

# La nuova generazione dei reattori veloci

*I reattori a neutroni non rallentati potrebbero estrarre molta più energia dal combustibile nucleare riciclato, minimizzare il rischio di proliferazione di armi e ridurre notevolmente il tempo di isolamento delle scorie nucleari. Allo scopo di minimizzare il riscaldamento globale, infatti, l'umanità potrebbe generare l'energia del futuro servendosi della tecnologia nucleare, esente dalle emissioni di anidride carbonica. Ma se si costruissero solo centrali a neutroni lenti, come la maggior parte di quelle in funzione oggi, le riserve di uranio a basso costo sarebbero prosciugate entro pochi decenni. L'adozione di un nuovo ciclo, molto più efficiente nell'uso del combustibile nucleare, basato sui reattori a neutroni veloci e sul riciclaggio di combustibile esausto con trattamento pirometallurgico, consentirebbe di sfruttare una frazione molto più elevata dell'energia contenuta nel minerale di uranio. Inoltre, questo ciclo ridurrebbe di molto la produzione di scorie che rimangono radioattive a lungo e potrebbe sostenere la generazione di energia a tempo indeterminato.*

Carlo Di Leo

## Introduzione

Un numero sempre maggiore di persone (scienziati e non) vede nell'energia nucleare una tecnologia in grado di generare enormi quantità di elettricità rispettando l'ambiente (cioè con emissioni nulle di gas serra) nonostante le preoccupazioni di vecchia data che riguardano la sicurezza degli impianti nucleari. Varie nazioni (tra le quali Brasile, Cina, Corea del Sud, Egitto, Finlandia, Giappone, India, Pakistan, Russia, e Vietnam) stanno costruendo o progettano di costruire impianti nucleari a fissione. Se prodotta in modo attento, l'energia nucleare potrebbe essere una fonte realmente efficace ed inesauribile ed operare senza contribuire al cambiamento climatico. In particolare, una forma relativamente nuova di energia nucleare. Potrebbe scongiurare le principali preoccupazioni relative ai metodi attuali: il timore di incidenti nei reattori, l'uso di combustibile nucleare per armi di distruzione di massa, la gestione di scorie in cui la radioattività permane per molto tempo e l'esaurimento

delle riserve di uranio economicamente convenienti. La tecnologia in questione combina due innovazioni: il trattamento pirometallurgico (un metodo ad alta temperatura che ricicla le scorie nucleari in combustibile) e reattori avanzati a neutroni veloci, in grado di usare il combustibile ottenuto dal riciclo. Con tale approccio le scorie arriverebbero ad un livello sicuro di radioattività in pochi secoli, e quindi non sarebbe più necessario segregarle per decine di migliaia di anni. Un'efficiente reazione di fissione nucleare è innescata sia da neutroni lenti sia da neutroni veloci. La maggior parte delle centrali elettriche a combustibile nucleare esistenti contengono quelli che sono chiamati "reattori termici", il cui funzionamento si basa su neutroni con velocità (e quindi energia) relativamente bassa. Anche se generano calore, e quindi elettricità in modo abbastanza efficiente, i reattori termici non minimizzano la produzione di scorie radioattive.

Nei reattori l'energia è prodotta dalla fissione dei nuclei degli atomi di metalli pesanti (con elevato peso atomico),

soprattutto uranio o elementi derivati dall'uranio. In natura l'uranio è presente come miscela di due isotopi: l'uranio-235 che si scinde facilmente e perciò è detto "fissile" e l'uranio-238, molto più stabile. L'ignizione del combustibile nucleare ed il sostentamento della reazione di fissione sono a carico dei neutroni. Quando il nucleo di un atomo fissile è colpito da un neutrone, in particolar modo da un neutrone lento, ha un'elevata probabilità di scindersi (cioè di originare una reazione di fissione) con conseguente emissione di energia ed altri neutroni. I nuovi neutroni prodotti colpiscono altri atomi fissili causando nuove scissioni così da propagare una reazione a catena. Il calore che ne deriva è convogliato al di fuori del reattore, dove trasforma acqua in vapore. Ed il vapore è usato per alimentare una turbina che aziona un generatore elettrico. L'uranio-238 non è fissile, ma "fissionabile", vale a dire che se è colpito da un neutrone veloce ha qualche probabilità di scindersi. È detto anche "fertile", perché quando un atomo di uranio-238 assorbe un neutrone senza poi scindersi si trasforma in plutonio-239, un isotopo del plutonio che è fissile ed in grado di sostenere una reazione a catena, esattamente come l'uranio-235. Dopo circa tre anni di servizio del reattore il plutonio fornisce più di metà dell'energia generata ed il combustibile in uso in un reattore è rimosso, a causa del deterioramento dovuto alla radiazione e all'impovertimento dell'uranio-235. In figura 1 è mostrato un processo di fissione nucleare secondo il modello "a goccia". In a) il nucleo fissile viene colpito da un neutrone. Quando il neutrone è penetrato si forma, come indicato in b) il cosiddetto "nucleo composto". A questo punto il nuovo nucleo, si scinde in due (similmente a come farebbe una gocciolina di acqua) e, come si può vedere nell'immagine d), si formano due nuovi nuclei e vengono emessi due o tre neutroni che vanno a loro volta a scindere altri nuclei, alimentando la reazione a catena.

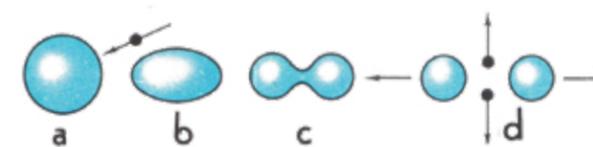


Fig. 1

Processo di fissione col modello "a goccia".

In un reattore termico, i neutroni emessi ad alte velocità sono rallentati (o più propriamente "moderati") dalle interazioni con atomi vicini a basso peso atomico, come l'idrogeno presente nell'acqua che scorre nel nucleo del reattore. Dei circa 440 reattori nucleari commerciali in attività, quasi tutti sono termici e la maggior parte adopera acqua leggera (l'acqua comune, per intenderci)

sia per rallentare i neutroni, che per trasferire al generatore elettrico il calore prodotto dalla fissione. La maggior parte di questi reattori prende pertanto il nome di "reattori ad acqua leggera".

In ogni centrale nucleare, gli atomi dei metalli pesanti sono consumati man mano che il combustibile "brucia". Anche se le centrali cominciano ad operare con combustibile arricchito di uranio-235, la maggior parte di questo isotopo dell'uranio si esaurisce dopo circa tre anni. Ma il combustibile esausto ha sfruttato solo il 5% degli atomi potenzialmente fissionabili (uranio-235, plutonio e uranio-238), e quindi contiene ancora il 95% circa della sua energia originaria. Inoltre, nel processo di arricchimento (nel corso del quale si aumenta sensibilmente la concentrazione di uranio-235), solo un decimo del minerale di uranio estratto è convertito in combustibile, per cui, negli impianti oggi in attività si sfrutta meno di un centesimo del contenuto totale di energia del minerale. Ciò significa che il combustibile dei reattori termici arrivato a fine ciclo, conserva ancora un elevato potere energetico. E visto che le riserve mondiali di uranio prima o poi finiranno e che la continua crescita del numero di reattori termici potrebbe consumare in pochi decenni le riserve di uranio disponibili a basso costo, non è molto sensato non impiegare il combustibile esausto o gli scarti del processo di arricchimento. Il combustibile esausto è composto da tre tipi di materiali. I prodotti di fissione, che ne costituiscono circa il 5% e comprendono una miscela di elementi più leggeri generati dalla fissione degli atomi di peso atomico maggiore, e con radioattività estremamente elevata, nei primi due anni di vita. Dopo circa dieci anni, l'attività è dovuta soprattutto al cesio-137 ed allo stronzio-90, entrambi solubili in acqua e quindi da isolare in maniera molto efficiente. In circa tre secoli la radioattività di questi isotopi diminuisce di un fattore 100, e a quel punto sono innocui.

Il secondo materiale è l'uranio, che costituisce il grosso del combustibile nucleare esausto, circa il 94%. Trattasi di uranio non scisso, che ha perso gran parte dell'isotopo 235 ed ha una composizione simile all'uranio naturale (che contiene solo lo 0,71% di uranio-235). È leggermente radioattivo e se fosse separato sia dai prodotti di fissione, sia dal resto del combustibile esausto, potrebbe essere immagazzinato in sicurezza, per poi essere utilizzato in impianti che non hanno bisogno di protezione elevata. Il resto, la parte veramente preoccupante, è la componente transuranica del combustibile esausto, ossia gli atomi più pesanti dell'uranio. Questa parte del combustibile è per lo più una miscela di isotopi del plutonio, con una quantità significativa di americio. Anche se gli elementi transuranici formano solo l'1% del combustibile esausto, essi costituiscono la fonte principale dei problemi dovuti alle scorie nucleari. Il tempo di dimezzamento di questi atomi (cioè il periodo dopo il quale la radioattività è diminuita della metà) è di decine di migliaia di anni.

## Una strategia vecchia

I primi ingegneri nucleari avevano previsto che il plutonio contenuto nel combustibile esausto dei reattori termici sarebbe stato asportato per essere impiegato in reattori a neutroni veloci, detti “veloci autofertilizzanti” (o “fast breeder”) in quanto progettati per produrre più plutonio di quanto ne consumano. Inoltre, immaginavano un’economia energetica in cui il plutonio sarebbe stato oggetto di libero commercio. Ma il plutonio può essere usato anche per fabbricare bombe atomiche e con la diffusione della tecnologia nucleare al di fuori delle principali superpotenze nucleari la possibile applicazione militare ha accresciuto il timore di una proliferazione incontrollata, sia ad appannaggio di altri Stati sia di gruppi terroristici.

Nel 1968, il Trattato di non proliferazione nucleare affrontò parzialmente il problema. Le nazioni che volevano beneficiare dei vantaggi derivanti dalla tecnologia nucleare potevano aderire al trattato, impegnandosi a non acquistare armi atomiche, mentre le nazioni che erano riconosciute come potenze nucleari militari si impegnavano ad assistere le altre unicamente per applicazioni pacifiche. Anche se da allora il rispetto del trattato è monitorato da ispettori internazionali, l’efficacia dell’accordo è stata solo parziale, perché manca di una effettiva autorevolezza e di mezzi per garantirne l’applicazione.

Le armi nucleari richiedono un elevato contenuto di plutonio-239. Il plutonio proveniente da centrali elettriche commerciali, di solito contiene una quantità significativa degli altri isotopi del plutonio, il che ne rende difficile l’impiego per scopi bellici, ed il processo di purificazione è molto costoso. Tuttavia tutto ciò non rende impossibile l’uso delle scorie per la costruzione di bombe atomiche. Nel 1977, proprio per questo motivo l’allora presidente americano Carter proibì il riprocessamento del combustibile nucleare impiegato in campo civile. L’idea era che se non si fosse recuperato il plutonio dal combustibile esausto, non sarebbe stato possibile usarlo per costruire bombe. Carter inoltre, voleva essere da esempio per il resto del mondo. Ma Regno Unito, Francia, Russia e Giappone non seguirono gli Stati Uniti, ed oggi, il riprocessamento del plutonio per l’impiego civile continua ad essere una realtà. Quando entrò in vigore il divieto, per “riprocessamento” si intendeva il metodo PUREX (sigla derivata da plutonium uranium extraction), una tecnica sviluppata per soddisfare il bisogno di plutonio puro per uso bellico. La tecnologia dei moderni reattori a neutroni veloci, tuttavia, consente un riciclaggio in cui non si ha mai a che fare con plutonio puro. In questo modo i reattori veloci minimizzano il rischio di un uso bellico delle scorie e allo stesso tempo hanno un’efficienza energetica senza pari. USA, Regno Unito, Russia, Francia e Giappone hanno costruito reattori di questo tipo allo scopo di produrre energia elettrica ed

un paio sono ancora in attività. In figura 2 è mostrato lo schema del reattore veloce di Dounreay, nel Regno Unito.

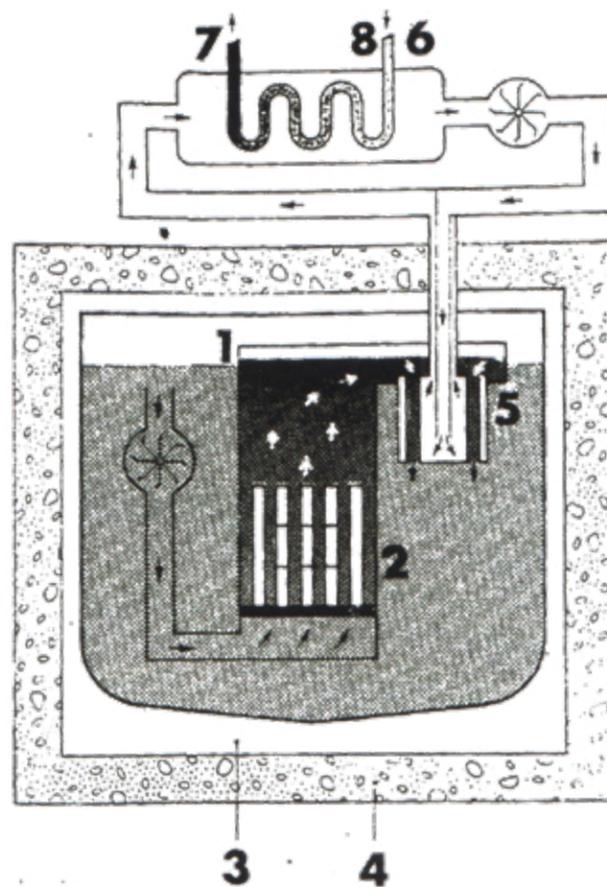


Fig. 2

Reattore di Dounreay (Scozia).

### Legenda

1. Recipiente del reattore;
2. Nocciolo;
3. Vessel;
4. Schermo di calcestruzzo;
5. Scambiatore sodio/sodio
6. Scambiatore sodio/acqua;
7. Uscita vapore;
8. Ingresso acqua.

I reattori veloci estraggono più energia dei reattori termici, perché i loro neutroni ad alta velocità (e quindi ad alta energia) provocano fissioni atomiche con maggiore efficienza rispetto ai neutroni lenti. Questa efficienza deriva da due fenomeni: i neutroni lenti sono assorbiti più facilmente rispetto a quelli veloci in reazioni che non riguardano la fissione; inoltre, ad alte velocità, la fissione di un atomo pesante, come l’uranio-238, è molto più probabile. Per tale ragione, il processo di fissione provocato dai neutroni veloci coinvolgerà anche una

percentuale significativa di atomi transuranici. L’acqua non può essere impiegata per trasferire il calore da un reattore veloce in quanto rallenterebbe la velocità dei neutroni. Per ovviare al problema generalmente si usa un metallo liquido, per esempio il sodio, sia come refrigerante che come mezzo di trasmissione del calore. Il metallo liquido ha un grande vantaggio: i sistemi raffreddati ad acqua operano ad alta pressione; quindi una piccola perdita può svilupparsi rapidamente, provocando il rilascio di grandi quantità di vapore ed eventualmente una rottura delle tubature che causerebbe gravi perdite di refrigerante. I sistemi funzionanti con metallo liquido, invece, operano a pressione atmosferica e quindi vi è una probabilità molto bassa di perdite consistenti. Il sodio però brucia se è esposto all’acqua e quindi deve essere gestito con cautela. Nel corso degli anni è stata accumulata una grande esperienza nell’uso di questo metallo ed i metodi per la sua gestione sono abbastanza sicuri anche se si sono verificati incendi e sicuramente se ne verificheranno altri. Un incendio causato dal sodio si ebbe nel 1995 nel reattore veloce Monju in Giappone. Provocò danni nel fabbricato che conteneva il reattore, ma non mise a repentaglio l’integrità del sistema e non vi furono né morti né contaminati.

I ricercatori dell’Argonne National Laboratory hanno iniziato a sviluppare la tecnologia dei reattori veloci negli anni Cinquanta. Trent’anni dopo la ricerca è stata indirizzata verso un prototipo chiamato ALMR (Advanced Liquid Metal Reactor), reattore avanzato a metallo liquido in cui il combustibile metallico è raffreddato da metallo liquido integrato con un’unità di trattamento pirometallurgico ad alta temperatura, così da riciclare e reintegrare il combustibile. Gli ingegneri hanno comunque studiato anche altri modelli di reattore veloce: in alcuni si impiegano combustibili a base di uranio o plutonio in forma metallica, in altri a base di ossidi. Sono stati usati refrigeranti composti da piombo liquido o da una soluzione di piombo e bismuto. Il combustibile metallico usato nella tecnologia ALMR è preferibile rispetto agli ossidi per diverse ragioni: ha vantaggi nel campo della sicurezza, permette una maggiore rigenerazione di nuovo combustibile e può essere accoppiato più facilmente con il riciclaggio pirometallurgico.

### Funzionamento di un reattore veloce

In un reattore veloce, come già accennato, a causa dell’assenza di un moderatore, i neutroni non sono rallentati. Inoltre il nocciolo è molto piccolo ed il combustibile considerevolmente arricchito in atomi fissili, sia con dell’uranio-235, sia con del plutonio-239. Nel nocciolo vi sono pochi materiali assorbitori di neutroni sia nei materiali strutturali, sia nel refrigerante, col risultato che vi è solo una piccola perdita di neutroni. Questa “economia neutronica” è ancora migliorata da un rivestimento di uranio-238 posto attorno al nocciolo. Ogni neutrone

che sia sfuggito al nocciolo viene assorbito e produce plutonio-239 mediante il processo di decadimento beta. In pratica, un nucleo fertile di uranio-238, bombardato da un neutrone, si trasforma in uranio-239; emettendo un raggio beta si trasforma in nettunio-239 e, dopo avere emesso un altro raggio beta si trasforma in plutonio-239 che come l’uranio-235, è fissile. I neutroni non assorbiti vengono riflessi nel nocciolo. Così, mentre il reattore brucia il suo carico originario di combustibile, esso “genera” altro combustibile dall’uranio-238 posto entro e attorno ad esso. Questo nuovo combustibile può essere separato chimicamente ed usato in altri reattori veloci. Naturalmente anche nei reattori termici un po’ di uranio-238 viene convertito in plutonio-239, ma non con l’efficienza dei reattori veloci. Quest’ultimi, anche se di dimensioni limitate, producono grandi quantità di calore. Il problema che si presenta ai progettisti è quello di trovare materiali che resistano a questo calore intenso, ed in particolare quello di trovare un refrigerante adatto per trasportare il calore dal nocciolo. Per questi reattori, come già detto viene usato il sodio liquido, che fondendo a 98 °C (371 K) e bollendo a 880 °C (1 153 K) è un buon conduttore di calore e ha buone proprietà nucleari. Ma il suo impiego ha reso necessario lo sviluppo di nuove tecnologie per i componenti del circuito di raffreddamento del reattore quali le pompe, i tubi, gli scambiatori di calore e gli strumenti. Uno dei problemi posti dal sodio, per esempio, è quello di mantenerlo puro. Infatti esso scioglie impurità costituite per lo più da ossigeno dalle pareti dei tubi, formando ossido di sodio che è solubile a temperature più alte, ma tende a formarsi nelle parti più fredde del circuito fino a causarne il blocco. Le impurità potrebbero anche aumentare la tendenza alla corrosione delle pareti dei tubi. Si sono perciò sviluppate delle “trappole fredde” in cui precipitano le impurità, progettate in modo da non bloccarsi per questo. Si sono costruite delle pompe meccaniche adeguate alle grandi portate di flusso necessarie nei reattori veloci. Le innovazioni per queste pompe includono un cuscinetto a sfere che opera immerso nel sodio ed è lubrificato dal metallo liquido. Poiché l’emissione di calore di un reattore veloce è forte, il combustibile brucia presto. Infatti in un reattore veloce in un mese vi sono tante fissioni, quante in un reattore lento in un anno. Nei combustibili metallici il danno da irradiazione sarebbe rilevante, ed essi dovrebbero essere rimossi dal reattore entro breve tempo. Si sono perciò cercati dei combustibili che possano resistere meglio alle modifiche causate dai prodotti di fissione: sono miscele di tipo ceramico di ossidi di uranio e di plutonio. Il successo nell’ottenimento di questi nuovi combustibili è stato la chiave del programma britannico dei reattori veloci. Il combustibile di un reattore veloce è dunque costituito da una miscela di ossidi di uranio e plutonio posti entro guaine di acciaio inossidabile. L’energia viene liberata dalla fissione dei nuclei di plutonio e di uranio posti in un campo di flusso neutronico di alta energia,

prodotto in un nocciolo compatto e senza la presenza di un moderatore.

Un reattore autofertilizzante è in grado di produrre contemporaneamente energia e nuovo materiale combustibile. Infatti l'elevato flusso neutronico prodotto nel nocciolo del reattore può essere assorbito da elementi riflettenti posti intorno al nocciolo stesso. Ponendo in questi elementi uranio impoverito (U-238 ottenuto dagli impianti di arricchimento) una rilevante quantità di questo materiale è convertito in plutonio mediante la cattura di un neutrone. È perciò possibile produrre nella zona riflettente più plutonio di quello consumato nel nocciolo, ottenendo appunto in tal modo il processo autofertilizzante. La densità di potenza nel nocciolo di un reattore veloce può raggiungere circa 400 KW/dm<sup>3</sup>. Essendo molto difficile realizzare un flusso di gas o vapore capace di asportare il calore prodotto data l'elevata densità per unità di superficie di scambio, si può come già detto utilizzare per refrigerante un metallo liquido. Il sistema che ha avuto le applicazioni più interessanti è quello che usa come refrigerante il sodio liquido (LMFBR) per l'alta conducibilità termica del sodio e la sua elevata temperatura di ebollizione, già a pressione atmosferica. Sono stati finora proposti e utilizzati due differenti schemi di circuito di refrigerazione. Nel primo schema detto a "loop" ed illustrato in figura 3, il nocciolo è contenuto all'interno di un "vessel" ed il refrigerante è portato dalle tubazioni del circuito primario allo scambiatore intermedio (sodio-sodio); il sodio del circuito secondario è quindi inviato ad un generatore di vapore dove è prodotto vapore surriscaldato ad alta temperatura che viene inviato in turbina.

L'uso dello scambiatore intermedio garantisce che, nel caso di perdite nel generatore di vapore, e conseguente reazione Na-H<sub>2</sub>O, non venga interessato il circuito primario e quindi il nocciolo del reattore. Negli USA ed in Germania sono stati sviluppati reattori di questo tipo. Nel secondo schema detto a "soluzione integrata", riportato in figura 4 il sistema è simile a quello visto nello schema precedente con la differenza che il nocciolo, le pompe di circolazione del sodio primario e lo scambiatore intermedio sono contenuti in un unico contenitore di grandi dimensioni; sono in tal modo ridotte le probabilità di perdite del sistema primario essendo fra l'altro prevista la presenza di un secondo contenitore coassiale che è in grado di assorbire piccole perdite di sodio, rilevandone con un allarme la presenza nell'intercapedine del refrigerante.

Anche nel sistema a "loop" tutti i principali componenti sono provvisti di un secondo contenitore di sicurezza; data comunque la forma geometrica più complessa dell'impianto la sicurezza presentata per le possibili fughe di sodio è minore. Nella "soluzione integrata", il sodio contenuto nella parte inferiore del contenitore, è inviato dalla pompa di circolazione immersa all'ingresso del nocciolo (posto in basso) ed il sodio caldo in uscita fluisce attraverso lo scambiatore intermedio per finire quindi nel contenitore. Dallo scambiatore di calore intermedio, attraverso un circuito secondario, il sodio è inviato nel generatore di vapore. I generatori di vapore

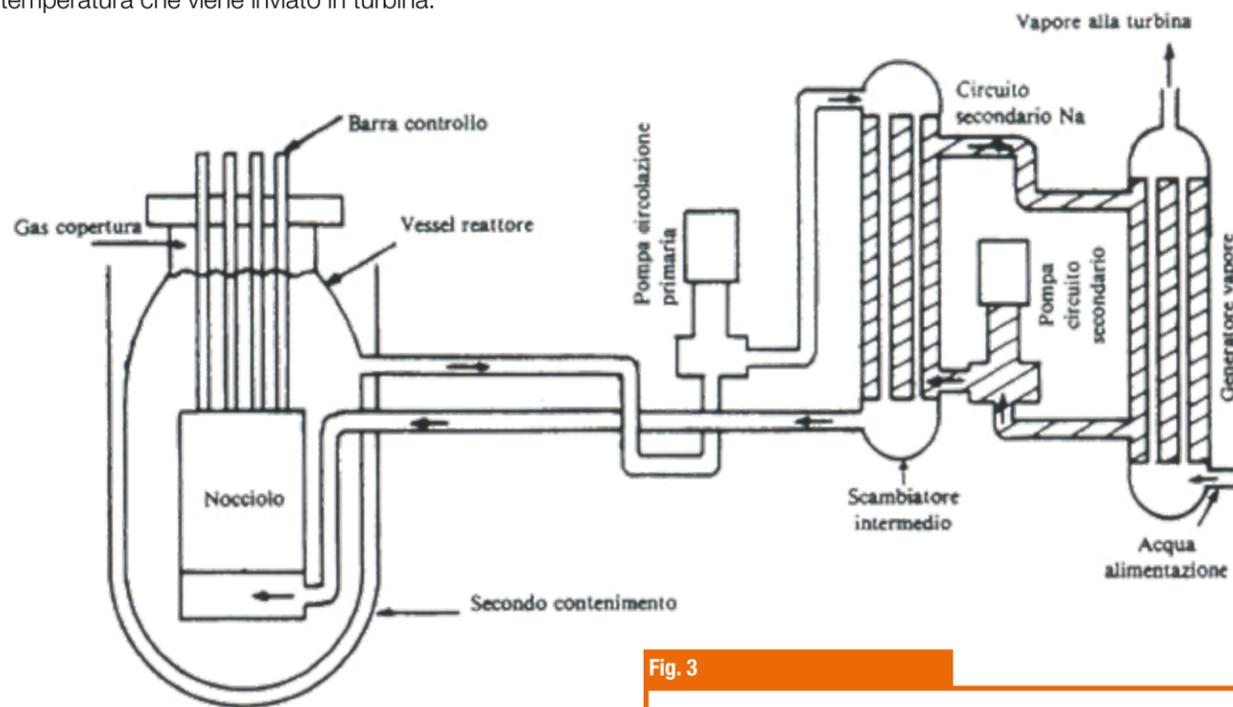


Fig. 3  
Schema del sistema a "loop".

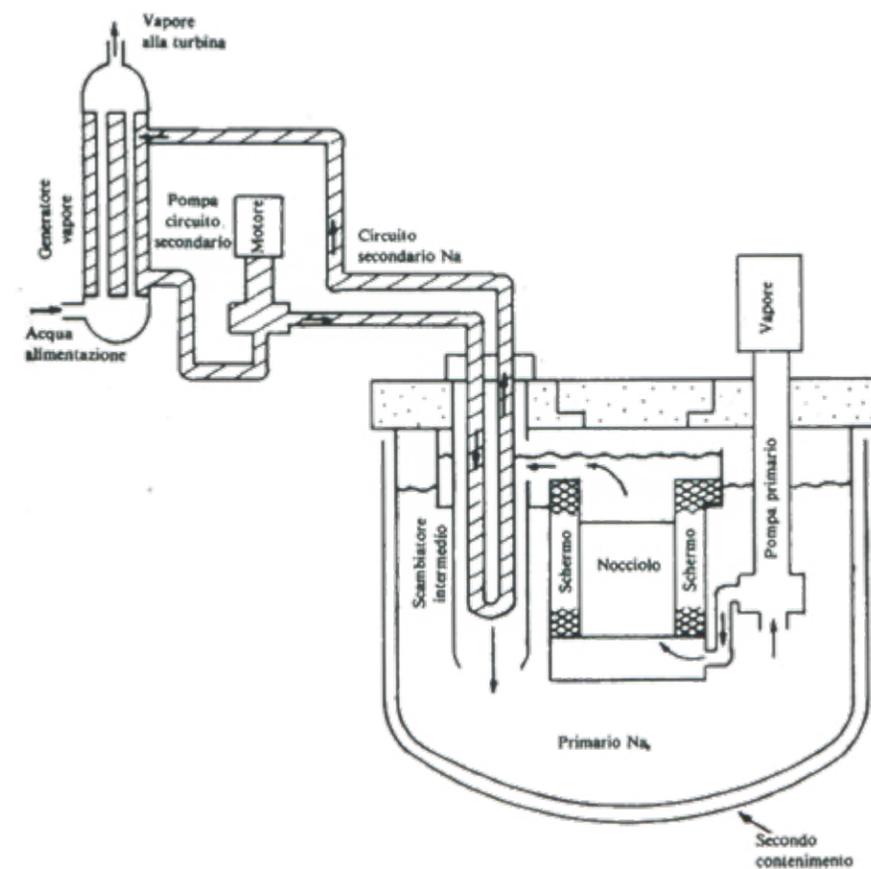


Fig. 4  
Sistema a "soluzione integrata".

costituiscono una delle parti più delicate dell'intero impianto, e sono stati proposti e sperimentati differenti sistemi; alle normali difficoltà di progettazione, legate alle alte temperature presenti, se ne aggiungono altre dovute alle azioni dinamiche alle quali il componente è sottoposto ed alla pericolosità di acqua con conseguente reazione con il sodio.

Un vantaggio notevole degli impianti a sodio è dovuto all'alta temperatura di ebollizione del sodio anche a pressione atmosferica e quindi alla possibilità di costruire componenti che devono sopportare una pressione di pochi bar. Nella Tavola 1 è riportato lo schema del funzionamento di un moderno reattore nucleare a metallo liquido. Trattasi del reattore avanzato a metallo liquido ALMR sviluppato negli anni Ottanta dai ricercatori dell'Argonne National Laboratory. Come tutte le centrali nucleari, l'ALMR sfrutta la catena di reazioni che avvengono nel nocciolo del reattore per produrre il calore necessario a generare energia elettrica. Le centrali nucleari commerciali in attività usano neutroni a velocità relativamente bassa per propagare le reazioni a catena e adoperano come combustibile sia uranio che plutonio. Un sistema basato sull'ALMR, invece, impiega neutroni veloci, in grado di scindere anche i pesanti atomi

transuranici. Il reattore ALMR impiega combustibile ottenuto riciclando quello esausto dei reattori termici, ed ha una maggiore efficienza energetica. Nella maggior parte dei reattori termici, il nocciolo è circondato da acqua per rallentare i neutroni e mantenerlo a bassa temperatura. Nell'ALMR, invece, come refrigerante si usa sodio liquido (1) della Tavola 1. È stato scelto il sodio perché non rallenta significativamente i neutroni veloci e perché conduce molto bene il calore, migliorandone l'efficienza del trasferimento al generatore di elettricità. Il reattore ALMR funziona così: il calore sprigionato dalla reazione di fissione nel nocciolo riscalda il bagno di sodio in cui è immerso. Il sodio riscaldato scorre in un apparato per lo scambio di calore (2) della Tavola 1 dove trasferisce l'energia termica ad altro sodio liquido non

radioattivo che scorre in tubature adiacenti ma separate (3). A sua volta, il sodio non radioattivo trasferisce il calore ad un terzo scambiatore di calore/generatore di vapore (4), dove in tubature piene di acqua si genera vapore. Il vapore ad alta temperatura è poi trasportato verso una serie di turbine, non mostrate nella Tavola 1. Lì, il vapore ad alta pressione fa ruotare le turbine che azionano appositi generatori, producendo elettricità da immettere in rete. Le principali misure di sicurezza per il generatore sono le seguenti quattro:

- Durante il funzionamento, potenti pompe spingono il sodio attraverso il nocciolo. Se vi è un malfunzionamento, la gravità fa comunque circolare il liquido refrigerante;
- Se le pompe di raffreddamento funzionano male, o si fermano, speciali impianti di sicurezza fanno anche sì che una quantità maggiore di neutroni rispetto al normale regime di funzionamento esca dal nocciolo abbassandone la temperatura.
- In caso di emergenza nel nocciolo scendono sei barre di controllo che assorbono i neutroni in modo da spegnere immediatamente il reattore.
- Nel caso in cui le reazioni a catena continuino a procedere, si rilasciano nel nocciolo migliaia di sfere di carburo di boro, capaci di assorbire neutroni, così da garantire l'immediato spegnimento del reattore.



30

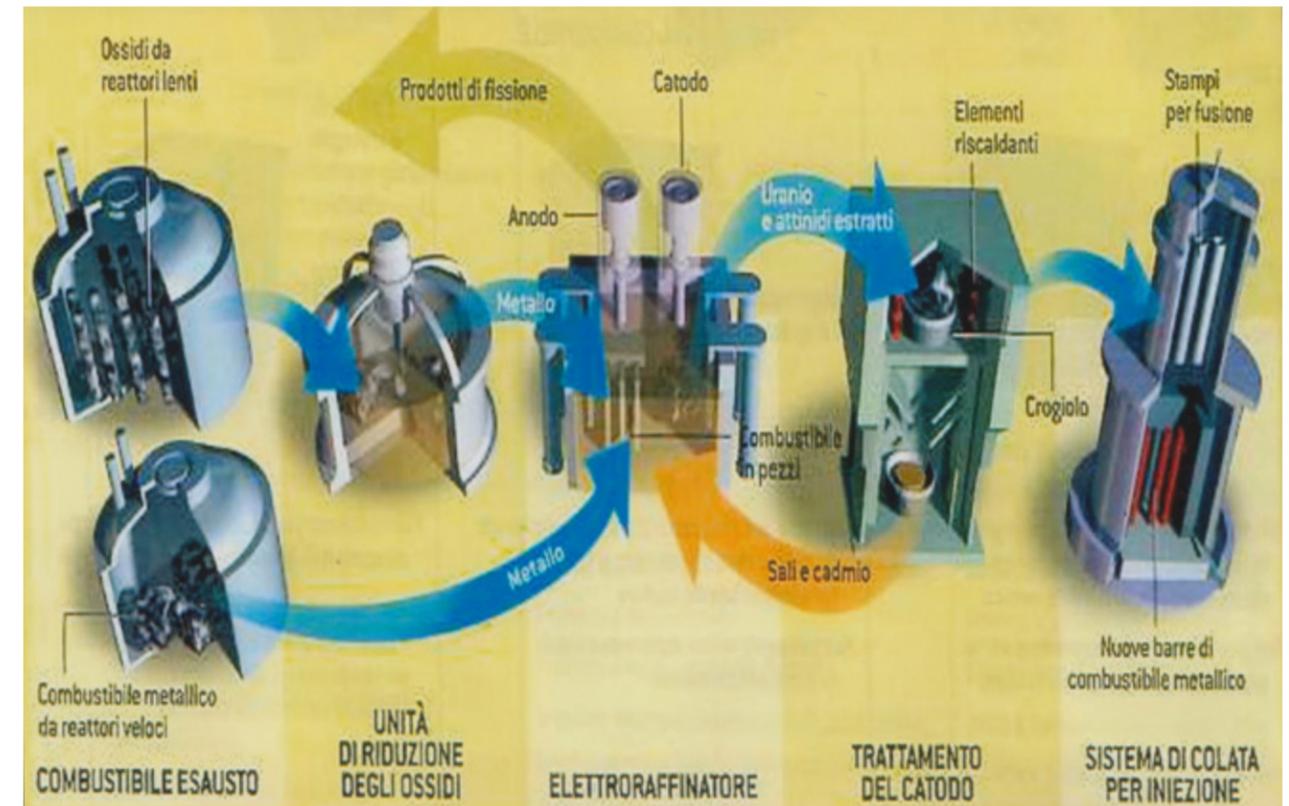
Tavola 1

Schema del funzionamento di un moderno reattore nucleare a metallo liquido.

## Il processo di riciclo

Il trattamento pirometallurgico (abbreviato con il termine "pirotrattamento") estrae dal combustibile esaurito una miscela di elementi transuranici anziché plutonio puro, come invece accade con il metodo PUREX. Si basa sull'elettrodeposizione, ossia sul processo elettrochimico che permette la deposizione su di un elettrodo di un sottile strato di metallo proveniente da una soluzione liquida. Il suo nome deriva dalle alte temperature a cui i metalli devono essere sottoposti durante la procedura. Sono stati sviluppati due tipi di pirotrattamento simili, uno negli Stati Uniti, l'altro in Russia. La principale differenza è che i russi impiegano un combustibile ceramico (un ossido), mentre il combustibile usato nell'ALMR è metallico. Nel pirotrattamento americano (Figura 5) il combustibile metallico esausto è sciolto in un bagno chimico. Una forte corrente elettrica accumula selettivamente su un elettrodo il plutonio e gli altri elementi transuranici insieme ad una parte dei prodotti di fissione e all'uranio. Il grosso dei prodotti di fissione ed una parte dell'uranio restano in soluzione. Quando si è raccolta una determinata quantità di materiale, si rimuove l'elettrodo, quindi si asportano e

si fondono i materiali accumulati, producendo un lingotto che è inviato alla linea di trattamento dove sarà convertito in nuovo combustibile. Quando il bagno si satura di prodotti di fissione, si ripulisce il solvente e si trattano i prodotti in modo da poterli smaltire in modo permanente. A differenza del metodo PUREX, quindi, il pirotrattamento recupera virtualmente tutti gli elementi transuranici (compreso il plutonio) ed una quantità consistente sia di uranio che di prodotti di fissione. Solo una piccolissima percentuale dei componenti transuranici finisce negli scarti finali, il che riduce drasticamente il tempo di isolamento necessario. L'unione degli elementi transuranici e dei prodotti di fissione fornisce un combustibile che non è adatto per usi bellici e neppure per l'uso in reattori termici, ma che può essere riciclato con il pirotrattamento. In un reattore veloce, questo materiale non solo è accettabile ma è addirittura vantaggioso. Anche se la tecnologia del riciclaggio pirometallurgico non è ancora pronta per lo sfruttamento commerciale, ne sono chiari i principi fondamentali. Il riciclaggio del combustibile nei reattori ALMR è stato messo in pratica con ottimi risultati su scala sperimentale in impianti in attività sia negli Stati Uniti che in Russia. Si presti ora attenzione alla figura 5.



31

Fig. 5

Come si ricicla il combustibile nucleare.

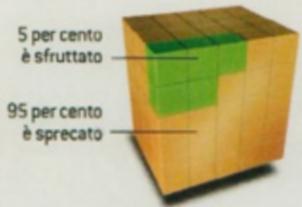
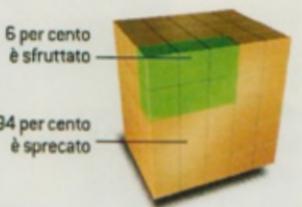
<b>PASSAGGIO SINGOLO</b> Il combustibile, dopo essere stato bruciato in un reattore termico, non è riciclato	<b>RICICLAGGIO DEL PLUTONIO</b> Il combustibile è bruciato in un reattore termico, quindi ne viene estratto il plutonio servendosi del trattamento PUREX	<b>RICICLAGGIO DEL COMBUSTIBILE</b> Il combustibile è riciclato con il trattamento pirometallurgico e bruciato in reattori a neutroni veloci. In fase di prototipo
<b>IMPIEGO DEL COMBUSTIBILE</b>		
 <p>5 per cento è sfruttato 95 per cento è sprecato</p> <p>Combustibile iniziale</p> <p>Sfrutta meno dell'1 per cento di energia del minerale di uranio e circa il 5 per cento dell'energia del combustibile nel reattore termico</p> <p>Non può usare uranio impoverito o uranio proveniente da combustibile esausto</p>	 <p>6 per cento è sfruttato 94 per cento è sprecato</p> <p>Usa meno dell'1 per cento di energia del minerale di uranio e circa il 6 per cento di energia del combustibile del reattore</p> <p>Non può usare uranio impoverito o uranio da combustibile esausto</p>	 <p>5 per cento è impiegato in un reattore termico 94 per cento circa è impiegato in un reattore veloce Meno dell'1 per cento è sprecato</p> <p>Può recuperare più del 99 per cento dell'energia del combustibile esausto di un reattore termico</p> <p>Quando il combustibile esausto del reattore termico è esaurito, può impiegare uranio impoverito per recuperare più del 99 per cento dell'energia contenuta nel minerale di uranio</p>
<b>IMPIANTI E OPERAZIONI</b>		
Rosso: richiede rigorose misure di sicurezza fisiche	Arancio: richiede moderate misure di sicurezza fisiche	Blu: rischi potenziali per le generazioni future
<p>Miniere di uranio</p> <p>Impianto di arricchimento per concentrare l'uranio fissile</p> <p>Impianto di fabbricazione del combustibile</p> <p>Centrali elettriche</p> <p>Stoccaggio temporaneo delle scorie [in attesa dello smaltimento permanente]</p> <p>Struttura di stoccaggio permanente delle scorie in grado di isolarle per 10.000 anni</p> <p>(Non richiede manipolazione del plutonio né operazioni di trattamento delle scorie)</p>	<p>Miniere di uranio</p> <p>Impianto di arricchimento</p> <p>Impianto di miscelazione del plutonio</p> <p>Impianto esterno di fabbricazione del combustibile</p> <p>Impianto esterno di trattamento PUREX</p> <p>Centrali elettriche</p> <p>Stoccaggio temporaneo delle scorie</p> <p>Unità di trattamento delle scorie lontano dalla centrale</p> <p>Struttura di stoccaggio permanente delle scorie in grado di isolarle per 10.000 anni</p>	<p>Fabbricazione del combustibile in loco</p> <p>Sistema di pirotrattamento in loco</p> <p>Centrali elettriche</p> <p>Unità di trattamento delle scorie in loco</p> <p>Struttura di stoccaggio permanente delle scorie in grado di isolarle per 500 anni</p> <p>(Per alcuni secoli non saranno necessarie nuove estrazioni di uranio; non sarà necessario arricchire l'uranio)</p>
<b>DESTINO DEL PLUTONIO</b>		
<p>Accumuli crescenti di plutonio nel combustibile usato</p> <p>Plutonio per uso militare in eccesso degradato solo lentamente, mescolandolo al combustibile fresco</p>	<p>Accumuli crescenti di plutonio sia nel combustibile usato sia in quello disponibile per il commercio</p> <p>Plutonio militare in eccesso degradato solo lentamente, mescolandolo al combustibile fresco</p>	<p>Gli accumuli diminuiscono fino a che rimane solo quello che è utilizzato nei reattori e nel riciclaggio</p> <p>Il plutonio militare in eccesso può essere degradato rapidamente</p> <p>Il plutonio nel combustibile è troppo impuro per essere impiegato per armi atomiche</p>
<b>TIPI DI SCORIE</b>		
<p>Combustibile usato, ricco di energia, isolato in contenitori e strutture sotterranee</p> <p>Le scorie sono sufficientemente radioattive da «proteggersi da sole» per alcune centinaia di anni dal recupero di plutonio-239 da impiegare in armi atomiche</p>	<p>Scorie ricche di energia convertite in forma vetrosa, altamente stabile</p> <p>Le scorie sono sufficientemente radioattive da «proteggersi da sole» per alcune centinaia di anni dal recupero di plutonio-239 da impiegare in armi atomiche</p>	<p>Scorie appositamente trattate che devono rimanere intatte per soli 500 anni, dopo di che il materiale non è più pericoloso</p> <p>Scorie prive di plutonio e per questo motivo non impiegabili per armi atomiche</p>

Tavola 2

Tre cicli a confronto.

Il passaggio chiave del processo pirometallurgico a cui è sottoposto il combustibile nucleare esausto è il trattamento di elettrorefinazione che separa i prodotti di fissione dall'uranio, dal plutonio e dagli altri attinidi (elementi molto pesanti con lunghi tempi di dimezzamento). Gli attinidi sono miscelati con il plutonio in modo da non poterlo impiegare per la costruzione di armi. Il combustibile esausto (ossido di uranio e plutonio) dei reattori termici oggi in funzione è sottoposto ad un processo di riduzione degli ossidi per trasformarlo in metallo, mentre quello proveniente da reattori veloci (uranio e plutonio) è indirizzato all'elettrorefinazione. Una volta terminato il trattamento, uranio ed attinidi sono inviati al catodo per eliminare i sali residui ed il cadmio, aggiunti durante il processo di raffinazione. L'uranio e gli attinidi rimanenti sono fusi per produrre nuovo combustibile. Le capacità operative dei reattori termici e di quelli veloci sono simili per alcuni aspetti ma enormemente differenti per altri (si veda a tal proposito la Tavola n.2).

Per esempio, un impianto elettrico da 1 000 megawatt, basato su un reattore termico, genera più di 100 t (980'600 newton) di combustibile esausto all'anno. Gli scarti di un reattore veloce con la stessa produzione di elettricità invece, corrisponderebbero a poco più di una tonnellata di prodotti di fissione, più tracce di elementi transuranici. Il trattamento degli scarti sarebbe molto più semplice se fosse impiegato il ciclo ALMR, perché gli scarti dei reattori veloci non contengono quantità rilevanti di elementi transuranici con lunghi tempi di decadimento. La loro radioattività scenderebbe al livello del minerale grezzo da cui erano stati ricavati in alcuni secoli anziché in migliaia di anni. Se si usassero esclusivamente reattori veloci, sarebbe necessario spostare materiali altamente radioattivi solo in due circostanze: in occasione del trasporto ai siti di stoccaggio delle scorie costituite dai prodotti di fissione, e del trasporto del combustibile iniziale presso un nuovo reattore. Di fatto il commercio illegale di plutonio sarebbe impossibile. Alcuni caldeggiano l'adozione da parte degli Stati Uniti di un programma di trattamento PUREX del combustibile dei reattori, in modo da creare ossidi misti di uranio e di plutonio che possano essere riutilizzati nei reattori termici. Anche se il metodo degli ossidi misti (MOX) è attualmente impiegato per deteriorare il plutonio bellico in eccesso, sarebbe un errore allestire l'infrastruttura PUREX necessaria a trattare il combustibile per uso civile. Il guadagno di risorse sarebbe modesto, mentre i problemi a lungo termine relativi alle scorie rimarrebbero ed il tutto rimanderebbe solo di qualche tempo la necessità di adottare reattori veloci efficienti. Il sistema di reattori veloci con trattamento pirometallurgico è decisamente versatile. Nella produzione di plutonio può dare un bilancio netto, positivo o negativo, ma può essere fatto funzionare anche in modo da rimanere in pareggio. Impiegato come produttore di plutonio, il sistema sarebbe in grado di fornire i materiali iniziali per altri reattori veloci. Impiegato come consumatore, invece, sarebbe in grado di smaltire sia il plutonio sia i materiali per uso militare in eccesso. Se si sceglie un funzionamento in

pareggio, l'unico combustibile addizionale di cui una centrale nucleare avrebbe bisogno sarebbe un'aggiunta periodica di uranio impoverito (uranio da cui è stata tolta la maggior parte di uranio-235) per sostituire gli atomi di metalli pesanti che sono stati scissi. Studi di mercato indicano che questa tecnologia è competitiva rispetto alle tecnologie nucleari già esistenti. Alcuni processi di riciclaggio pirometallurgico saranno molto meno dispendiosi del trattamento PUREX, ma per stabilire con certezza la praticabilità economica di questo sistema bisognerà attendere il suo funzionamento su scala reale. Gli aspetti economici complessivi di qualsiasi fonte di energia dipendono sia dai costi diretti sia da ciò che gli economisti chiamano "esternabilità", ovvero quei costi difficili da quantificare e dovuti a effetti esterni derivanti dall'uso della tecnologia. Per esempio, quando bruciamo carbone o petrolio per generare elettricità, la nostra società subisce gli effetti nocivi sia per i problemi di salute sia per i costi ambientali derivanti dall'impiego di quei combustibili.

All'inizio della loro attività, i moderni reattori veloci sfrutterebbero il combustibile esausto proveniente dai reattori termici e riciclato con la tecnica del pirotrattamento. Oggi queste scorie sono conservate nelle centrali dove sono prodotte. Per poterle impiegare come combustibile devono essere trasportate in impianti e trattate in modo da generare tre tipi di prodotti. Il primo, altamente radioattivo, conterrebbe la maggior parte dei prodotti di fissione, insieme ad inevitabili tracce di elementi transuranici. Gli sarebbe data una forma fisica stabile (una sostanza vetrosa) e quindi sarebbe trasferito in un sito di stoccaggio permanente.

Il secondo prodotto comprenderebbe tutti gli elementi transuranici, insieme a parte dell'uranio e dei prodotti di fissione. Mediante pirotrattamento sarebbe convertito in combustibile metallico per reattori veloci e poi trasferito ad un reattore ALMR.

Il terzo sarebbe composto dal 2% circa di combustibile esausto dei reattori termici, conterrebbe il grosso dell'uranio, ma in forma impoverita, e potrebbe essere immagazzinato per poi essere usato come carburante per reattori veloci. Tutto ciò non può essere messo in pratica da un giorno all'altro. Se cominciasimo oggi, il primo dei reattori veloci entrerebbe in attività fra 10 o 15 anni. Quando i reattori termici attualmente in uso raggiungeranno la fine del loro ciclo di vita potranno essere sostituiti con reattori veloci. Se ciò accadrà, per i prossimi secoli non avremo bisogno né di estrarre altro minerale di uranio, né di arricchirlo. A lungo termine il riciclaggio del combustibile dei reattori veloci, sarà così efficiente che le scorie di uranio attualmente disponibili durerebbero per un tempo indeterminato.

In futuro solo l'energia nucleare potrà soddisfare i bisogni energetici dell'umanità a lungo termine preservando l'ambiente. Le scorte di combustibile dovranno tuttavia durare a lungo per consentire di continuare con la

# Energia nucleare

produzione di energia nucleare su larga scala. Ciò significa che il ciclo dell'energia nucleare deve avere le caratteristiche di un processo basato sull'ALMR e sul pirotrattamento. Ed il momento giusto per intraprendere questa nuova strada è il periodo che stiamo vivendo.

## Bibliografia

1. Hannum William, Gerald E. Marsh, Stanford George, La nuova generazione dei reattori nucleari, Le Scienze n.452, Aprile 2005;
2. Cohen B.L. Breeder Reactors: A Renewable Energy Source, in "American Journal of Physics"
3. Hannum W.H. (a cura di), The Technology of the Integral Fast Reactor and Its Associated Fuel Cycle, in "Progress in Nuclear Energy, Vol.31, nn.1-2,1997.
4. Blom Justin e Seaborg Glenn, I reattori convertitori veloci, Le Scienze, n.30, febbraio 1971.
5. Stanford G., Integral Fast Reactors: Source of Safe, Abundant, Non-Polluting Power, National Policy Analysis Paper, n.378, dicembre 2001. Disponibile all'indirizzo [www.nationalcenter.org/NPA378.html](http://www.nationalcenter.org/NPA378.html).
6. Stanford G., LWR Recycle: Necessity or Impedent?, in "Proceedings of Global 2003", New Orleans, novembre 2003. Disponibile all'indirizzo [www.nationalcenter.org/LWRStanford.pdf](http://www.nationalcenter.org/LWRStanford.pdf).
7. Dubberly A. e altri, S-PRISM Fuel Cycle Study, in "Proceedings of ICAPP'03", Cordoba, Maggio 2003.
8. Thompson T.G. e Beckerley J.G. (a cura), The Technology of Nuclear Reactor Safety, vol.1: Reactor Physics and Control, the MIT Press.
9. Yevick John G. (a cura), Fast Reactor Technology: Plant Design, The MIT Press.
10. Bethe Hans, L'energia da fissione è ancora indispensabile, Le Scienze, numero 93, maggio 1976.



Lascia il tuo commento a questo link:

<https://www.editorialedelfino.it/la-nuova-generazione-dei-reattori-veloci.html>