

I REATTORI NUCLEARI HTR NELLA PROSPETTIVA ENERGETICA FUTURA

Nicola CERULLO *, Guglielmo LOMONACO **, Vincenzo ROMANELLO ***

* *Già Professore Ordinario di “Reattori Nucleari Avanzati” presso l’Università di Genova; già Professore Associato di “Impianti Nucleari” e libero docente confermato in “Fisica del Reattore Nucleare” presso l’Università di Pisa*

** *Ingegnere Nucleare, Dottorato di Ricerca in “Ingegneria Elettrica e Termica”, Assistant Professor presso l’Università di Genova*

*** *Ingegnere Nucleare – orientamento “Impianti Nucleari Innovativi”, Dottorato di Ricerca in “Ingegneria dei Materiali”, ricercatore presso il Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in Germania*

INTRODUZIONE

Gli ultimi anni del XX secolo sono stati sicuramente segnati da notevoli cambiamenti sociali ed innovazioni tecnologiche: queste ultime, insieme ad un generale miglioramento delle condizioni di vita, hanno però portato anche ad una crescita vertiginosa nel campo dei consumi [1].

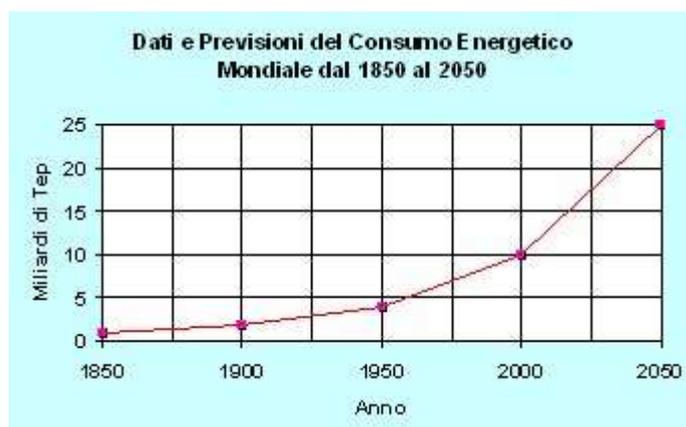


Figura 1

Non fa eccezione l’ambito energetico come risulta dal grafico riportato in Figura 1, che riporta il consumo Energetico Mondiale dal 1850 al 2050. Basti pensare che se i consumi mondiali di energia nel 1850 si attestavano attorno ad un miliardo di tonnellate equivalenti di petrolio (TEP), nel 1900 salivano a 1.8 miliardi di TEP, hanno raggiunto i 10 miliardi nel 2000 [2] e si prevede (per difetto) che arriverà a più di 25 miliardi nel 2050. Da questi numeri risultano chiari i termini del problema dell’approvvigionamento energetico.

Nel vertice mondiale sullo sviluppo sostenibile tenutosi a Johannesburg nel 2002 è emerso che l’energia rappresenta allo stesso tempo sia il problema che la soluzione: essa è indispensabile per lo sviluppo, ma un sicuro ed economico approvvigionamento energetico, ed il conseguente impatto ambientale legato alla sua produzione, possono rappresentare talora una questione di difficile soluzione. Oggi sono circa due miliardi le persone che non hanno accesso a forniture di energia, ma si auspica che questo numero sia destinato a diminuire. L’aumento della richiesta di energia entro il 2050 sarà legato a:

- generale aumento della popolazione;
- aumento della popolazione che abiterà in centri urbani [3];
- aumento generale del benessere;
- aumento “esplosivo” dei paesi in via di sviluppo (ad esempio, il consumo pro capite di paesi come Cina e India si aggira oggi intorno ad 1/10 di quello degli USA [3]);
- comodità e versatilità dell’energia elettrica.

Rebus sic stantibus quasi tutti i paesi sono oggi attivamente impegnati nella ricerca di nuove fonti di energia. Per il benessere di tutti è necessario che tali fonti siano immuni da monopoli, a basso prezzo, disponibili e, soprattutto, compatibili con l’ambiente.

Il requisito prima citato della disponibilità è di primaria importanza in quanto, oltre all’aumento della richiesta di energia dovuta all’elevazione del tenore di vita dei paesi sviluppati, bisogna tenere conto della prevedibile aumentata richiesta da parte dei paesi in via di sviluppo che è la quota che inciderà maggiormente sull’aumento totale [3].

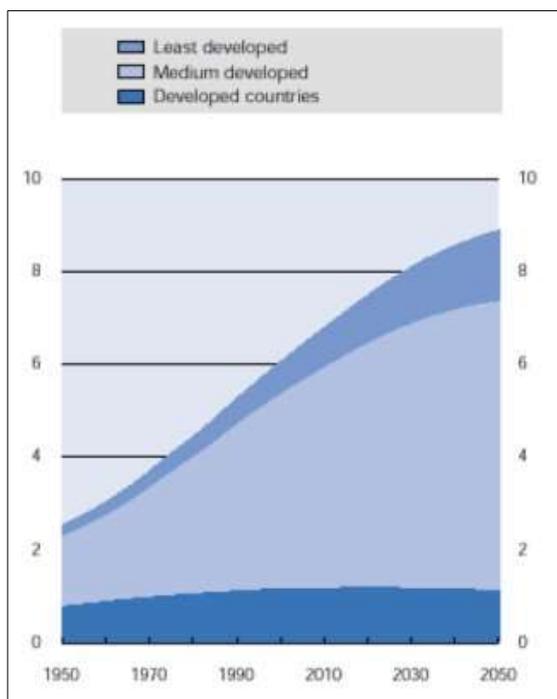


Figura 2

Nella Figura 2 è riportata una illustrazione della crescita effettiva e prevedibile della popolazione mondiale riferita ai paesi sviluppati, in via di sviluppo e sottosviluppati. Questa figura, drammatica nella sua evidenza, mette in luce l'improcrastinabilità della questione energetica, sia dal punto di vista della disponibilità delle risorse che dell'impatto ambientale.

Last but not least, non deve essere dimenticato sia il trend dei prezzi dei prodotti petroliferi che, soprattutto in questi ultimi tempi anche per motivi politici, è in continuo rialzo sia, in un quadro più realistico, la prospettiva, in tempi medio-brevi, di esaurimento delle scorte [5]. Non vada sottaciuta inoltre l'importante considerazione che sia il metano che il petrolio rappresentano dei preziosi elementi di sintesi, essenziali e sostanzialmente insostituibili per molti procedimenti tecnologici. Quindi il loro attuale bruciamento appare anche termodinamicamente insensato.

Alla luce di quanto esposto, appare evidente l'importanza presente, ma soprattutto futura, del ruolo ricoperto nell'ambito del panorama internazionale dall'energia nucleare.

Infatti anche dopo l'incidente di Chernobyl (26 aprile 1986) la produzione di energia nucleare nel mondo è continuata a crescere (aumento del 44% da allora ad oggi). Si può rilevare che attualmente ci sono 31 nuove centrali in costruzione [6]. L'energia nucleare copriva meno del 3% del fabbisogno elettrico nel mondo nel 1971, valore che è salito a circa il 16% nel 2003 (Figura 3).

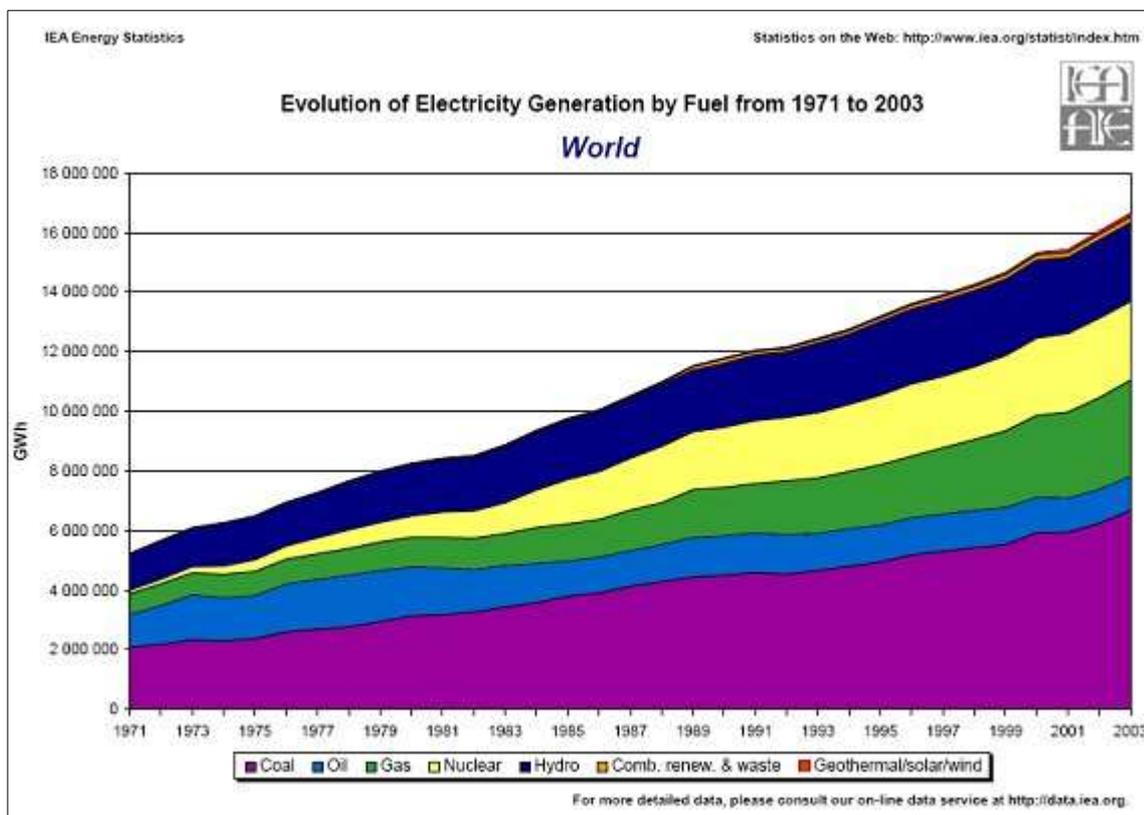


Figura 3

In Italia, al contrario, l'opzione nucleare è stata completamente abbandonata con conseguente perdita, oltre che di una fonte di energia, anche del know-how e della capacità delle nostre industrie di lavorare nel settore. Comunque sono in corso in Italia, seppur in maniera ancora troppo limitata, ripensamenti su questa decisione. Anche se, per timore di sembrare non "politically correct", nessuno ha il coraggio di formulare proposte concrete, una spinta al ritorno al nucleare viene oggi dagli stessi ambientalisti che si sono resi conto che questa forma di energia è quella realmente meno inquinante [7]. Infatti, in un recente articolo scritto da James Lovelock sull'Independent e ripreso dall'Unità [7], il "guru" verde, autore dell'ipotesi di Gaia, chiaramente afferma, "senza se e senza ma", che la via nucleare è l'unica che possa salvarci da un tracollo generale. Egli taglia corto con le molto futuribili fonti di energia rinnovabili e conclude, che solo un uso massiccio dell'energia nucleare è l'unica decisione possibile. Citiamo testualmente due righe che sintetizzano il senso dell'articolo: "We have no time to experiment with visionary energy sources; civilisation is in imminent danger".

Ciò premesso, si ritiene opportuno sottolineare che, fra i vari progetti proposti nell'ambito degli impianti nucleari, sempre maggior interesse suscita, a livello internazionale, la filiera dei reattori nucleari a gas ad alta temperatura (HTR o HTGR come questi reattori sono chiamati, rispettivamente, in Europa e negli Stati Uniti).

In realtà, per vari motivi, legati soprattutto alla realizzazione negli anni '50 di reattori ad acqua leggera per i sommergibili a propulsione nucleare, il reattore HTR a ciclo diretto, il primo ad essere proposto subito dopo l'esperimento di Fermi [8], è stato ingiustamente trascurato con conseguente mancato sviluppo.

Il presente articolo dunque, riprendendo la tematica già affrontata nel 1994 [8], si propone di illustrare i più recenti e significativi sviluppi (anche sperimentali) in questo campo e le promettenti prospettive future. Tra queste la possibilità di produrre idrogeno e quella di contribuire a ridurre significativamente la pericolosità potenziale a lungo termine delle scorie nucleari.

I RECENTI SVILUPPI DEI REATTORI A GAS AD ALTA TEMPERATURA

In un articolo pubblicato nel 1994 [8] è stata illustrata l'evoluzione storica di questa filiera di reattori fino alla metà degli anni '90 e sono stati forniti i dati tecnici principali dell'epoca.

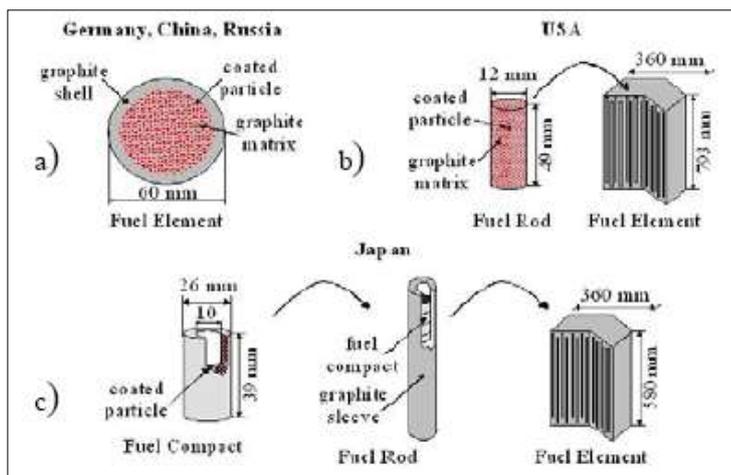


Figura 4

- tipo a sfera o Pebble (omogenea distribuzione delle CP nelle pebble stesse, Figura 4a);
- tipo a blocchi o Block type (CP concentrate in compact costituenti le barrette a loro volta inseriti in un matrice di grafite, Figura 4b);
- tipo Pin-in-Block (dove i compact, simili ai precedenti, sono però forati centralmente ed incamiciati prima di essere inseriti in un matrice di grafite, Figura 4c).

Da un punto di vista impiantistico, negli anni '90 gli HTR hanno subito un importante sviluppo, quando, tornando all'originaria concezione di Daniels del 1944 [8], è stato eliminato il ricorso ad un ciclo secondario con il vapor d'acqua, impostando il ciclo diretto di elio in turbina [9]. Nel decennio trascorso vi sono state una serie di innovazioni, tra cui la più significativa è quella di poter raggiungere elevati tempi di irraggiamento (*ultra high burnup*) grazie a miglioramenti nella costruzione dell'elemento combustibile e nella scelta della sua composizione. In questi anni il reattore è passato da una fase di prudente attesa ad una rinascita evidenziata dalla presenza, in varie zone del mondo, di nuovi progetti per alcuni dei quali i prototipi sperimentali sono già operativi [10].

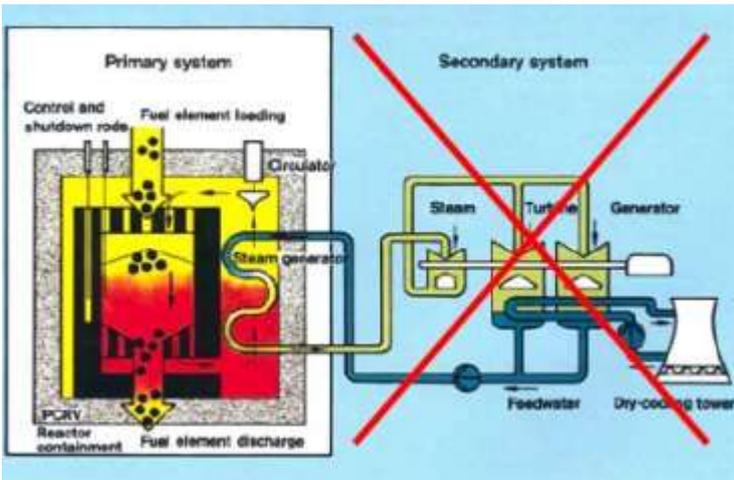


Figura 5

Nella Figura 5 è evidenziata l'evoluzione del reattore con la semplificazione conseguente all'eliminazione del circuito secondario ad acqua dei reattori HTR di vecchio tipo (parte destra della figura).

Tale modifica è stata possibile grazie ai nuovi materiali resisi nel frattempo disponibili ed in particolare ai nuovi acciai e superleghe al nichel per le turbine che rendono compatibile l'uso di elio, anche a temperature superiori ai 900°C. Questo miglioramento ha portato una serie di rilevanti vantaggi:

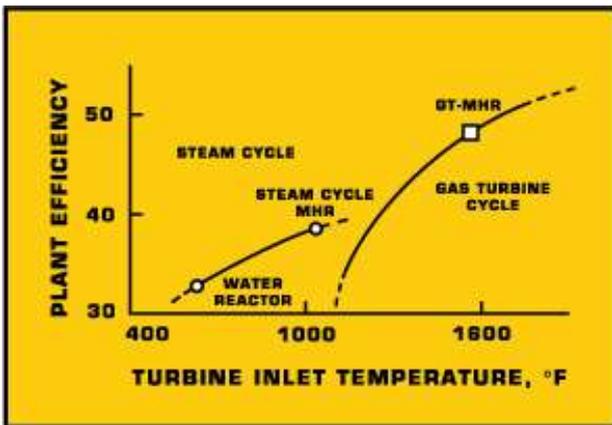


Figura 6

- Aumento del rendimento dal 30-35% a circa il 50% con lo sfruttamento integrale dell'elevata temperatura di uscita del refrigerante dal nocciolo (la Figura 6 mostra questo aumento con l'uso del ciclo diretto. A sinistra il ciclo a vapore, a destra quello a gas [11]);
- Notevole semplificazione impiantistica (Figura 7) con conseguenti ulteriori vantaggi in termini di sicurezza e di costi. In tale figura, infatti è rappresentata la schematizzazione sommaria dei componenti di un reattore nucleare ad acqua leggera "classico" (LWR) e viene evidenziato quali di questi sono eliminati in un HTR a ciclo diretto [11];
- Aumento della sicurezza, con l'esclusione della possibilità di ingresso di acqua nel nocciolo;
- Diminuzione dei costi di impianto.

Questa filiera di reattori è stata presa in considerazione fra quelle candidate per l'impiego in un prossimo futuro in campo mondiale, caratterizzate da una elevata sicurezza intrinseca, da impatto ambientale pressoché nullo e da un costo dell'energia prodotta competitivo anche con i cicli combinati (la Figura 8 mostra la comparazione dei costi di impianto fra il ciclo combinato, LWR e HTR [11]).

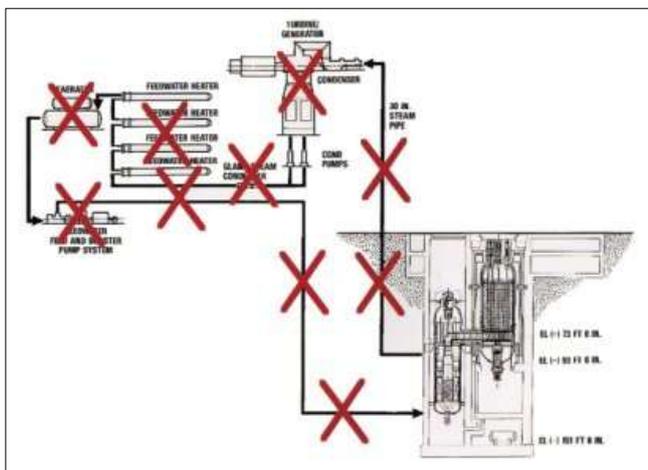


Figura 7

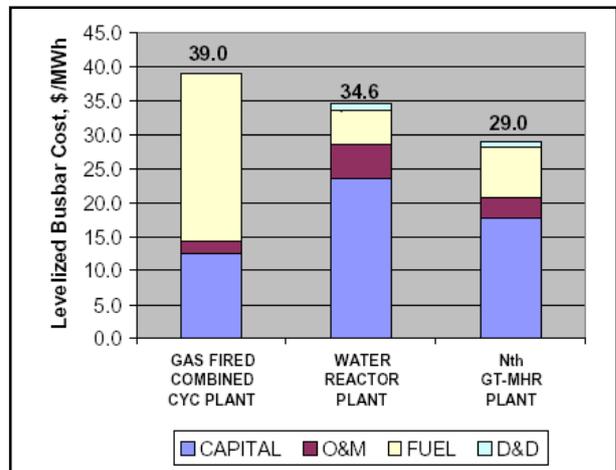


Figura 8

Ricerche su questa filiera sono in corso anche nella Comunità Europea (EC) nell'ambito del quinto e del sesto programma quadro [12][13]. Nella Figura 9 sono simbolicamente riportati i loghi delle organizzazioni partecipanti alle ricerche al programma RAPHAEL sugli HTR nell'ambito del 6° Programma Quadro della EC.



Figura 9

I REATTORI HTR SPERIMENTALI

In ambito mondiale sono stati realizzati e sono in funzione due reattori sperimentali, uno in Giappone della JAERI [14] del tipo a blocchi (HTTR) ed un altro in Cina dall'INET dell'Università di Tsinghua [15] del tipo a pebble (HTR-10). La costruzione del reattore HTTR refrigerato ad elio e moderato a grafite è stata decisa allo scopo di migliorare la tecnologia di base degli HTR e condurre ricerche di tipo innovativo ad alte temperature. La costruzione del reattore, nonché tutta la serie di test in esso svolti, sono frutto di un'ampia collaborazione internazionale (Figura 10).



Figura 10

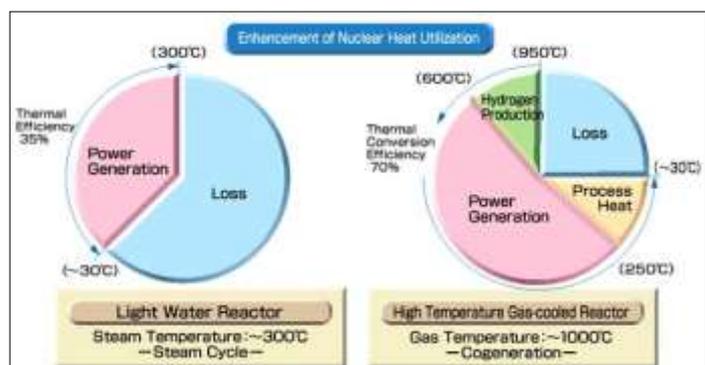


Figura 11

Attualmente il reattore è in funzione e già numerose esperienze sono state condotte utilizzando tale impianto. In particolare è importante sottolineare che questo reattore è stato assunto come base per lo studio della possibilità di utilizzare gli HTR per la produzione di idrogeno (la Figura 11 mostra il diagramma comparativo sulla possibilità di utilizzazione del calore prodotto in un LWR ed in un HTR con particolare riguardo alla produzione di idrogeno).



Figura 12

Il secondo reattore sperimentale HTR in avanzata fase di sviluppo è invece, come già detto, di tipo a pebble (la Figura 12 mostra l'edificio del reattore cinese HTR-10).

Il design di questo reattore prende spunto dai precedenti progetti tedeschi (SIEMENS/FRAMATOME) e nasce come joint-venture fra Cina e Germania. È stato costruito a nord-est della città di Pechino e, nonostante alcuni ritardi, è arrivato ormai alla fase dell'effettuazione dei primi esperimenti. Anche esso si è avvalso di un'ampia collaborazione internazionale ed è stato progettato per condurre una serie di esperimenti, fra cui:

- *irradiazione per combustibile e per i materiali;*
- *controllo dell'eventuale rilascio di prodotti di fissione dalle microsferi (CP);*
- *sfruttamento del calore di processo di origine nucleare.*

I NUOVI PROGETTI DI REATTORI HTR COMMERCIALI

Nel paragrafo precedente abbiamo illustrato le realizzazioni sperimentali. Esse devono servire per fornire i dati necessari alla progettazione degli impianti industriali di questo tipo. Da rilevare che una delle caratteristiche comuni a questi reattori è la taglia relativamente ridotta (centinaia di MWt) con la possibilità del loro utilizzo modulare. Dal punto di vista delle attuali tendenze, sono sostanzialmente in avanzata fase di studio tre tipologie di HTR:

- *il reattore GT- MHR (studiato principalmente dalla General Atomics e da un consorzio russo);*
- *il reattore PBMR (tipo a pebble della sudafricana ESKOM);*
- *il reattore VHTR a ciclo indiretto (proposto da AREVA-FRAMATOME).*

Ripetiamo che, tutti gli HTR moderni presentano notevoli punti di forza:

- *sono economici da costruire;*
- *sono economici da esercire;*
- *hanno ridotti tempi di costruzione;*
- *sono assolutamente esenti da emissioni di gas serra.*

Comunque la caratteristica più rilevante di questi reattori è costituita dalla loro intrinseca sicurezza, legata a:

- *uso delle particelle rivestite negli elementi di combustibile (TRISO CP) che assicurano una elevata capacità di ritenzione dei prodotti di fissione;*
- *uso della grafite quale moderatore (stabile fino a 2800 °C, ben al di sotto dei 1600 °C, temperatura massima di progetto);*
- *uso dell'elio come refrigerante (gas nobile che praticamente non subisce attivazione neutronica durante il funzionamento);*
- *bassa densità di potenza e grande capacità termica (transitori lenti).*

GT-MHR

Il reattore GT-MHR della General Atomics costituisce probabilmente il primo progetto commerciale di reattore HTR "moderno". Fra le sue peculiarità, va evidenziata l'estrema compattezza dell'intero impianto costituito da due soli recipienti in pressione collegati da un'unica tubazione (Figura 13); questo risultato è stato possibile anche grazie alla decisione di calettare la turbina, i compressori e l'alternatore su di un unico albero. Tutta una serie di componenti per questo reattore sono state sviluppate o sono in fase avanzata di studio.

Molto interessante anche dal punto di vista della sicurezza è la soluzione adottata di costruire l'intero impianto completamente sotto il livello del suolo (Figura 14), soluzione possibile anche grazie alla sua piccola taglia. In questo modo è possibile permettere la rimozione passiva del calore residuo in situazioni incidentali mediante conduzione e di aumentare la sicurezza del contenimento. Infine è importante rilevare la relativa semplicità dell'impianto con conseguenti ovvie semplificazioni in fase di controllo e regolazione dello stesso.

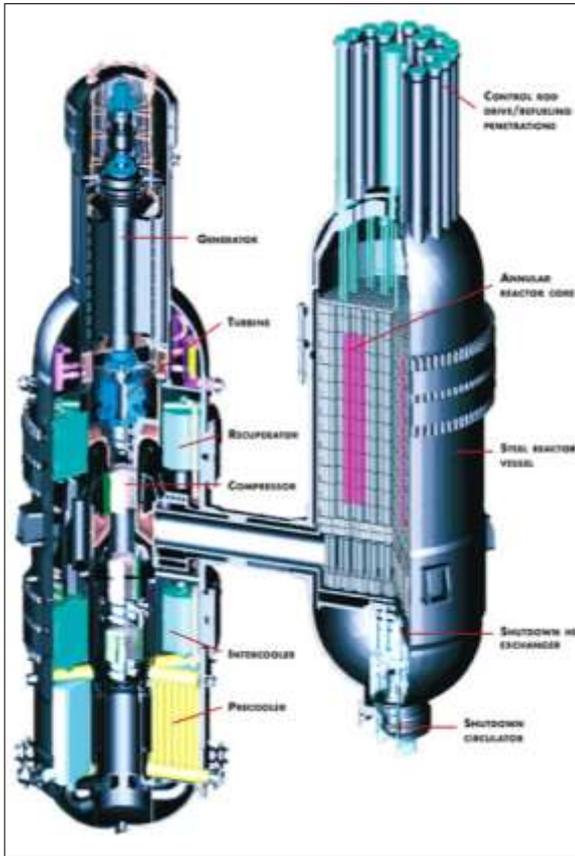


Figura 13

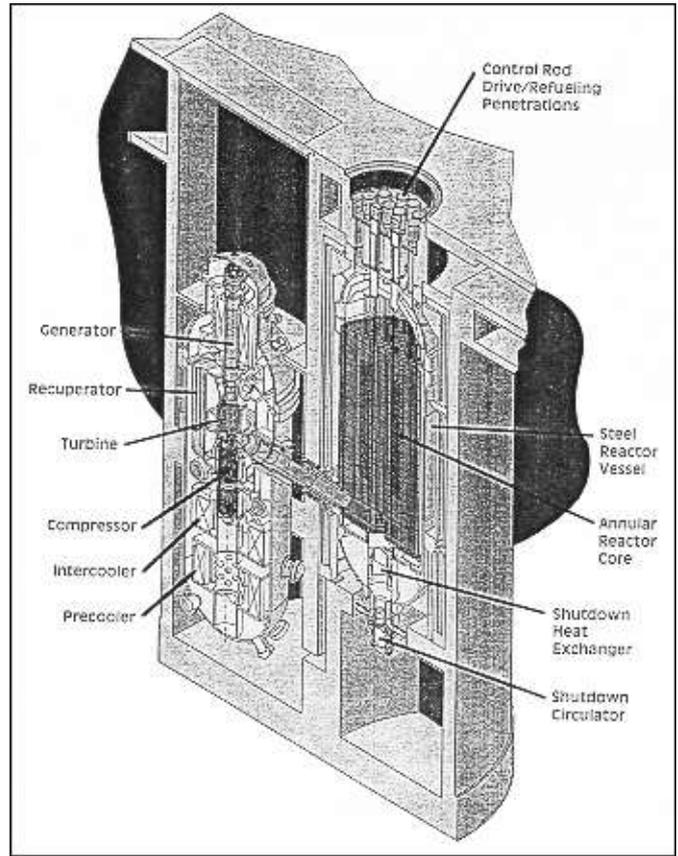


Figura 14

PBMR

Tra gli sviluppi recenti occorre menzionare che la Eskom, compagnia della Repubblica Sudafricana che fornisce il 95% dell'energia elettrica del paese, ha varato nel 1993 il progetto di un reattore modulare ad alta temperatura: il PBMR [16] (*Pebble Bed Modular Reactor*) (Figura 15).

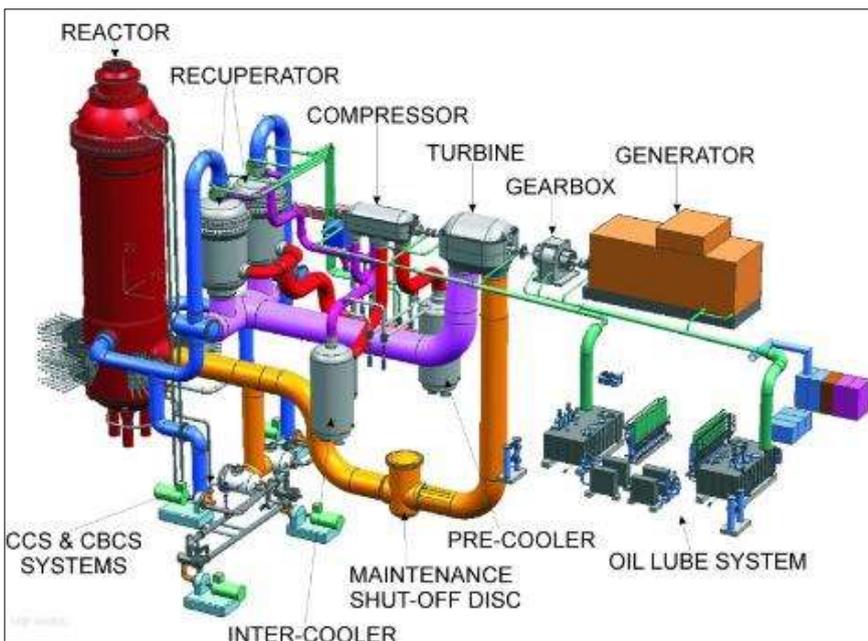


Figura 15

Esso ha rappresentato una sorta di evoluzione fra i reattori "classici" e gli HTR di concezione avanzata; in questo modello di reattore si avevano tre distinti recipienti in pressione, uno per ciascuna delle turbine (alta, media e bassa pressione). Tale soluzione consentiva di limitare le sollecitazioni meccaniche nel gruppo turboalternatore, ma ha reso indubbiamente più complessa la disposizione impiantistica con un aumento delle tubazioni presenti per collegare le varie parti dell'impianto. Ultimamente (nel 2005) il progetto è stato modificato rendendo sicuramente meno complessa la concezione impiantistica.

In aggiunta a ciò, va altresì sottolineato che questo reattore è attualmente giunto ad uno stadio molto avanzato nell'ambito del processo dell'iter autorizzativi che porta al permesso di esercizio l'impianto (*licensing*) presso l'autorità di controllo sudafricana. Questo tipo di reattore presenta la peculiarità di permettere una ricarica continua del combustibile: non è quindi necessario disporre di un grande eccesso di reattività iniziale nel nocciolo, con conseguenti vantaggi in termini di sicurezza.

VHTR (AREVA)

Il reattore VHTR (*Very High Temperature Reactor*) a gas, ma con ciclo indiretto (Figura 16), è stato recentemente proposto dall'AREVA (consorzio formato da varie società fra cui FRAMATOME, COGEMA, etc.).

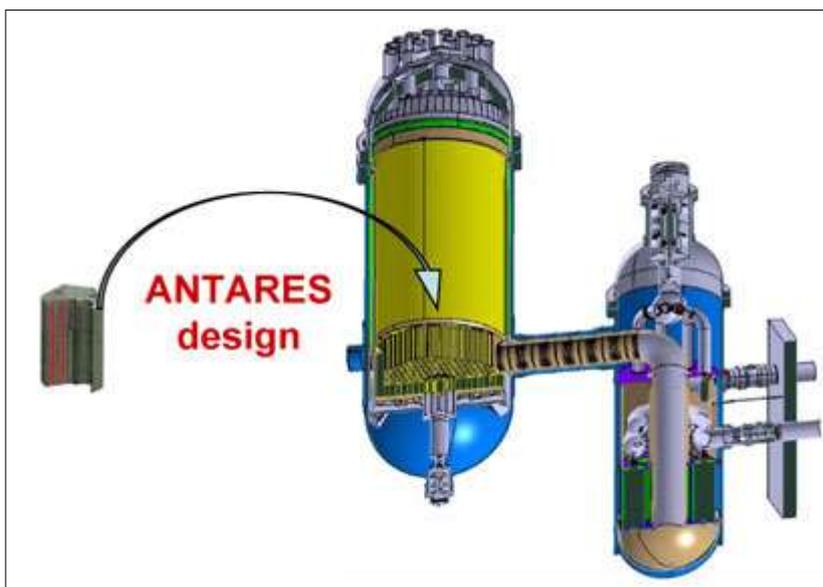


Figura 16

Ha la particolare caratteristica di essere progettato per produrre oltre che energia elettrica anche idrogeno. Come si vedrà in seguito è questa una delle nuove prospettive per l'uso dei reattori a gas ad alta temperatura che viene ulteriormente elevata (1.000°C) sicché essi prendono il nome di VHTR. Il fatto di dover accoppiare un impianto nucleare con un impianto chimico obbliga ad usare un ciclo indiretto con la presenza di uno scambiatore di calore gas/gas.

LA PRODUZIONE DI IDROGENO

Come anticipato, fra le favorevoli caratteristiche di questa filiera di reattori vi è la possibilità di produrre idrogeno in grandi quantità.

Negli ultimi tempi si è proposto da più parti di utilizzare tale elemento chimico in sostituzione dei combustibili fossili nel campo dell'autotrazione [17]: vari studi hanno evidenziato che propulsori alimentati ad idrogeno, opportunamente progettati, darebbero luogo ad un impatto ambientale ridottissimo o praticamente nullo.

A questo punto è bene chiarire un grosso equivoco comunemente diffuso a livello di stampa. Si parla infatti oggi della transizione verso una supposta "economia all'idrogeno". Si tratta di un'affermazione completamente errata, di una vera e propria "leggenda metropolitana". Bisogna ricordare infatti che l'idrogeno, ancorché abbondantissimo in natura (rappresenta fino al 75% della materia visibile dell'universo), si trova allo stato libero solo in piccole quantità, comunque non utilizzabili: va quindi prodotto con opportuni procedimenti industriali (che consumano energia). Trattasi quindi di un *vettore energetico*, e non certo di una fonte. Poiché nella combustione produce vapor d'acqua, chiaramente esso non è affatto inquinante. Però, per una vera transizione ad una economia legata all'idrogeno, è necessario disporre di una fonte primaria per la sua produzione che sia abbondante, sicura, economica e compatibile con l'ambiente.

Oggi l'idrogeno viene prodotto principalmente per *steam reforming* del metano (di cui circa metà brucia fornendo l'energia per il processo e metà viene usato quale reagente); tuttavia tale fonte si dimostra adeguata solo per gli attuali utilizzi industriali (quali, ad esempio, la fabbricazione dell'ammoniaca). Come già detto, il metano è un gas prezioso, soggetto a notevoli oscillazioni di prezzo, non disponibile per tutti; inoltre il processo di *steam reforming* libera anidride carbonica nell'atmosfera (7 Kg di CO₂ per ogni Kg di H₂), monossido di carbonio, combustibile incombusto (metano), prodotti di combustione. Bisogna tener conto che una notevole quantità di CO₂ (il 45% del totale) viene emessa durante la sola combustione necessaria a fornire il calore alla reazione chimica. Infine non va dimenticato che il metano è, dal punto di vista del potenziale di riscaldamento globale, 21 volte più dannoso della CO₂ [18]. Questo processo evidentemente non può essere considerato una soluzione del problema dal punto di vista energetico, ecologico ed economico.

Sono stati proposti altri processi per la produzione di questo gas, ma molti di questi rappresentano tecnologie ancora in via di sviluppo, e comunque antieconomiche.

In questo quadro gli HTR, con la loro capacità di produrre calore ad alta temperatura in assenza di emissioni, rappresentano un punto di partenza per lo studio di nuovi processi (o di modifiche degli attuali) che possano effettivamente condurre ad un uso diffuso dell'idrogeno nei trasporti.

Un primo processo che si può utilizzare è una modifica dell'attuale *steam reforming*, utilizzando per la reazione il calore di origine nucleare. Si risparmierebbe quindi la produzione della CO₂ emessa durante la combustione. Poiché il processo è ben conosciuto industrialmente, sarà probabilmente fra i primi ad essere utilizzato su ampia scala, ma risolverebbe solo parzialmente i problemi.

Altra via è quella di utilizzare il ben noto processo dell'elettrolisi. È noto infatti che è possibile scindere le molecole dell'acqua in idrogeno ed ossigeno usando una corrente elettrica. La materia prima è l'acqua, abbondante ed economica, ed i prodotti sono l'idrogeno e l'ossigeno. Però, dato il costo dell'energia elettrica, il sistema non è economicamente conveniente su ampia scala.

Una interessante variante è rappresentata dalla termoelettrolisi: scaldando il vapore ad alta temperatura infatti l'energia elettrica richiesta per l'elettrolisi è assai minore. La convenienza risiede nel fatto che il calore, essendo energia non trasformata, è meno caro e pregiato dell'elettricità (a 1.000 °C sono necessari 2.4 KWh/m³ contro 3.7 KWh/m³ a temperatura ambiente [19]).

Una via interessante poi sarebbe quella di utilizzare direttamente il calore per attuare la scissione termochimica delle molecole dell'acqua; esiste il processo di pirolisi, ma esso è possibile solo a temperature dell'ordine di 3.000 °C, inaccettabili per scopi industriali.

Un metodo alternativo è allora quello di utilizzare opportuni *processi termochimici* che convertano il calore in energia chimica attraverso la produzione di idrogeno dall'acqua. Fin dagli anni '70 è emerso un forte interesse per questo tipo di processi. In particolare il DOE (*Department of Energy*) ha commissionato alla *General Atomics*, ai *Sandia National Laboratories*, ed all'*Università del Kentucky* uno studio che ha portato alla identificazione di 115 processi possibili per la produzione termochimica di idrogeno [20]. Tra questi solo 2 furono considerati di interesse:

- l'UT3 (dell'Università di Tokyo-3), basato sul ciclo Ca – Br – Fe;
- l'I-S (iodio zolfo).

I maggiori rendimenti (fino al 52% [21]) e la natura delle reazioni chimiche (tutte allo stato fluido, al contrario dell'UT3) fecero preferire quest'ultimo. Nel processo I-S l'unico reagente consumato è l'acqua, che viene scissa ad opera del calore nucleare; il ciclo è chiuso, nel senso che, al di là delle perdite, tutti gli altri reagenti vengono riciclati. Lo schema del ciclo si suddivide in tre passi (Figura 17):

- reazione esotermica fra iodio, anidride solforosa ed acqua (che viene consumata); vengono prodotti acido solforico ed acido iodidrico (reazione Bunsen);
- scissione termica dell'acido solforico (a circa 800÷900 °C) in anidride solforosa, acqua (riciclati) ed ossigeno (utile sottoprodotto del processo);
- scissione termochimica dell'acido iodidrico con formazione di iodio (riciclato) ed idrogeno, prodotto dell'impianto.

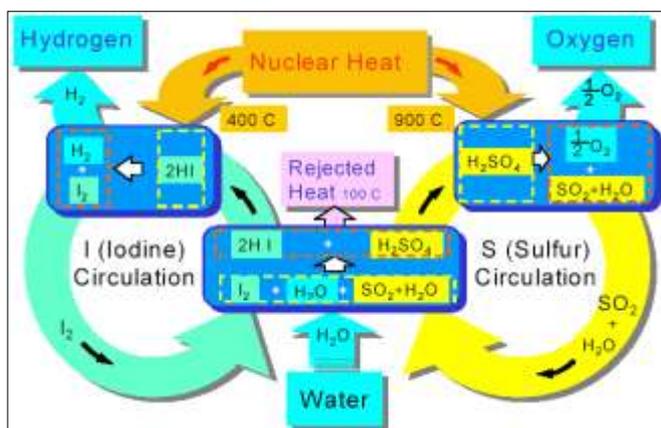


Figura 17

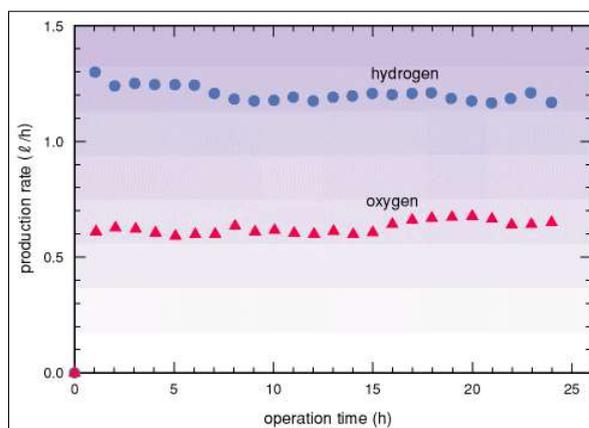


Figura 18

Un ulteriore sottoprodotto del processo è il calore a 100°C utilizzabile, ad esempio, ai fini del teleriscaldamento o della desalinizzazione dell'acqua. Sperimentazioni in questo campo sono tuttora in corso, ma i risultati fin qui ottenuti sembrano incoraggianti: la JAERI ha ottenuto, in una attrezzatura sperimentale, la produzione continua di idrogeno. La Figura 18 mostra la produzione sperimentale di idrogeno e di ossigeno, tramite processo I-S ottenuta dalla JAERI utilizzando parte dell'energia prodotta dal reattore HTTR (si può notare la continuità della produzione per 24 ore di 1.2 l/h di idrogeno e 0.6 litri/ora di ossigeno, in accordo con i calcoli stechiometrici)

Il prossimo passo sarà quello di realizzare attrezzature che provino la fattibilità industriale del processo. Studi teorici effettuati dalla General Atomics dimostrano che il rendimento teorico del processo già a 800 °C è dell'ordine del 40% per arrivare a circa il 60% a 1.000 °C.

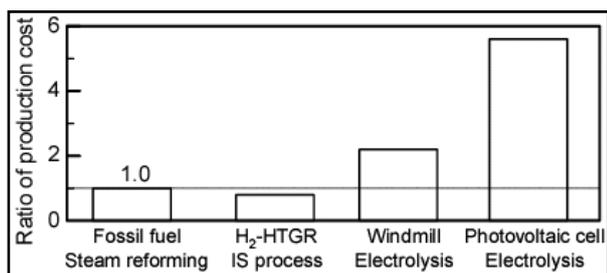


Figura 19

In base a queste considerazioni la temperatura di 1.000 °C è stata assunta come riferimento per i nuovi reattori HTR (VHTR) proposti in seno all'iniziativa internazionale GEN-IV (finanziata e supportata dagli USA).

Questi processi per la produzione di idrogeno non sono oggi ancora economicamente competitivi dati i bassi prezzi del gas naturale; tuttavia alcuni studi [22] dimostrano che l'introduzione di una anche non esosa *carbon tax* renderebbe questo metodo competitivo con quelli attuali (al contrario delle altre più costose fonti prive di emissioni serra, quali l'eolica o, ancor meno, la solare, Figura 19).

Fra le difficoltà incontrate da questo processo vi sono problematiche di sicurezza [23] e la resistenza dei materiali ad ambienti chimicamente aggressivi e ad alte temperature, problemi comunque superabili e che non impediscono a questo processo di essere in "pole position" per un futuro utilizzo dell'idrogeno in maniera realmente non inquinante.

I PROBLEMI STRUTTURALI LEGATI ALLE ALTE TEMPERATURE

La presenza di alte temperature comporta l'insorgenza di problematiche strutturali nuove rispetto ai reattori nucleari "tradizionali". Fra i componenti metallici presenti negli HTR sono particolarmente delicati [24]:

- le barre di controllo e di shut down;
- i gruppi turbocompressori;
- gli scambiatori di calore;
- gli steam reformers (se presenti).

Naturalmente le caratteristiche meccaniche dei materiali sottoposti alle alte temperature tendono a scadere. E' necessario quindi cercare di creare materiali a più alta resistenza e di limitare al massimo le sollecitazioni nei componenti. Esse consistono principalmente in:

- carichi meccanici a lungo termine;
- carichi termici e meccanici ciclici durante l'esercizio;
- carichi termici e meccanici a breve termine durante possibili scenari incidentali;
- variazione delle proprietà dei materiali dovuta all'irraggiamento neutronico.

I modi di rottura che si possono associare a queste sollecitazioni sono:

- rottura duttile per carichi a breve termine;
- rottura per creep per carichi a lungo termine;
- fenomeni di fatica e creep-fatica;
- distorsioni dovute a collassi incrementali e thermal ratcheting;
- instabilità (buckling).

Sono in via di sviluppo leghe atte a resistere alle condizioni sopra elencate; fra queste troviamo, ad esempio, per gli scambiatori di calore:

- Hastelloy X, XR;
- Incoloy 617;
- Thermon 4972.

Si tratta di leghe a base di nichel, cromo e molibdeno sviluppate nell'ambito delle tecnologia delle turbine a gas. E' importante notare comunque che opportune scelte progettuali e adeguati dimensionamenti, anche se con temperature imposte molto elevate, possono alleggerire sensibilmente i problemi strutturali.

Sono in corso una serie di ricerche sull'argomento, in particolar modo presso la JAERI [25].

IL BRUCIAMENTO DELLE SCORIE

L'Unione Europea dispone attualmente di una potenza elettrica nucleare installata pari a circa 125 GWe (corrispondente a circa il 35% del totale [1]).

In tale quadro l'Italia a causa del referendum del 1987, ed ancor più della sua arbitraria interpretazione politica, si trova in una posizione assolutamente atipica rispetto a tutti i paesi industrializzati [1]. Uno degli argomenti portati contro una ripresa del nucleare, è quello della produzione e del destino finale delle scorie, additate come un irresolubile problema.



Figura 20

Il che, dal punto di vista tecnico, è falso, anche perché le scorie vengono prodotte in quantità contenuta e possono essere opportunamente trattate e controllate.

È stato calcolato [26] che, se per soddisfare i propri bisogni energetici nell'arco dell'intera vita, un uomo ricorresse esclusivamente all'uso dell'energia nucleare, produrrebbe un volume di scorie (già trattate per lo stoccaggio definitivo, cioè, di norma, vetrificate) delle dimensioni di una sfera contenuta nel palmo di una mano, Figura 20.

A conferma si può aggiungere che è stata calcolato che la produzione per via nucleare di 1 KWh per un periodo di 100 anni, genera un volume di scorie di 30 cl [2] (inferiore a quello una lattina di birra).

Nella tematica della ulteriore riduzione della quantità e della pericolosità potenziale delle scorie, si inquadrano alcune ricerche nel mondo. A questo scopo possono concorrere, ad esempio, quelle finanziate dalla Comunità Europea sull'utilizzo dei reattori a gas [12][13]. Attraverso lo studio di una combinazione ottimale fra i reattori LWR ed i reattori a gas a spettro termico (HTR) e veloce (GCFR) si può ottenere una minimizzazione delle scorie, attraverso un bruciamento delle stesse (con produzione di energia).

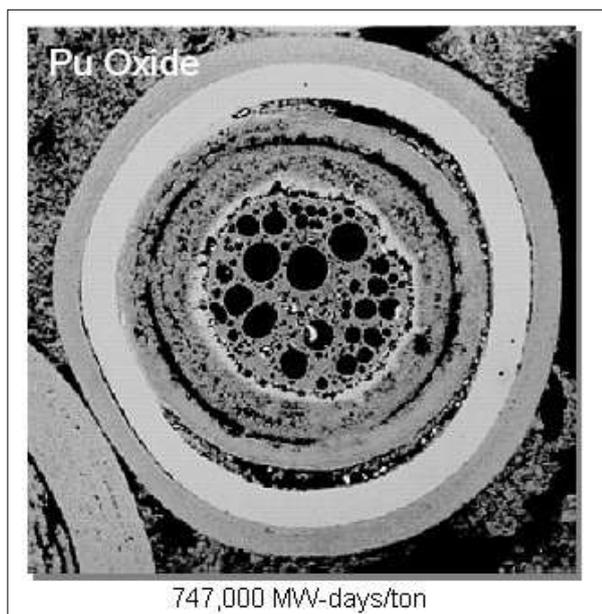


Figura 21

La filiera HTR permette infatti uno sfruttamento prolungato del combustibile, consentendo di arrivare a burnup (cioè a tempi di permanenza del combustibile all'interno del reattore in funzione) ultra-elevati (con combustibili a base di plutonio dell'ordine di 800.000 MWd/t, contro i circa 40.000 MWd/t dei reattori attuali), mantenendo il combustibile in condizioni di esercizio per tempi dell'ordine dei 3 anni. La Figura 21 mostra l'immagine di una microparticella a base di ossido di plutonio irraggiata a 747.000 MWd/t dove si evidenzia l'integrità degli strati esterni contenutivi [28].

Tali reattori inoltre, utilizzando gas elio quale refrigerante e grafite quale moderatore, presentano favorevoli caratteristiche di economia neutronica, consentendo una particolare flessibilità nella scelta dei cicli del combustibile [27].

Fra i cicli studiati per prolungare il funzionamento del reattore si è pensato, basandosi su una precedente esperienza[29] alla combinazione del plutonio (di prima generazione, ossia quello derivante dal riprocessamento del combustibile spento dei LWR) con il torio naturale, quale materiale fertile. Va notato che le riserve di torio stimate nel mondo ammontano a 2.5 volte circa quelle dell'uranio.

Per quanto riguarda il plutonio (attinide), esso viene inevitabilmente prodotto durante il funzionamento dei reattori con combustibile a base di uranio. Allo scarico viene considerato secondo due diverse "filosofie":

negli USA ed in Svezia, è considerato un rifiuto e quindi viene vetrificato e sepolto in siti geologicamente stabili, dove rimarrà per millenni;

in Francia ed in Giappone, invece, esso viene estratto durante la fase di riprocessamento del combustibile, e bruciato miscelato con l'uranio nei cosiddetti MOX (ossidi misti di uranio e plutonio), con un miglior sfruttamento delle risorse e la riduzione della "scoria").

Le scorie sono costituite all'incirca per il 94% dall'U238, per il 3-4% da prodotti di fissione (di cui la grande maggioranza stabili, solo alcuni pericolosi unicamente in caso di incidente data la loro affinità biologica e mobilità nella biosfera), per l'1% dal plutonio (il maggiore contributore alla radiotossicità), e lo 0.1% da attinidi minori (Np, Am, Cm).

È evidente che se il plutonio viene separato e "bruciato" non costituirà più un rischio ambientale; può essere usato per sostenere la fertilizzazione del torio, producendo rilevanti quantitativi di energia ed aprendo anche nuove reali possibilità di produrre industrialmente l'idrogeno senza alcun impatto ambientale.

Per quanto riguarda la valutazione della pericolosità potenziale delle scorie, il concetto attualmente più diffuso è quello, molto conservativo, di definire un opportuno *tempo di ritorno al livello di miniera* (da noi definito originariamente LOMBT [2], cioè *Level Of Mine Balancing Time*) del livello di radiotossicità (che costituisce una misura del danno potenziale che la sostanza considerata può arrecare all'organismo umano per ingestione o per inalazione) delle scorie: esso consiste

nel lasso di tempo necessario affinché la radiotossicità delle scorie pareggi, per decadimento radioattivo, quella dell'uranio originariamente presente in miniera. Come già detto trattasi di un approccio forse eccessivamente conservativo e prudentiale, che non ha analoghi in altri settori tecnologici (se applicassimo ad essi gli stessi criteri, dovremmo abolirne la stragrande maggioranza; ad esempio, il fumo di sigaretta, uccide più di 4 milioni di persone all'anno nel mondo, eppure, nonostante ciò, ci si limita sostanzialmente a blandi divieti e paternalistiche raccomandazioni).

Il nostro gruppo, nell'ultimo biennio, ha condotto ricerche sull'argomento [30][31]. È stato rilevato che usando gli HTR il plutonio viene quasi completamente distrutto, producendo al contempo energia (con conseguente guadagno economico). Il problema è complesso però, ottimizzando il ciclo del combustibile, è possibile alleggerirlo significativamente (circa di un fattore 10 sia nel LOMBT sia come massa degli attinidi).

Sono in corso ricerche con l'obiettivo di rendere innocue le scorie entro qualche centinaio di anni. Si noti che questo è anche l'obiettivo dell'ADS (*Accelerator Driven System*) proposto dal Prof. Rubbia [32], che gode di notevoli finanziamenti. Si può però notare che in questo caso si tratta in sostanza di un inceneritore (che, al netto, dovrebbe consumare energia) la cui eventuale realizzazione industriale richiederà ancora diversi anni.

CONCLUSIONI

Dal breve quadro riassuntivo sopra esposto appare evidente che la filiera dei Reattori Nucleari ad Alta Temperatura è di sicuro interesse per i maggiori paesi industrializzati anche se attualmente vengono preferite altre strade; questo è dimostrato dagli investimenti di questi ultimi anni in questo settore. Dal canto suo anche l'Italia non dovrebbe perdere l'occasione di studiare ed acquisire le dovute competenze in questo campo, apparendo la scelta nucleare, in un futuro non troppo lontano, una via obbligata per un approvvigionamento energetico sicuro, abbondante, economico e sostenibile da un punto di vista ambientale, anche in virtù del rispetto dei protocolli di Kyoto.

Molto del nostro futuro e di quello dei nostri figli dipenderà dalla responsabilità e dalla lungimiranza delle nostre scelte attuali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] OECD International Energy Agency (IEA) – <http://www.iea.org>
- [2] *“Analisi di alcune peculiari potenzialità degli HTR: la produzione di idrogeno ed il bruciamento degli attinidi”* – V. Romanello – Tesi di laurea in Ingegneria Nucleare, relatori prof. N. Cerullo, prof. G. Forasassi, prof. B. Montagnini, ing. G. Lomonaco, Università di Pisa – Ottobre 2003 – <http://etd.adm.unipi.it/theses/available/etd-10152003-181233/>
- [3] *“Le fonti primarie per la produzione energetica: stato dell'arte e problematiche”* – G. Lomonaco – presentato alla conferenza “Un'altra Energia è Possibile” – Pisa – 18 Maggio 2004
- [4] *“World Population Prospects”* – United Nations Publications – New York – 1998
- [5] *“The End of Cheap Oil”* – C. J. Campbell, J. H. Laherrère – Scientific American – Marzo 1998
- [6] *“Nuclear Technology Review - Update 2004”* – IAEA – Vienna – Agosto 2004
- [7] *“Nuclear power is the only green solution”* – J. Lovelock – The Independent – UK – 24 Maggio 2004 (tradotto in italiano su l'Unità del 25 Maggio 2004)
- [8] *“Il reattore modulare a gas con turbina a gas in ciclo diretto”* – N. Cerullo, G. Guglielmini, M. Paganini, A. F. Massardo – La Termotecnica, n. 11 – Novembre 1994
- [9] *“Fuel Cycle; AVR-Experimental HTR – 21 Years of successful Operation”* – K. G. Hackstein, M. Wimmers VDI-Verlag Duesseldorf – 1990
- [10] *“I recenti sviluppi dei reattori a gas ad alta temperatura. La collocazione di questi impianti nel futuro piano energetico mondiale. Il programma europeo HTR-N e l'attività di ricerca del DIMNP svolta nel suo ambito.”* – G. Lomonaco – Tesi di laurea in Ingegneria Nucleare, relatori prof. N. Cerullo, prof. G. Forasassi, prof. B. Montagnini, Università di Pisa – Giugno 2003 – <http://www.tesionline.it/default/tesi.asp?id=10251>
- [11] General Atomics – <http://www.ga.com/gtmhr/>
- [12] *“The European Programme on High Temperature Reactor Nuclear Physics, Waste and Fuel Cycle Studies”* – W. Von Lensa, N. Cerullo, G. Lomonaco, et alii – Presentato al ENC 2002, Scientific Seminar, Lille, France - Ottobre 2002
- [13] *“European Programme on High Temperature Reactor Nuclear Physics, Waste and Fuel Cycle Studies”* – W. Von Lensa, N. Cerullo, G. Lomonaco, et alii – Presentato al ICAPP03, Cordoba – Maggio 2003
- [14] Japanese Atomic Energy Research Institute (JAERI) – <http://www.jaeri.go.jp/english/index.cgi>
- [15] *“Nuclear Engineering and Design, Volume 218, Issues 1-3”* – Z. An et alii – pag. 1,267 – Ottobre 2002
- [16] Pebble Bed Modular Reactor (Pty) Ltd. – <https://www.pbmr.com>
- [17] *“The Hydrogen Economy”* – J. Rifkin – Tarcher/Putnam – 2002

- [18] *"Clima e Cambiamenti Climatici"* – ENEA – 2002 – <http://www.enea.it>
- [19] *"Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power"* – IAEA TECDOC 1085 – Maggio 1999
- [20] DOE - Department of Energy (USA) - <http://www.ott.doe.gov>
- [21] *"Efficient Production of Hydrogen from Nuclear Energy"* – Ken Schultz – General Atomics – California Hydrogen Business Council – 27 Giugno 2002
- [22] *"Evaluation of Hydrogen Production System with High Temperature Gas-cooled Reactor"* – M. Ogawa, S. Shiozawa – presentato alla conferenza "GENES4/ANP2003" – Settembre 2003
- [23] *"Problematiche di sicurezza nella produzione di idrogeno mediante impianti HTR"* – G. Lomonaco – Tesi di laurea in Ingegneria della Sicurezza Industriale e Nucleare, relatori prof. M. Carcassi, prof. N. Cerullo, Università di Pisa – Dicembre 2003 – <http://www.tesionline.it/default/tesi.asp?id=10361>
- [24] *"Service conditions and relevant properties of HTGR metallic materials"* – E. Bodmann, H. Diehl, I. Blume-Firla, H. Demus – Hochtemperatur-Reactorbau, GmbH, Mannheim, Federal Republic of Germany
- [25] *"High-Temperature Characteristics of Hastelloy XR"* – JAERI – <http://inisjp.tokai.jaeri.go.jp/ACT96E/frame0503.html>
- [26] Uranium Information Centre (UIC) – <http://www.uic.com.au>
- [27] *"HTR Fuel Cycles : A Comprehensive Outlook Of Past Experience And An Analysis Of Future Options"* – D. Greneche – Presentato al ICAPP03 – Cordoba – 4,7 Maggio 2003
- [28] *Comunicazione Privata* – Dr. Werner von Lensa – Institute for Safety Research and Reactor Technology – Forschungszentrum Juelich GmbH
- [29] *"Thorium cycle in high temperature gas cooled gas turbine reactors using highly enriched uranium obtained from the dismantling of nuclear weapons"* - N. Cerullo, G. Guglielmini, A. Di Pietro - Presentato al "International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition" - L'Aia, Olanda - 13,16 Giugno 1994
- [30] *"The capabilities of HTRs to burn actinides and to optimize plutonium exploitation"* – N. Cerullo, D. Bufalino, G. Forasassi, G. Lomonaco, P. Rocchi, V. Romanello – Presentato al ICON-12, Arlington, Virginia, USA - Aprile 2004
- [31] *"An additional performance of HTRs: the waste radiotoxicity minimization"* – N. Cerullo, D. Bufalino, G. Forasassi, G. Lomonaco, P. Rocchi, V. Romanello – Presentato al ICRS-10, Madeira, Portogallo – Maggio 2004
- [32] *"A European Roadmap for Developing ADS for Nuclear Waste Incineration"* – The European Technical Working Group on ADS – Aprile 2001 – <http://www.enea.it/com/ADS/>