

Le "scorie" nucleari

Un problema o una risorsa?

Parte prima

Le scorie sono probabilmente l'ultimo baluardo degli oppositori della fonte energetica nucleare e sono considerate un ostacolo praticamente insormontabile. In realtà, le cose non stanno così; analogamente a quanto avviene per i più comuni rifiuti solidi urbani (RSU), esse possono costituire un grave problema ma, opportunamente trattate, possono trasformarsi in una utile risorsa. A differenza dei RSU, le scorie nucleari possono fornire quantità veramente eccezionali di energia, contribuendo decisamente al risparmio nell'uso di combustibili fossili e quindi all'emissione di CO₂. Inoltre, l'uso degli idrocarburi come combustibili è un impiego addirittura aberrante, qualora si rifletta sulle loro potenzialità quale materiale di partenza per tutta la chimica organica. Inoltre, da un punto di vista della sicurezza, se le scorie nucleari vengono conservate così come prodotte da un comune impianto, una piccola parte di esse resta altamente radiotossica per migliaia di anni. Sottoponendole invece ad opportuni trattamenti ed al riciclo in particolari tipi di reattori nucleari, si otterrebbe l'obiettivo di ridurre enormemente la radiotossicità, ricavandone una quantità di energia veramente rilevante e non valutabile appieno senza un'analisi approfondita. Come già anticipato, tenendo presente che la fonte nucleare è l'unica che attualmente può far fronte alla crescita della domanda mondiale di energia ed all'esigenza di ridurre le emissioni di gas serra, appare evidente l'importanza dello studio e dell'applicazione di tali tecniche. Nel presente articolo il problema viene esaminato nei suoi aspetti fisici, ed analizzato in maniera chiara e di semplice comprensione.

La produzione annua di scorie nucleari e convenzionali

Con il termine di *scorie nucleari* [1] [2] si intende indicare il materiale di scarto originatosi durante le varie fasi del ciclo del combustibile. Esse rappresentano un sottoinsieme dei rifiuti radioattivi, a loro volta suddivisibili, in base al livello di attività, in tre categorie: basso, intermedio ed alto. Ad esempio i rifiuti a basso livello (LLW) sono costituiti dagli indumenti *usa e getta* usati nelle centrali e nei laboratori nucleari; il 90% dei rifiuti radioattivi prodotti appartengono a questa categoria ma contengono solo il 1% della radioattività. I rifiuti a livello intermedio (ILW) sono costituiti ad esempio dall'incamicatura del combustibile, richiedono schermatura e costituiscono il 7% del volume dei rifiuti radioattivi prodotti nel mondo (ma contengono solo il 4% della radioattività). Al contrario, le scorie ad alto livello (HLW) costituiscono il 3% del volume prodotto ma contengono il 95% della radioattività. Comunque, il volume di tutte le scorie nucleari prodotto ogni anno nel mondo è molto limitato. Per esempio, nei paesi OECD¹ vengono prodotti 3·10⁸ di tonnellate annue di rifiuti tossici in genere, mentre le scorie radioattive condizionate sono meno di 10⁴ t [2], cioè una quantità 30 mila volte

Le scorie sono probabilmente l'ultimo baluardo degli oppositori della fonte energetica nucleare. Se stoccate così come prodotte da un comune impianto nucleare, una piccola parte di esse resta altamente radiotossica per migliaia di anni. Tuttavia, questa fonte è l'unica che attualmente può far fronte alla crescita della domanda mondiale di energia e all'esigenza di ridurre le emissioni di gas serra. Tuttavia, cambiando punto di vista e considerandole in modo oggettivo, le scorie nucleari sono estremamente limitate in volume e quasi completamente riciclabili per uso energetico e/o sfruttabili per estrarne elementi utili in applicazioni mediche e/o tecnologiche. Cicli di combustibile innovativi, con i nuovi reattori della IV Generazione, hanno la potenzialità di moltiplicare di diversi ordini di grandezza la disponibilità delle risorse di uranio e torio e di ridurre a poche centinaia di anni la pericolosità della limitata quantità di scorie da stoccare nei depositi geologici. La realizzazione del ciclo chiuso del combustibile migliora ulteriormente la posizione dell'energia nucleare quale fonte sostenibile a tutti gli effetti. Inoltre, il riciclo integrale delle scorie costituisce un rilevante impedimento alla proliferazione. A tale proposito viene illustrato, come esempio di ciclo chiuso, il ciclo "simbiotico" LWR-HTR-GCFR, ideato ed in fase di studio presso il gruppo "ad hoc" dell'Università di Pisa.

inferiore. A questo proposito, è interessante introdurre un semplice, ma significativo, paragone: si considerino due impianti da 1.000 MW_e, uno di tipo nucleare (LWR) e uno a carbone. Si ha che, ogni anno [1] [2] [3]:

- L'impianto nucleare necessita di 25 t di U arricchito (per produrlo occorrono 2·10⁴ t di minerale di U); scarica mediamente 25 t di combustibile irraggiato.
- L'impianto a carbone richiede l'estrazione dalla miniera, il trasporto, lo stoccaggio e il bruciamento di 3,2·10⁶ t di combustibile; senza considerare l'anidride carbonica e gli altri gas emessi durante la combustione, le sole scorie solide del processo sono 2·10⁵ t di ceneri; le ceneri del carbone contengono [3], fra gli altri, alluminio, ferro, titanio, arsenico, mercurio e cadmio nonché uranio e torio (radioattivi).

A tal proposito, una digressione sul contenuto e conseguente rilascio di elementi radioattivi nelle vicinanze di centrali a carbone [3] è

Ing. Eleonora Bomboni, DIMNP, Università di Pisa; prof. ing. Nicola Cerullo, DITEC, Università di Genova - DIMNP, Università di Pisa; dott. ing. Guglielmo Lomonaco, DIMNP, Università di Pisa; dott. ing. Vincenzo Romanello, FZK, Germania.

¹ Nei Paesi che producono energia per via nucleare, i rifiuti radioattivi costituiscono meno dell'1% del totale di rifiuti industriali.

nucleare & ambiente

d'obbligo. Il contenuto medio² di U nel carbone è 1.3 ppm, quello di Th è 3,2 ppm. In base a questi ed ai precedenti dati, è stato stimato [3] che un impianto medio rilascia 5,2 t/anno di U e 12,8 t/anno di Th. Da ciò conseguono interessanti considerazioni [3]:

- La dose effettiva equivalente per la popolazione nelle aree adiacenti ad un impianto a carbone è 100 volte superiore a quella della popolazione che vive nelle vicinanze di un impianto nucleare, (circa 490 rem-persona/anno e 4.8 rem-persona/anno rispettivamente);
- Il contenuto energetico del combustibile nucleare presente nelle ceneri ha un contenuto energetico superiore a quello del carbone combusto che lo ha rilasciato;
- Dal rilascio di U²³⁸ nell'atmosfera (già di per sé potenzialmente pericoloso soprattutto per la tossicità chimica dello stesso), derivano anche (seppur in quantità relativamente limitate) Pu²³⁹ e Pu²⁴⁰, per irraggiamento da parte dei neutroni presenti nell'atmosfera;
- Si noti che le grosse quantità di U e Th (e loro discendenti) presenti nelle ceneri non vengono trattati come rifiuti radioattivi, a differenza di quanto avviene nell'industria nucleare;
- Infine è senz'altro da valutare la possibilità di sfruttare le ceneri del carbone per ricavare combustibile nucleare³: infatti, è interessante menzionare che recentemente negli USA è stata estratta una piccola quantità di yellow cake a partire da 6.1 kg di ceneri di un impianto a carbone situato in Cina [4].

È comunque doveroso fare una precisazione. Le centrali a carbone sono dotate di sistemi di precipitazione, capaci di ridurre anche di oltre il 99% il rilascio in atmosfera delle ceneri. Tuttavia, i metalli pesanti quali l'U e il Th tendono ad accumularsi sotto forma di piccole sfere vetrose, che costituiscono la parte più consistente delle ceneri volatili. Il risultato è che le ceneri volatili trasportano nell'atmosfera l'1% dell'U originariamente contenuto nel carbone. Tornando all'esempio precedente, si tratta quindi di circa 52 kg/anno di U e 128 kg/anno di Th per ogni impianto da 1.000 MW_e. Attualmente il carbone è l'unica risorsa fossile abbondante e che può economicamente competere con il nucleare. Tale competitività potrebbe però essere messa a dura prova se si volesse rendere questa risorsa veramente "pulita"[3].

Problemi di cambiamento climatico

Anche se non si conosce esattamente l'effetto delle emissioni antropiche sulle modificazioni climatiche mondiali, è evidente la repentina modificazione che la composizione chimica dell'atmosfera ha subito nel piccolo arco di tempo di 50 anni [1]. Inoltre, parimenti evidente

² Alcuni campioni di carbone arrivano a 10 ppm di U contenuto.

³ Analogamente, potrebbero essere ricavati dalle stesse ceneri altri utili elementi come Al, Fe, Ti ecc.

⁴ Il rapporto scorie prodotte/energia erogata è di 3,42 g/MWh per impianto LWR da 1.000 MW_e con ciclo *once through* e 2,3·10⁴ g/MWh per un impianto a carbone della stessa taglia [7] (considerando le sole ceneri solide, tenendo conto anche dei gas emessi, tale rapporto sale di circa due ordini di grandezza).

sembra essere il globale innalzamento delle temperature medie nella maggior parte delle regioni del mondo [1]. Tutte le maggiori fonti di energia, che sono di tipo fossile, portano con sé la produzione sia di gas nocivi (ossidi di azoto e zolfo), sia di gas serra (anidride carbonica *in primis*). Tutto ciò a prescindere dal danno alle persone generato dall'emissione, sia pur limitata grazie a opportuni sistemi, delle sostanze inquinanti, emesse con i fumi [5]. Proprio per far fronte ad una crescente domanda di energia e, contemporaneamente, alla richiesta di riduzione di tali emissioni gassose, gli impianti nucleari a fissione sono l'unica tecnologia attualmente disponibile, come dimostrato dai dati di Tabella 1. Le cosiddette "fonti rinnovabili", infatti, al momento non possono coprire un così grande fabbisogno energetico [1]. Esse sono tutte legate all'energia proveniente dal sole che, con un'ottimistica valutazione, sono limitate a circa 1 kW/m² ogni 12 ore. Inoltre, per le applicazioni industriali, esse non possono essere utilizzate se non per la produzione elettrica: come si vedrà più oltre, quest'ultima costituisce solo il 16% di tutta l'energia consumata ogni anno. Infine è importante sottolineare che i materiali costituenti i pannelli solari (silicio ecc.) sono, se dispersi nell'ambiente dopo lo smantellamento, altamente inquinanti e ad oggi tale problema (che al crescere dell'impiego dell'energia solare diverrà sempre più sentito) non è stato sufficientemente analizzato.

Il "problema" delle scorie nucleari

Il "successo" della tecnologia dei reattori ad acqua leggera nonché l'elevato costo dei combustibili fossili (oltre 100 \$/bbl) hanno da tempo liberato la fonte nucleare civile dall'accusa di essere poco sicura e/o costosa. Attualmente, il principale cavallo di battaglia dei suoi oppositori è la produzione di scorie, che restano pericolose per migliaia di anni. Sebbene sia innegabile il fatto che con l'attuale ciclo del combustibile restano "in eredità" delle generazioni future limitate quantità di materiali sia pur pericolosi, bisogna inquadrare meglio il problema. Infatti:

- Lo stoccaggio sicuro delle scorie radioattive è possibile [6];
- La quantità di scorie radioattive è molto piccola se rapportata all'energia prodotta⁴;
- Il volume occupato è estremamente limitato;
- Oltre il 96% del combustibile irraggiato può essere riciclato per produrre nuovo combustibile e, eventualmente, per estrarne isotopi di uso industriale e/o medico.

Prima di approfondire questi punti nei prossimi paragrafi, si osservi la Tabella 2. È evidente, quindi, che a parità di energia prodotta occorre, nel caso della fonte nucleare, una quantità di combustibile (e quindi di scorie finali) molto inferiore.

Non tutte le scorie nucleari sono uguali

I reattori LWR, ossia BWR e PWR, costituiscono la maggior parte degli oltre 400 reattori presenti oggi nel mondo. Un comune LWR,

TABELLA 1 - Emissioni gassose annue da impianti per la produzione elettrica [1]

Tipo di impianto	CO ₂ [t/anno]	NO _x [t/anno]	SO ₂ [t/anno]
a carbone da 1.000 MW _e	6 · 10 ⁶	2.5 · 10 ⁴	7 · 10 ⁴
a gas naturale da 1.000 MW _e	3 · 10 ⁶	1.6 · 10 ⁴	0
a olio combustibile da 1.000 MW _e	5 · 10 ⁶	1.4 · 10 ⁴	3 · 10 ⁴
nucleare LWR da 1.000 MW _e	0	0	0

TABELLA 2 - Potere calorifico dei principali combustibili fossili e nucleari [7]

Combustibile	Potere calorifico [MJ/kg]
Legna	16
Lignite	9
Antracite (bassa qualità)	13÷20
Antracite	24÷30
Gas Naturale	50
Olio combustibile	45÷46
Uranio naturale (in LWR)	5·10 ⁵
Fusione nucleare (miscela D-T)	3.4·10 ⁶

nucleare & ambiente

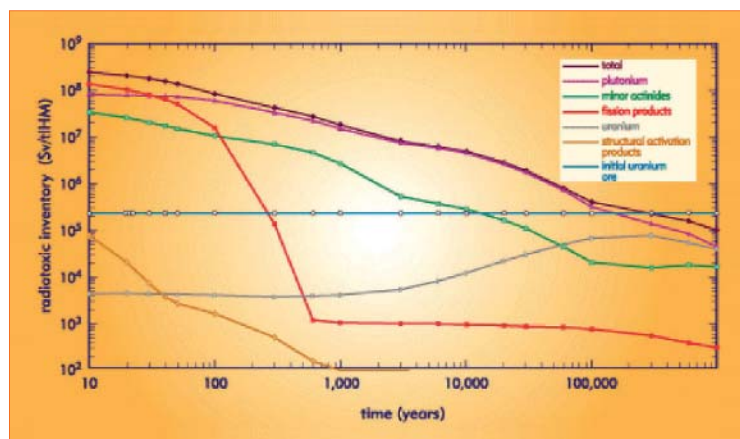


FIGURA 1 - Radiotossicità del combustibile esaurito in funzione del tempo [11]

con potenza elettrica di 1000 MW_e e burnup medio di 33 GWD/tU, scarica ogni anno circa 30 t di HLW con la seguente composizione [7]:

- 94% di U²³⁸;
- 1% di U²³⁵;
- 0,4% di U²³⁶;
- 1% di Pu (Reactor Grade)⁵;
- 0,1% di attinidi minori (Np, Am e Cm);
- 3÷4% di prodotti di fissione⁶.

È pertanto evidente che il materiale effettivamente “bruciato”, ossia i prodotti di fissione, è una piccola frazione del totale, mentre tutto il resto è fertile e fissile, quindi potenzialmente riutilizzabile per fini energetici. Nei paragrafi seguenti verranno analizzati più in dettaglio due diversi gruppi di scorie nucleari ad alta attività: gli attinidi e i prodotti di fissione.

Attinidi

Si definiscono attinidi i 14 elementi della tavola periodica che vanno dal numero atomico 90 (il torio) al numero atomico 103 (il laurenzio) e rispettivamente seguono l'attinio (Z=89) e precedono il rutherfordio (Z=104)⁷. Essi hanno alcune caratteristiche peculiari [1]:

- sono tutti radioattivi;
- si alterano facilmente se esposti all'aria;
- hanno alta densità;
- con acqua bollente e acidi reagiscono per formare idrogeno;
- si combinano direttamente con molti non metalli;
- hanno scarsa mobilità nel terreno, anche in presenza di acqua (come è stato verificato nel sito del reattore naturale di Oklo [8]).

Soltanto gli isotopi Th²³², U²³⁴, U²³⁵ e U²³⁸ si trovano oggi in natura [9]. Tutti gli altri vengono prodotti artificialmente. Inoltre, ognuno degli elementi attinidi possiede molti isotopi, alcuni aventi vita media lunghissima (per esempio il Np²³⁷), altri breve (come l'Am²⁴⁴ solo per citar-

⁵ Il Pu RG è costituito [7] (in peso) da: 2,59% Pu²³⁸, 53,85% Pu²³⁹, 23,66% Pu²⁴⁰, 13,13% Pu²⁴¹, 6,78% Pu²⁴²; per contro, si tenga presente che il Pu Weapons Grade (WG) è composto da almeno il 93% in peso di Pu²³⁹.

⁶ Circa il 2,9% sono isotopi stabili; 0,3% cesio e stronzio; 0,1% iodio e tecnezio; 0,1% altri PF a lunga vita media [2].

⁷ Il simbolo Z indica il numero atomico.

⁸ In quanto da essi non è più possibile ricavare energia per fissione.

⁹ Fra i MA in particolare l'Am [38].

¹⁰ Si noti la definizione di radiotossicità come *potenzialità*: in altre parole, se i radionuclidi non entrano nella biosfera, non viene ricevuta nessuna dose da alcun organismo vivente [39].

ne uno). Trattandosi di metalli pesanti, gli attinidi sono fortemente tossici non solo da un punto di vista radiologico ma anche chimico, proprio come il piombo o il mercurio. È importante tenere presente che gli unici modi per “bruciare” gli attinidi sono:

- la fissione;
- la trasmutazione e successiva fissione in un reattore nucleare.

Alcuni sono infatti isotopi fissili, tutti gli altri sono invece nuclidi “fertili”, che per assorbimento neutronico possono trasformarsi in isotopi fissili, cioè capaci di dare fissione se colpiti da neutroni di qualunque energia. La trasmutazione degli attinidi abbina in sé sia una drastica riduzione della pericolosità a lungo termine del combustibile esausto, sia un migliore sfruttamento delle risorse naturali di combustibile nucleare, come si vedrà nei prossimi paragrafi.

Prodotti di fissione e di attivazione

I prodotti di fissione sono tutti quegli elementi derivanti dalla scissione degli atomi fissili nella reazione a catena, mentre i prodotti di attivazione sono isotopi radioattivi che si formano a seguito di assorbimenti neutronici nei materiali non combustibili presenti in un impianto nucleare (tipico esempio è il C¹⁴ che si forma nei reattori moderati a grafite e che ne rende problematico lo smantellamento [10]). Fra i prodotti di fissione si possono annoverare sia isotopi stabili, sia nuclidi con vite medie che vanno dalle frazioni di secondo ai milioni di anni. I prodotti di fissione, che in un certo senso sono le vere scorie nucleari sotto il profilo energetico⁸, sono i maggiori responsabili della radiotossicità e del calore di decadimento del combustibile esausto nei primi decenni dopo lo scarico dal reattore, come si può dedurre dall'esame della Figura 1. Successivamente, invece, il contributo maggiore è dovuto a Pu e MA⁹.

La tossicità radiologica e il concetto di “Livello di Miniera”

La radiotossicità [12] è definita come “la potenzialità¹⁰ di indurre effetti dannosi (per irraggiamento interno, in seguito a ingestione o inalazione) da parte di un radionuclide”. Generalmente, parlando delle scorie nucleari ci si riferisce alla radiotossicità per ingestione, in quanto si ipotizza, conservativamente ai fini della radioprotezione, che dopo un certo tempo i prodotti radioattivi si disciolgano nell'acqua e raggiungano l'uomo attraverso le falde acquifere. Si tenga comunque presente, a questo proposito, che le scorie vengono depositate all'interno di opportune barriere naturali e ingegneristiche che rendono sostanzialmente nulla la probabilità di rilasci, anche dopo migliaia di anni. Inoltre, le sostanze radioattive, in quanto tali, sono destinate a ridurre nel tempo la propria pericolosità al contrario delle sostanze chimicamente tossiche o biologicamente pericolose, la cui minaccia resta costante o cresce nel tempo. Si cercherà ora di illustrare brevemente il concetto di Livello di Miniera: “considerando una certa quantità di combustibile irraggiato, si intende per Livello di Miniera (LOM) la radiotossicità della quantità di uranio naturale che ha generato detto combustibile”. Conoscendo quindi la quantità e la “storia” del combustibile considerato, è possibile calcolarne il livello di miniera andando a ritroso nei vari passaggi attraversati dal materiale preso in esame.

Una volta calcolata la corrispondente quantità di uranio iniziale, il LOM viene ottenuto [1] [7] sapendo che la radiotossicità dell'uranio naturale è pari a 20 mSv/g (per il torio invece questa si assume praticamente nulla). Conseguentemente, è possibile trovare il tempo necessario affinché le scorie nucleari raggiungano il corrispondente LOM: si tratta del

nucleare & ambiente

LOMBT [1] (Level Of Mine Balancing Time), che costituisce un utile parametro per qualificare la bontà di un certo ciclo di combustibile, in un'ottica della riduzione della tossicità a lungo termine delle scorie radioattive. Occorre far notare che tale valutazione, come sempre avviene in campo nucleare, è estremamente cautelativa. Se si adottasse lo stesso criterio anche in campo convenzionale, le attività umane resterebbero praticamente paralizzate.

Le scorie nucleari come "risorsa"

È importante analizzare come le scorie nucleari, una volta sviluppate le tecnologie necessarie, non siano più un problema ma diventino una risorsa. Naturalmente si è ancora in una fase preliminare di sviluppo dei processi e degli impianti atti a renderle tali. Tuttavia, è ragionevole pensare che il rincaro delle fonti fossili e la "fame" di energia possano condurre a fare investimenti adeguati in questo senso in un futuro non troppo remoto. Qui di seguito sono illustrati alcuni esempi di utile impiego di materiale prodotto per irraggiamento dell'uranio nei reattori nucleari di potenza.

Uso industriale e medico di attinidi e prodotti di fissione

Soffermandosi un attimo a considerare l'attuale realtà tecnica, ci si accorge che moltissimi radioisotopi presenti nel combustibile esausto sono gli stessi che vengono comunemente utilizzati sia per applicazioni mediche sia di tipo industriale. Attualmente, gli isotopi destinati ad impieghi di questo tipo vengono prodotti in reattori di ricerca o in acceleratori [13]. Tuttavia, nulla vieta di immaginare che in futuro alcuni radioisotopi di interesse medico e/o industriale non possano essere recuperati dal combustibile esausto, grazie al progressivo miglioramento delle tecniche di riprocessamento e a costi più concorrenziali. In realtà, già adesso viene in qualche caso applicata una logica del genere: per esempio, in India e Canada vengono recuperati rispettivamente il Co^{60} ed il trizio, come sottoprodotto dell'utilizzo dei reattori nucleari per la produzione elettrica [13].

ABBREVIAZIONI

bbl - Barile di Petrolio	LWR - Light Water Reactor
BWR - Boiling Water Reactor	MA - Minor Actinides
DU - Depleted Uranium	MOX - Mixed Oxide fuel
GCFR - Gas-Cooled Fast Reactor	PF - Prodotto di fissione
HEU - High Enriched Uranium	ppm - Parti Per Milione
HLW - High Level Waste	Pu RG - Pu Reactor Grade
HM - Heavy Metal	Pu WG - Pu Weapons Grade
HTGR - High Temperature Gas-cooled Reactor	PWR - Pressurized Water Reactor
HTR - High Temperature Reactor	RSU - Rifiuti Solidi Urbani
ILW - Intermediate Level Waste	TEC - Tonnellata Equivalente di Carbone
LEU - Low Enriched Uranium	TEP - Tonnellata Equivalente di Petrolio
LLW - Low Level Waste	VHTR - Very High Temperature Reactor

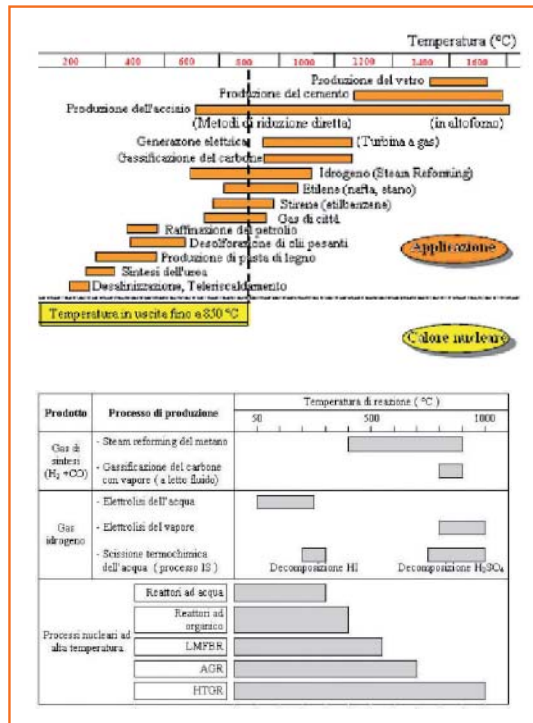


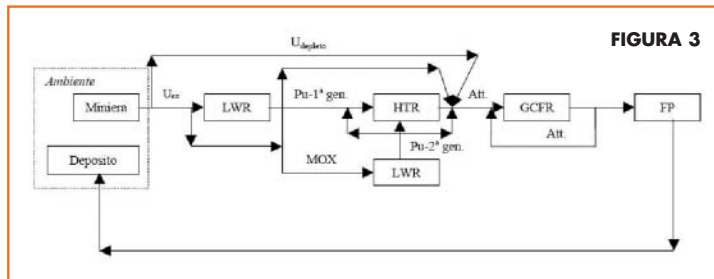
FIGURA 2 - Applicazioni industriali che utilizzano calore ad alta temperatura [17]

Senza entrare troppo nel dettaglio, si farà qui cenno all'utilità di prodotti di fissione e attinidi comunemente considerati come "problematici". Isotopi come Tc^{99m} , Xe^{133} , I^{131} , Cs^{137} e Sr^{90} sono ampiamente utilizzati in tecniche diagnostiche in virtù delle loro emissioni gamma. Sorgenti gamma di Cs^{137} vengono utilizzate per irraggiare sangue destinato a pazienti immunodepressi e per sterilizzare materiale medico. Inoltre, sorgenti di H^3 , C^{14} , Co^{60} , Kr^{85} , Sr^{90} , Cs^{137} , Pm^{147} , Po^{210} , Pu^{238} , Am^{241} , Cf^{252} sono utilizzate nell'industria per test non distruttivi (gammografie e radiografie industriali), come traccianti radioattivi, per eliminare l'elettricità statica (alfa emittitori come il Po^{210}), strumenti di misura utili in una grande varietà di processi, rivelatori di fumo, rivelatori di esplosivi e perfino come generatori a radioisotopi anche per applicazioni spaziali (Pu^{238}). Si rimanda per eventuali approfondimenti alla ampia letteratura specializzata per ulteriori dettagli. Basti qui soltanto ricordare, infine, il caso in un certo senso paradossale del Cf^{252} : si tratta di uno dei metalli più costosi attualmente in commercio (intorno ai 10 \$/mg [14]) e che è una delle più efficienti sorgenti neutroniche disponibili, adatto per radiografie neutroniche e per brachiterapia. Si prevede che nei cicli multipli, necessari per la chiusura del ciclo del combustibile nucleare, ne verrà prodotto in quantità progressivamente crescenti, per trasmutazione del curio. Tale generazione di Cf nel combustibile non è positiva a causa della difficoltà di trattare elementi a così alta emissione neutronica. Per cui, si pensa invece a come limitarne la produzione [15], piuttosto che puntare allo sviluppo di una tecnologia capace di recuperare questo costoso elemento dal combustibile irraggiato. Senza la pretesa di dare una quadro esauriente, è stata qui illustrata l'utilità intrinseca di quei materiali che, per il momento, sono considerati un problema e sarebbero destinati ad un controverso smaltimento definitivo. Nel prossimo paragrafo si cercherà di dare un'idea del grande potenziale energetico di quel 96% di combustibile irraggiato che sono gli attinidi.

Quanta energia si può ricavare riciclando il combustibile "esausto"

Tutto l'uranio presente in natura può potenzialmente produrre energia per fissione, direttamente o indirettamente, ossia a seguito di eventi intermedi di trasmutazione in altri nuclei di massa superiore. Effettuando un semplice calcolo, è possibile dare una stima di massima di quanta energia si può ottenere da materiale che, con gli attuali cicli di combustibile, è destinato allo smaltimento definitivo. Si considerino,

nucleare & ambiente



per fissare le idee, quelle 30 t di combustibile scaricato ogni anno da un comune LWR. Di esse soltanto il 3÷4% sono prodotti di fissione, mentre tutto il resto sono elementi attinidi, cioè nuclidi che possono produrre energia per fissione. Quindi, considerando l'ipotesi che i prodotti di fissione siano il 4%, si avranno circa 28,8 t di materiale riciclabile. Considerando una energia media di 180 MeV/fissione e una massa molare di 238 g/mol, si ottengono circa $5 \cdot 10^{10}$ TEP¹¹, pari a 700 anni di produzione elettrica a piena potenza di un reattore della stessa taglia. Da queste considerazioni, chiaramente teoriche, emerge quanto grande sia l'energia che viene persa negli attuali cicli di combustibile e che va ad accrescere il problema delle scorie. Si può osservare che si tratta di una quantità di energia di gran lunga maggiore di quella effettivamente prodotta (ovvero circa $2,1 \cdot 10^7$ TEP).

A questo proposito è importante far rilevare che l'energia ricavabile da fonte nucleare non necessariamente deve essere utilizzata per fini elettrici. Infatti, su scala mondiale, la produzione elettrica costituisce il solo 16% dell'energia che ogni anno viene utilizzata [16]. Il restante 84%, prodotto principalmente da fonti convenzionali (petrolio, gas, carbone), è sostanzialmente calore ad alta temperatura indispensabile in molti processi industriali come per esempio la produzione dell'acciaio, come evidenziato in Figura 2. Dall'esame di tale grafico, si nota che utilizzando un fluido refrigerante diverso dall'acqua e capace di raggiungere temperature prossime a 1.000 °C (He nei reattori VHTR), l'energia nucleare costituisce un'interessante alternativa per fornire calore ad alta temperatura, senza dover ricorrere a fonti fossili. Sulla base di quanto sopra esposto, i reattori refrigerati ad elio potrebbero in simbiosi con i LWR svolgere sul mercato compiti complementari (quali ad esempio la produzione dell'idrogeno [17] senza emissioni di CO₂).

[Fine prima parte - segue parte seconda]

Bibliografia

- [1] V. Romanello, *Analisi di alcune peculiari potenzialità degli HTR: la produzione di idrogeno ed il bruciamento degli attinidi*, 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/>
- [2] <http://www.uic.com.au>
- [3] A. Gabbard, *Coal Combustion: Nuclear Resource or Danger*, Oak Ridge National Laboratory - <http://www.ornl.gov>
- [4] WNA, *Spartan produces first yellowcake from Chinese coal ash - 16 ottobre 2007* - <http://www.world-nuclear-news.org>
- [5] A. Babbioni, *L'impatto ambientale e i rischi connessi con la produzione di energia negli anni 2000* - Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare - relatori Prof. N. Cerullo, Prof. G. Forasassi, Prof. B. Guerrini, Università di Pisa - Anno Accademico 1996-97.

¹¹ 1 TEP (tonnellata equivalente di petrolio) è pari a $4,19 \times 10^7$ kJ ovvero 0,048 MWd [7].

[6] V. Romanello, G. Lomonaco, N. Cerullo, *La sistemazione in sicurezza delle scorie nucleari - 21° secolo*, n. 3 luglio 2005.

[7] E. Bomboni, *Le scorie nucleari: Analisi della loro possibile riduzione mediante cicli di combustibile innovativi*, Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare - relatori Prof. N. Cerullo, Prof. G. Forasassi, Ing. G. Lomonaco, Ing. V. Romanello, Università di Pisa, Luglio 2006 - <http://etd.adm.unipi.it/theses/available/etd-06122006-143839>

[8] N. Cerullo, G. Lomonaco, V. Romanello, *Il Reattore Nucleare Naturale di Oklo* - Portale dell'Ingegneria Energetica e Nucleare - http://www.ingegnerianucleare.net/Tematiche/1FE/1FEmaterialefissileA/1FEmaterialefissileA_oklo/1FEmaterialefissileA_oklo.htm

[9] C. Hacker, *Radiation Decay - Version 4 - 29 settembre 2005* - FreeWare - Griffith University.

[10] G. Holt, *Radioactive Graphite Management at UK Magnox Nuclear Power Stations* - British Nuclear Fuel plc, Berkeley, UK.

[11] Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble (LPSC) - <http://lpsc.in2p3.fr>

[12] N. Cerullo, G. Lomonaco, V. Romanello, *Classificazione e Sistemazione in Sicurezza delle Scorie Nucleari* - Portale dell'Ingegneria Energetica e Nucleare - http://www.ingegnerianucleare.net/Tematiche/4SN/4SNscorieA/4SNscorieA_classificazione/4SNscorieA_classification.htm

[13] OECD-NEA, *Beneficial Uses and Production of Isotopes - 2004 Update* - NEA No. 5293, OECD 2005.

[14] <http://www.lenntech.com>

[15] D. Warin, *Status of the French Research Program on Partitioning and Transmutation* - Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 44, n. 3, p. 410-414 (2007).

[16] D. Hittner - *Why do we need V/HTR?* - Eurocourse on V/HTR 1st Seminar - IKE (Institut für Kernenergetik und Energiesysteme), Universität Stuttgart (Germany), 27-29 March 2007.

[17] G. Lomonaco, *Problematiche di sicurezza nella produzione di idrogeno mediante impianti HTR* - Tesi di Laurea in Ingegneria della Sicurezza Industriale e Nucleare - relatori Prof. M. N. Carcassi, Prof. N. Cerullo - Università di Pisa - Dicembre 2003 - <http://www.tesionline.it/default/tesi.asp?id=10361>

[18] U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum - *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, Dicembre 2002.

[19] N. Cerullo, D. Bufalino, G. Forasassi, G. Lomonaco, P. Rocchi, V. Romanello, *The capabilities of HTRs to burn actinides and to optimize plutonium exploitation*. - Proceedings of ICONEX12, Aprile 2004, Arlington, Virginia, USA.

[20] G. Lomonaco, *I recenti sviluppi dei reattori a gas ad alta temperatura. La collocazione di questi impianti nel futuro panorama energetico mondiale. Il programma europeo HTR-N e l'attività di ricerca svolta dal DIMNP nel suo ambito* - 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>

[21] E. Bomboni, N. Cerullo, G. Lomonaco, V. Romanello, *Nuclear waste impact reduction using multiple fuel recycling strategies* - presentato al PHYTRA-1, Marrakech, Morocco, 14-16 marzo 2007.

[22] N. Cerullo, G. Lomonaco, V. Romanello, *Waste Radiotoxicity Mini-*

Il lavoro presentato in questo articolo è stato parzialmente finanziato nell'ambito dei progetti dell'Unione Europea GCFR, PuMA e RAPHAEL. Infine un particolare ringraziamento al Prof. G. Forasassi del DIMNP per la sua molto apprezzata collaborazione e agli Ingg. D. Bufalino e D. Castelliti del DIMNP per i loro utilissimi suggerimenti.

nucleare & ambiente

mization Using Innovative LWR-HTR-GCFR Symbiotic Fuel Cycles - presentato all'ARWIF2005, ORNL (USA), Febbraio 2005.

[23] J. Kuijper, N. Cerullo, G. Lomonaco, et alii, *HTGR Reactor Physics and Fuel Cycle Studies* - Nuclear Engineering and Design, n. 236, pagg. 615-634, Marzo 2006

[24] N. Cerullo, D. Bufalino, G. Forasassi, G. Lomonaco, P. Rocchi, V. Romanello, *An additional performance of HTRs: the waste radiotoxicity minimization*, Radiation Protection Dosimetry, volume 115, Oxford Press, Dicembre 2005.

[25] J. Somers, A. Fernandez, *Fabrication of Plutonium Based Coated Particle Fuel at the Institute for Transuranium Elements* - presentato a HTR2006, Sud Africa, 1-4 ottobre 2006.

[26] E. Bomboni, N. Cerullo, G. Lomonaco, V. Romanello, *A critical review of the recent improvements in minimizing nuclear waste by innovative gas cooled reactors* - Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2008, Article ID 265430, 18 pages, 2008. doi:10.1155/2008/265430.

[27] N. Cerullo, W. Grassi, G. Lomonaco, *Analisi termofluidodinamica della configurazione a letto di particelle per un reattore nucleare veloce refrigerato a gas*, UIT05, Parma, Giugno 2005.

[28] G. Lomonaco, *Analisi termofluidodinamica dei reattori nucleari innovativi refrigerati a gas* - Tesi di Dottorato in Energetica Elettrica e Termica - tutori Prof. N. Cerullo, Prof. W. Grassi - Università di Pisa - Maggio 2007 - <http://www.tesionline.it/default/tesi.asp?id=17893>

[29] D. Castelliti, *Il reattore GCFR (a gas a spettro veloce). Gli aspetti termofluidodinamici ed il suo contributo al bruciamento delle scorie nucleari* - Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare - relatori Prof. N. Cerullo, Prof. G. Forasassi, Dr. Ing. G. Lomonaco, Ing. C. Parisi - Università di Pisa - Giugno 2007 - <http://etd.adm.unipi.it/theses/available/etd-05112007-113534/>

[30] W. F. G. Van Rooijen, *Improving Fuel Cycle Design and Safety Characteristics of a Gas Cooled Fast Reactor*, PhD thesis Delft University of Technology ISBN 1-58603-696-3, supervisor Dr. Ir. J. L. Kloosterman, 2006.

[31] <http://www.gcfr.org>

[32] IAEA, *Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management*, Technical Report Series n. 435, IAEA, Vienna, 2004.

[33] <http://www.nfcis.iaea.org>

[34] OECD-NEA, *Uranium 2005: Resources, Production and Demand* - OECD 2005, Nea No. 6098.

[35] T. E. Shea, M. D. Zentner, *The eternally open uranium fuel cycle*, presentato all'IAEA Technical Meeting on "Fissile Materials Management Strategies for Sustainable Nuclear Energy", Vienna, Austria, 12-15 settembre 2005.

[36] L. Bruzzi, G. Cicognani, G. Dominaci, *Il ciclo del combustibile dei reattori nucleari* - Pitagora, Bologna, 1992.

[37] N. Cerullo, *Lezioni di Ingegneria del Nocciolo*, Università di Pisa-DCMN, Pisa, 1988

[38] IAEA, *Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management* - Technical Reports Series No. 435, IAEA, Vienna, 2004.

[39] E.E. Bende, *Plutonium Burning in a Pebble-Bed Type High Temperature Nuclear Reactor* - PhD thesis Delft University of Technology ISBN 90-9013168 NUGI: 837, supervisor Dr. Ir. J.L. Kloosterman, 1999.

[40] F. Barthel, *Thorium and Unconventional Uranium Resources* - presentato a IAEA Technical Meeting on "Fissile Materials Management Strategies for Sustainable Nuclear Energy", Vienna, Austria, 12-15 settembre 2005. ■



**CALDAIE A LEGNA
PELLET e BIOMASSA**

**Via Bassani, 54
Alpo - Verona
Tel. 045 513045**

**Via Copernico, 42
Vago - Verona
Tel. 045 982044**

**info@osacaldaie.it
www.osacaldaie.it**