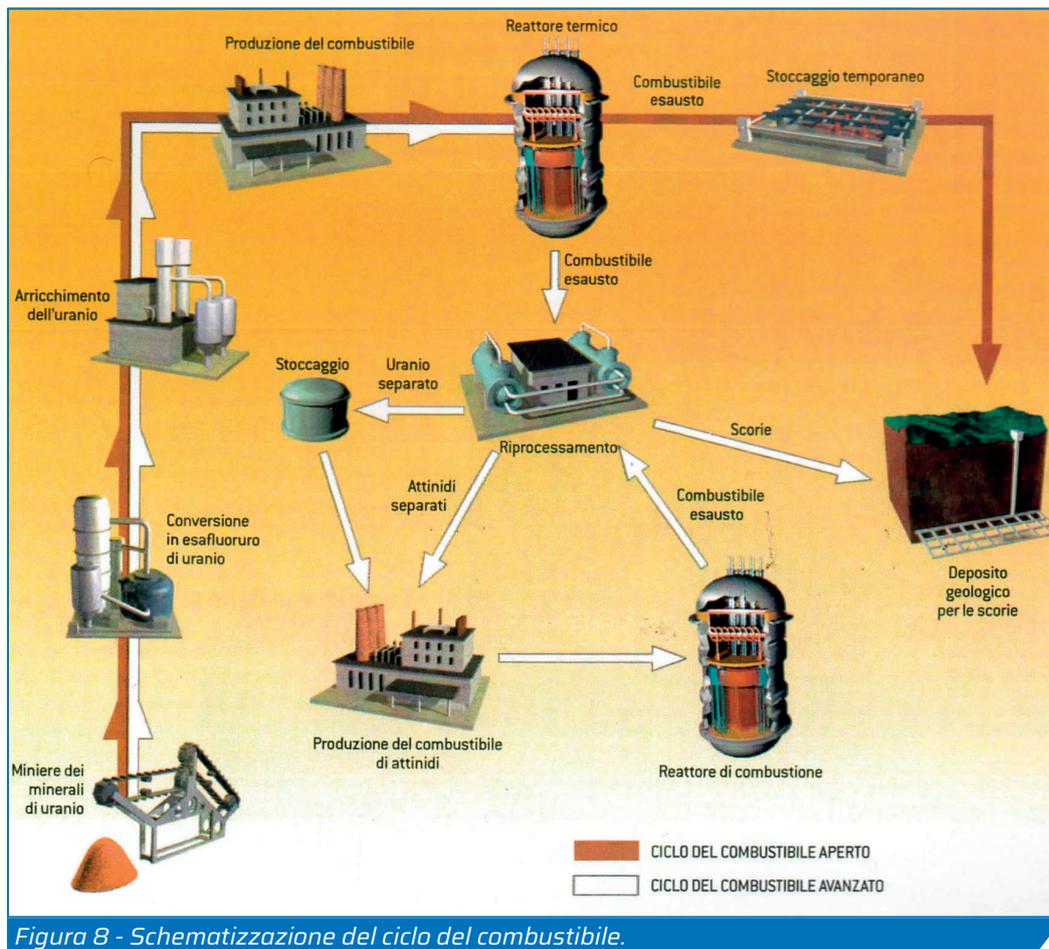


Figura 8 - Schematizzazione del ciclo del combustibile.

fattibile e conveniente in futuro. Il plutonio ed altri elementi (attinidi) del combustibile esausto potrebbero essere riprocessati ed utilizzati in speciali reattori di combustione, riducendo drasticamente la quantità di scorie che richiedono uno stoccaggio a lungo termine (in bianco).

Sulla base di studi condotti da vari enti specializzati, tra cui il MIT di Boston, la domanda globale di energia nei prossimi anni è destinata ad aumentare a causa della crescita della popolazione e del consumo pro capite.

Al fine di soddisfare la domanda, occorrerà costruire migliaia di nuovi impianti. Uno dei fattori più significativi nel determinare quali impianti costruire sarà il costo stimato dell'elettricità prodotta (a destra). Centrali nucleari costruite in pochi esemplari non sono economicamente

competitive con gli impianti a carbone e a gas. Se saranno rese competitive, la produzione di energia nucleare potrebbe triplicare entro il 2050 secondo uno scenario valutato da uno studio del MIT.

Per quanto riguarda le centrali nucleari attualmente esistenti e quelle che entreranno in criticità (o in esercizio) da oggi al 2050, dovranno essere risolti tre importanti problemi:

1. Riduzione dei costi;
2. Corretta gestione delle scorie radioattive;
3. Allontanamento della minaccia di proliferazione.

### I tre principali problemi da oggi al 2050

Il primo problema è dunque quello della riduzione dei costi. Basandosi su esperien-



**Centrali nucleari costruite in pochi esemplari non sono economicamente competitive con gli impianti a carbone e a gas**



**Molti interventi potrebbero ridurre il costo dell'energia nucleare al di sotto del valore di riferimento di 6,7 centesimi per chilowattora**

ze precedenti, oggi l'elettricità prodotta da nuovi impianti nucleari è più costosa di quella prodotta da impianti a carbone e a gas. Lo studio del MIT nei primi anni 2000 ha stimato che nuovi reattori ad acqua leggera, produrrebbero elettricità ad un costo di 6,7 centesimi a chilowattora. Questa cifra comprende tutti i costi dell'impianto, ammortizzati lungo la sua durata ed un accettabile ritorno economico per gli investitori. In confronto si stima che a parità di condizioni un nuovo impianto a carbone produrrebbe elettricità al costo di 4,2 centesimi per chilowattora.

Qualcuno sarà scettico sul fatto che si possa stimare con precisione il costo dell'energia nucleare, ricordando che le sottostime degli anni passati dicevano che il prezzo dell'energia nucleare sarebbe stato troppo basso per essere quantificato. Ma l'analisi del MIT è basata sulle passate esperienze e sulle prestazioni reali degli impianti, non sulle promesse agli industriali. Si potrebbe anche obiettare che vi sono incertezze intrinseche nelle proiezioni dei costi.

Un punto importante è che le stime pongono le tre alternative (nucleare, carbone e gas) sullo stesso piano e non vi è ragione di aspettarsi circostanze che ne favoriscano improvvisamente una. Inoltre quando viene deciso il tipo di impianto da costruire, ci si basa su queste stime. Molti interventi potrebbero ridurre il costo dell'energia nucleare al di sotto del valore di riferimento di 6,7 centesimi per chilowattora. Una riduzione del 25% delle spese di costruzione porterebbe il costo dell'elettricità sotto i 5,5 centesimi per chilowattora.

La riduzione del tempo di costruzione di un impianto da cinque a quattro anni ed i miglioramenti nel funzionamento e nella manutenzione potrebbero togliere altri 0,4 centesimi per chilowattora.

Inoltre, una riduzione del costo di capitale per un impianto nucleare, affinché sia lo stesso di quello del gas o del carbone, colmerebbe il divario.

Tutte queste riduzioni del costo dell'energia nucleare sono plausibili (soprattutto se l'industria costruirà centrali in serie a partire da pochi progetti standard) ma non sono state ancora dimostrate.

L'energia nucleare avrebbe un vantaggio economico evidente se alle emissioni di carbonio venisse attribuito un prezzo. Ci si vuole riferire alla "carbon tax", anche se il meccanismo di attribuzione del prezzo non deve essere necessariamente in forma di tassa. L'Europa ha messo in piedi un sistema in cui le quote di emissioni di carbonio possono essere scambiate in un mercato aperto. Nei primi mesi del 2006 le quote venivano vendute per più di 100 dollari per tonnellata di carbonio emesso (ovvero 27 dollari per tonnellata di anidride carbonica), ma di recente il prezzo è sceso alla metà. Una tassa di appena 50 dollari per tonnellata di carbonio porta il costo dell'elettricità prodotta con impianti a carbone a 5,4 centesimi per chilowattora. A 200 dollari per tonnellata di carbonio, il prezzo raggiunge un valore esorbitante di 9 centesimi per chilowattora. Il gas va molto meglio del carbone, arrivando a 7,9 centesimi per chilowattora se la tassa è di 200 dollari.

Gli impianti a combustibili fossili potrebbero evitare la carbon tax catturando e sequestrando il carbonio ma il costo dell'operazione sarebbe caro come la tassa.

Poiché sono trascorsi molti anni dall'ultima centrale nucleare costruita negli Stati Uniti le società che volessero costruirvi delle nuove, dovrebbero sostenere spese che gli operatori successivi non dovrebbero affrontare, dovute al rischio di lavorare con un processo appena validato.

Il secondo grande ostacolo per il rilancio dell'energia nucleare, riguarda il problema dello smaltimento delle scorie radioattive. Nessun paese ha attuato un sistema per lo stoccaggio del combustibile esausto e delle altre scorie radioattive prodotte dagli impianti nucleari. L'approccio più condiviso è lo stoccaggio in siti geologici in

cui le scorie sono conservate in camere situate a centinaia di metri di profondità nel sottosuolo. L'obiettivo è prevenire la perdita di scorie per millenni grazie ad una combinazione di barriere artificiali (i contenitori delle scorie) e geologiche (la struttura della roccia in cui le camere vengono ricavate e le caratteristiche del bacino idrogeologico). Decenni di studi sono a favore dell'opposizione dello stoccaggio geologico; gli scienziati hanno una buona comprensione dei processi e degli eventi che potrebbero far passare i radionuclidi dal deposito alla biosfera ma il processo per l'approvazione di siti geologici rimane irto di ostacoli. Un caso esemplare è costi-

tuito dal sito di Yucca Mountain, in Nevada, attentamente studiato per 20 anni.

Di recente si è scoperto che contiene molta più acqua di quanto si pensasse e l'approvazione della Nuclear Regulatory Commission (NRC) è stata sospesa. I ritardi nella risoluzione della gestione delle scorie potrebbero ostacolare gli sforzi per la costruzione di nuove centrali.

In ogni caso, il *Department of Energy* non dovrebbe abbandonare il progetto di Yucca Mountain. Dovrebbe valutare di nuovo l'adeguatezza del sito in varie condizioni e modificare l'agenda del progetto secondo le necessità. Se la produzione nucleare dovesse espandersi globalmente fino ad un milione



**I ritardi nella risoluzione della gestione delle scorie potrebbero ostacolare gli sforzi per la costruzione di nuove centrali**

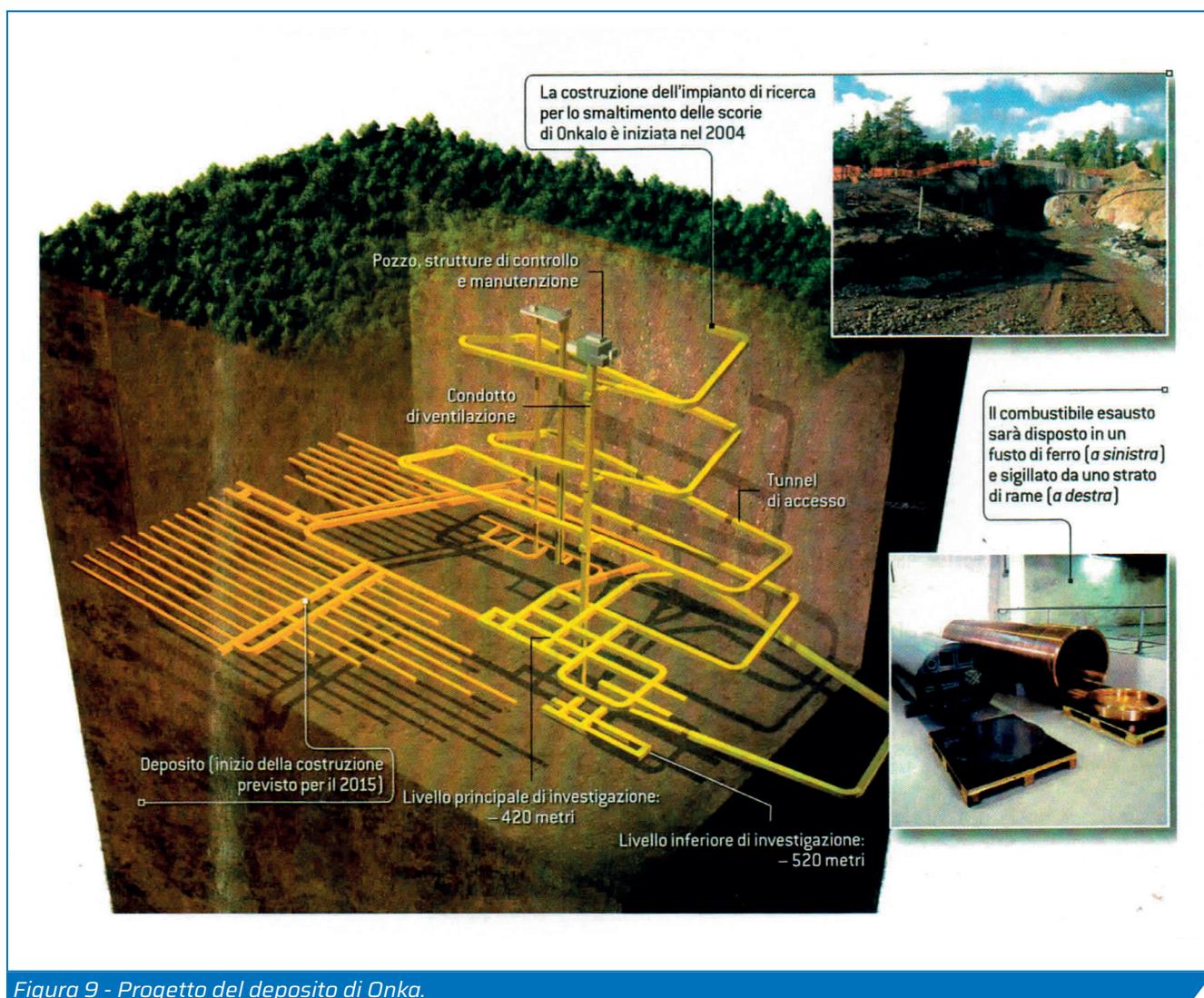


Figura 9 - Progetto del deposito di Onka.

di megawatt, con un ciclo aperto si genererebbero scorie di alto livello e combustibile esaurito in quantità tale da riempire un deposito dello Yucca Mountain ogni tre anni e mezzo. Nell'opinione pubblica, questo fatto rappresenta un significativo disincentivo all'espansione della produzione di energia nucleare. Tuttavia si tratta di un problema che può e deve essere risolto.

In Europa, la Finlandia sembra che abbia già risolto questo problema. Il deposito di Onkalo (di cui possiamo vedere una chiara immagine in *figura 9*) è un deposito geologico profondo destinato ad immagazzinare definitivamente le scorie radioattive finlandesi. È il primo deposito del mondo con queste caratteristiche ed è vicino alla centrale nucleare di Olkiluoto, nel municipio di Eurajoki. La costruzione è stata appannaggio della compagnia Posiva e si è basata sul metodo KBS-3 sviluppato nella vicina Svezia. Dopo una modifica del 1944 la legge finlandese per l'energia nucleare ha stabilito che tutti i residui nucleari prodotti in Finlandia, devono permanere sul territorio nazionale. Nel 2000, la zona di Olkiluoto fu scelta per l'immagazzinamento sotterraneo a lungo termine per il combustibile nucleare esausto. Il magazzino, chiamato Onkalo, ovvero grotta o cavità, è costruito sulla solida roccia di granito di Olkiluoto a 5 chilometri dalle centrali nucleari. Il municipio di Eurajoki ha dato il permesso per l'installazione in agosto del 2003.

Come già detto, la compagnia incaricata della costruzione e della gestione dell'installazione è stata Posiva, in mano a due produttori di energia nucleare in Finlandia, Fortum e TVO. Il deposito di Onkalo è abbastanza grande per immagazzinare scorie nucleari almeno durante i prossimi 100 anni, ovvero fino al 2120, anno in cui si procederà all'interramento e incapsulamento finale. Alla fine il tunnel sarà riempito e sigillato.

Nel 2012 un gruppo di ricercatori dell'Istituto reale di tecnologia di Stoccolma ha

pubblicato un documento che suggeriva che le capsule di rame non erano immuni alla corrosione, come affermano le compagnie incaricate del progetto. Nel 2019 un altro studio ha concluso che gli effetti delle radiazioni non dovrebbero danneggiare in modo significativo il contenitore dopo 100 000 anni.

Il terzo problema da prendere in considerazione è quello consistente nel ridurre al massimo la proliferazione.

Insieme con il programma nazionale di gestione delle scorie, è necessario continuare lo sforzo diplomatico per creare un sistema internazionale di paesi fornitori e di paesi consumatori. I Paesi fornitori come Stati Uniti, Russia, Francia e Regno Unito, dovrebbero vendere combustibile ai paesi consumatori con programmi nucleari più limitati, ed impegnarsi a smaltire il combustibile esausto. Da parte loro i paesi consumatori dovrebbero rinunciare alla costruzione di impianti per la produzione di combustibile. Questo schema ridurrebbe il rischio della proliferazione di impianti nucleari, poiché il maggior rischio di proliferazione coinvolge non solo gli stessi impianti nucleari di potenza ma anche quelli di arricchimento e riprocessamento del combustibile. L'attuale situazione del programma di arricchimento dell'uranio in Iran ne è un esempio.

Una soluzione di questo genere è necessaria in un mondo in cui l'energia nucleare deve essere triplicata, perché l'aumento della produzione comporterà la diffusione degli impianti nucleari in paesi a rischio di proliferazione atomica. La chiave per far funzionare questa soluzione è far sì che la produzione di combustibile sia poco conveniente dal punto di vista economico per piccoli programmi di produzione di energia nucleare.

Questo progetto si basa sul fatto che guardando alla realtà di mercato, il mondo è già diviso in paesi produttori e paesi consumatori. Istituire il modello fornitori/



**Nel 2000, la zona di Olkiluoto fu scelta per l'immagazzinamento sotterraneo a lungo termine per il combustibile nucleare esausto**

consumatori significa formalizzare la situazione in modo permanente con nuovi accordi che portino a consolidare le realtà commerciali. Una simile proposta è già di per sé interessante per paesi consumatori (che ottengono una fornitura sicura di combustibile nucleare a basso costo ed evitano il problema di gestire il materiale di scarto) ma occorrerebbe anche gettare sul tavolo ulteriori incentivi, perché, se dovessero aderire, i paesi consumatori firmerebbero un patto che va ben oltre gli accordi del Trattato di non proliferazione sulle armi nucleari.

Per esempio se fosse istituito un sistema globale di crediti di carbonio commerciabili, ai paesi consumatori che aderiscono alle regole di leasing del combustibile dovrebbero essere garantiti crediti per le loro nuove centrali nucleari. L'Iran è forse il più attuale esempio di nazione che la comunità mondiale vedrebbe più di buon occhio come paese consumatore che come paese produttore di uranio arricchito.

Ma non si tratta dell'unico caso "difficile". Un'altra nazione il cui programma dovrebbe essere affrontato immediatamente è il Brasile, ove è in via di completamento

un grande impianto di arricchimento per fornire (si suppone) combustibile ai due reattori nucleari del paese. Se l'energia nucleare si deve effettivamente espandere globalmente, senza aggravare le preoccupazioni di proliferazione, occorrerà un approccio coerente con Iran, Brasile ed altri paesi in via di sviluppo che intendano intraprendere la strada dell'energia nucleare. In *figura 10* è riportata una foto dell'impianto di Natanz in Iran.

Le attività in corso all'impianto di arricchimento di Natanz, in Iran, stanno destando preoccupazioni perché l'impianto potrebbe essere usato per preparare uranio per armamenti. Un accordo internazionale con cui i paesi "consumatori" possano acquistare combustibile per centrali nucleari dai paesi "fornitori" anziché costruire autonomamente impianti per l'arricchimento ridurrebbe la minaccia della proliferazione di armi atomiche.

### Conclusioni

Un terawatt, ossia un milione di megawatt di potenza senza emissioni di carbonio, è la quantità necessaria per fare un significativo passo avanti nel limitare le emissio-



**L'Iran è forse il più attuale esempio di nazione che la comunità mondiale vedrebbe più di buon occhio come paese consumatore che come paese produttore di uranio arricchito**



Figura 10 - Impianto di Natanz, in Iran.



**Raggiungere un terawatt di potenza nucleare entro il 2050 è una sfida che richiede l'installazione di circa 2.000 megawatt al mese**

ni di anidride carbonica ai valori previsti per la metà del secolo.

Nei termini usati da Socolow e Pacala, il contributo corrisponderebbe ad uno dei sette cunei di stabilizzazione. Raggiungere un terawatt di potenza nucleare entro il 2050 è una sfida che richiede l'installazione di circa 2000 megawatt al mese. E per giungere a questo obiettivo occorre un investimento di capitali di 2000 miliardi di dollari nell'arco di diversi decenni. Per di più nei prossimi anni occorrerà ridurre i costi di costruzione degli impianti, risolvere il problema della gestione delle scorie radioattive ed instaurare un sistema internazionale del ciclo del combustibile che non sia a rischio di proliferazione. Un fattore determinante sarà il grado di tassazione delle emissioni di anidride carbonica da combustibili fossili, sia nel mondo industrializzato che nelle grandi economie emergenti come Cina, India e Brasile.

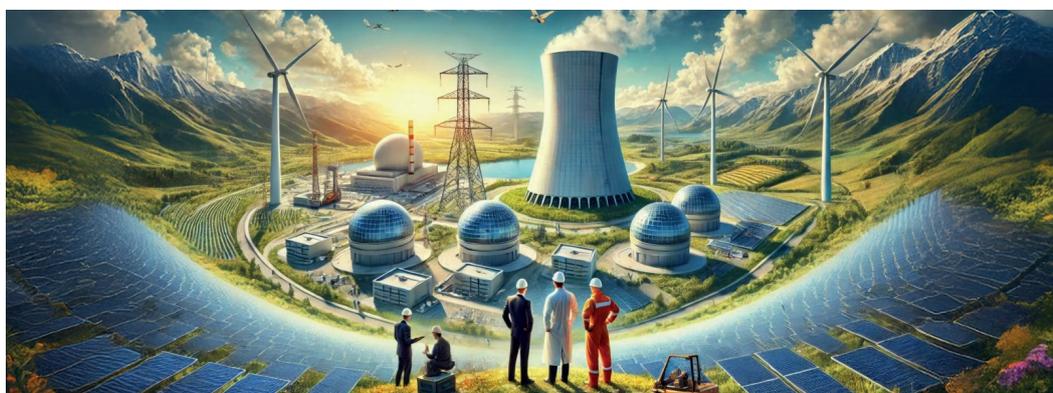
Gli aspetti economici dell'energia nucleare non sono l'unico fattore che sta determinando e determinerà il futuro impiego di questa fonte energetica. L'approvazione dell'opinione pubblica dipenderà anche dai problemi della sicurezza e delle scorie nucleari, ed il futuro dell'energia nucleare, negli Stati Uniti come in gran parte dell'Europa resta materia di discussione. Per quanto riguarda la sicurezza è essenziale che i regolamenti dell'NRC vengano fatti rispettare con il massimo rigore, il che non si è sempre verificato. Nello scenario svilup-

pato con lo studio del MIT è emerso che gli Stati Uniti arriveranno a triplicare la propria produzione di energia nucleare (fino a circa 300 000 megawatt di potenza) se globalmente si dovesse arrivare ad un terawatt. La credibilità di questo scenario, sarà determinata in gran parte, nei prossimi decenni, dal successo ottenuto dagli incentivi dell'Energy Policy Act del 2005, dalla capacità del governo di cominciare a trasferire il combustibile esausto dai siti dei reattori e dal fatto che le future scelte politiche degli Stati Uniti siano orientate verso soluzioni che limitino fortemente le emissioni di anidride carbonica.

### Bibliografia essenziale

Per quanto riguarda la prima parte dell'articolo, una trattazione completa si può trovare nelle seguenti opere di carattere generale sull'energia nucleare:

- Ameglio Paolo, *Introduzione ai principi di ingegneria nucleare ed all'analisi dei reattori nucleari*, E.C.I.G. editore, 1981, Genova.
- Bandini Buti Alberto, *Teoria e funzionamento dei reattori nucleari*, Sandit, Albino (BG), 2007.
- Boffi Vinicio, *Fisica del reattore nucleare*, voll.1 e 2, Patron, Bologna, 1974.
- Casarelli Giancarlo, *Fisica ed ingegneria del reattore nucleare*, Edizioni Riata
- Cumo Maurizio, *Impianti nucleari*, Casa editrice Università La Sapienza, Roma, 2012.
- Di Leo Carlo e Lucarelli Giorgio, *La fissione nucleare controllata, confinamento magnetico, confinamento inerziale e fusione fredda*, terza edizione, Editoriale Delfino, Milano, 2024.
- Errico Giovanni, *Pensiero Atomico*, SUSIL Edizioni.
- Forgone Nicola, Oriolo Francesco, *Principi di ingegneria nucleare: generazione e trasporto del calore*, Tipografia Editrice Pisana (TEP), Pisa, 2014.



- Leonardi Renzo, *L'ABC dell'energia nucleare*, Lantana editore, aprile 2011.
- Loizzo Paolo, *Le centrali nucleari, ovvero il diavolo che non c'è*, Monteleone, Vibo Valentia, 1994.
- Lombardi Carlo, *Impianti nucleari*, Polipress, Milano, 2012.
- Mainardi Enrico, *Impieghi dell'energia nucleare*, Editoriale Delfino, Milano, 2008.
- Maizza Vito, *Centrali elettronucleari, macchine ed impianti*, Laterza, Bari, 1984.
- Mazzoleni Francesco, *Introduzione all'ingegneria nucleare*, Liguori, Napoli, 1988.
- Milano Guido, *Energia nucleare, fissione, fusione, sicurezza e ambiente*, Aracne, Roma 2011
- Novelli Antonio, *Elementi di controllo dei reattori nucleari*, Clup, Milano 1988.
- Paci Sandro, *Introduzione ai sistemi nucleari*, Edizioni Università di Pisa, dicembre 2002.
- Quartieri Giuseppe, *Introduzione alla sicurezza dei sistemi nucleari*, Istituto Bibliografico Napoleone, Roma 2010.
- Sani Luciano, *Centrali elettronucleari*, Edizioni Sistema, Roma, 1984.

- Zanobetti Dino, *Energia nucleare*, un dossier completo, Società editrice Esculapio, Bologna, 2008.
- Zorzoli Giovanni Battista, *Fisica sperimentale dei reattori nucleari*, Feltrinelli, Milano 1971

Sulla parte dell'articolo, dedicata ai combustibili innovativi segnaliamo:

- *Advanced Fuel Pellet Materials and Fuel Rod Design for Water Cooled*
- *Reactors*, Agenzia internazionale per l'energia atomica, ottobre 2010;
- *Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors*, agenzia internazionale per l'energia atomica, giugno 2016.

Per quanto riguarda gli articoli apparsi su *Le Scienze* possono essere consultati i seguenti tre::

- Deutch John e Moniz Ernest, *L'opzione nucleare*, *Le Scienze* n.459, novembre 2006;
- Gibbs W.W. *Le nuove frontiere della fusione*, in *Le Scienze* n.581, gennaio 2017;
- Mc Cullum Rod, *Ripensando il nucleare*, *Le Scienze* n.611, luglio 2019.



**Nei prossimi anni occorrerà ridurre i costi di costruzione degli impianti, risolvere il problema della gestione delle scorie radioattive**