

## Ciclo del combustibile nucleare e rifiuti radioattivi

Francesco Troiani

ENEA, Presidente Nucleco SpA

*L'energia nucleare è una fonte energetica abbondante e sicura, la radioattività associata al ciclo del combustibile nucleare è mantenuta sotto controllo in tutte le fasi, le risorse naturali di Uranio sono sufficienti a garantire gli approvvigionamenti a lungo termine e a prezzi adeguati, e le varie fasi del ciclo del combustibile nucleare, inclusa la gestione dei rifiuti radioattivi, fanno uso di tecnologie molto avanzate e si basano su processi consolidati*

## Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste

*The nuclear energy source is abundant and safe, the radioactivity associated with the nuclear fuel cycle is kept under control in all of its phases and the natural resources of uranium are sufficient to ensure long-term and cost-effective fuel supplies. The nuclear fuel cycle, including radioactive waste management, is a consolidated process based on advanced and proven technologies*

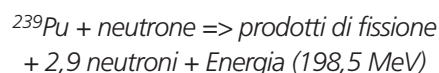
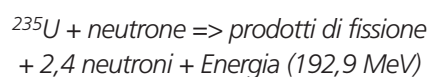
## Energia nucleare e radioattività

La diversa combinazione di protoni, neutroni ed elettroni, insieme ad altre particelle subatomiche, genera i vari atomi che costituiscono la materia. I nucleoni (protoni e neutroni) sono concentrati nel piccolo nucleo atomico da potenti forze nucleari alle quali sono associate rilevanti quantità di energia (energia di legame).

L'energia di legame per nucleone assume il suo valore massimo per gli elementi centrali della tabella periodica degli elementi (gruppo del Ferro), aventi massa di 50-60 unità di massa atomica (u.m.a.). Ne consegue che le reazioni nucleari, da una parte, l'aggregazione dei nuclei atomici con numero di nucleoni inferiori a quelli del Ferro, per produrre un nucleo più grande (fusione nucleare) e, dall'altra, la scissione dei nuclei con numero di nucleoni superiori a quelli del Ferro, per produrre nuclei più piccoli (fissione nucleare), liberano la parte eccedente dell'energia di legame.

La reazione di fissione nucleare, per taluni elementi, può avvenire spontaneamente, ma con rese estre-

mamente basse, tali da non renderla industrialmente sfruttabile. Però, essa può anche essere indotta attraverso la generazione di neutroni liberi, i quali colpiscono nuclei atomici di elementi fissili, dando luogo ad una reazione di fissione nucleare indotta che produce altri neutroni che, a loro volta, inducono nuove fissioni. Il reattore nucleare, pertanto, attraverso un idoneo sistema di controllo è in grado di mantenere la reazione nucleare a catena e, attraverso il recupero del calore prodotto, generare energia elettrica e renderla disponibile per gli usi domestici e industriali.



Le varie reazioni di fissione nucleare non producono sempre gli stessi prodotti di fissione. All'interno del nocciolo del reattore si producono diversi tipi di elementi, generalmente radioattivi e la piccola differenza di massa tra la somma delle masse dei pro-

## Atomo e masse atomiche

L'**Atomo** è l'unità della materia non ulteriormente divisibile da reazioni chimiche, formata da un **nucleo** centrale di diametro dell'ordine di  $10^{-15}$  m, contenente **protoni** e **neutroni** (genericamente denominati nucleoni), intorno al quale orbita una nube di **elettroni** (in numero uguale a quello dei protoni), in uno spazio di diametro dell'ordine di  $10^{-10}$  m.

Il numero di protoni presenti nel nucleo è definito **numero atomico** e ne determina il comportamento chimico e fisico. Atomi con stesso numero atomico costituiscono gli **elementi chimici**.

Le varie combinazioni di protoni e neutroni generano tutti i tipi di atomi, genericamente denominati nuclidi, indicati con la notazione:  $\frac{\text{massa.at}}{\text{num.at}}\text{S}$ , dove **S** è il simbolo dell'elemento chimico a cui appartengono, **num.at** è il numero atomico corrispondente e **massa.at.** è la massa atomica, espressa in unità di massa atomica. Il numero di neutroni presenti nel nucleo equivale a *massa.at. - num.at.*

Atomi con lo stesso numero atomico e un diverso numero di neutroni costituiscono i vari **isotopi** di un elemento (es:  $^{241}_{95}\text{Am}$  e  $^{242}_{95}\text{Am}$ ); atomi con la stessa massa atomica e diverso numero atomico sono definiti **isobari** (es:  $^{204}_{82}\text{Pb}$  e  $^{204}_{80}\text{Hg}$ ), mentre atomi aventi lo stesso numero atomico e la stessa massa atomica, ma con diverso contenuto energetico, sono definiti **isomeri**. Gli isomeri a più alto contenuto di energia (eccitati), indicati con l'aggiunta di una **m** (metastabile) vicino alla loro massa, tendono a rilasciare l'eccesso di energia attraverso l'emissione di (una o più) radiazioni elettromagnetiche. Sono ad esempio isomeri:  $^{242m}_{95}\text{Am}$  e  $^{242}_{95}\text{Am}$ .

Nella letteratura scientifica quando una o più grandezze che definiscono il nuclide sono già identificate, oppure non sono rilevanti ai fini della trattazione, si utilizzano delle notazioni semplificate, tipo:  $^{95}\text{Am}$ ,  $^{242}\text{Am}$ , Am-242, Am(242), Am(242m) ecc.

La **massa atomica** è espressa in unità di massa atomica (u.m.a.), equivalente convenzionalmente ad 1/12 della massa del nuclide  $^{12}_6\text{C}$  (Carbonio-12) nel suo stato energetico fondamentale, al quale viene attribuita una massa esattamente pari a 12 u.m.a. Ne consegue che protoni e neutroni hanno una massa approssimativamente di 1 u.m.a., corrispondente a  $1,66 \cdot 10^{-24}$  g (1/numero di Avogadro).

dotti di reazione rispetto alla somma delle masse di reagenti (di circa 0,1%) è trasformata in energia (circa 200 MeV per singola fissione), secondo la ben nota equazione di Albert Einstein,  $E=mc^2$ .

Ne consegue che la massa dei prodotti di fissione è praticamente la stessa del materiale fissile di partenza. In confronto un atomo di carbonio, che reagisce con l'ossigeno per formare anidride carbonica, produce energia per circa 4 eV. La reazione chimica, quindi, rispetto a quella nucleare è circa 50 milioni di volte meno energetica.

Altre reazioni nucleari avvengono nel nocciolo del reattore parallelamente alla reazione di fissione. Parte della grande quantità di neutroni liberi può essere catturata da nuclei di altri elementi e produrre atomi più pesanti, anch'essi generalmente radioattivi. Le famiglie dei prodotti della cattura neutronica sono, a grandi linee, i transuranici e i prodotti di attivazione. I primi si formano per cattura neutronica da parte dell'Uranio dello stesso combustibile che, dopo uno o più stadi di decadimento, si trasforma in atomi sufficientemente stabili da essere separati ed utilizzati (per esempio il plutonio come combustibile nucleare), mentre i secondi si formano a seguito di cattura neutronica da parte degli atomi che costituiscono i materiali strutturali (Fe, Co, Ni ecc.) dei vari componenti del reattore.

I materiali fissili sfruttati industrialmente sono l'Uranio ( $^{235}\text{U}$ ), che si trova in natura, ed il plutonio che

viene prodotto in reattore. Altri nuclidi possono essere fissionati (ad esempio gli attinidi minori, anch'essi prodotti attraverso varie sequenze di catture neutroniche e decadimenti radioattivi), ma il mantenimento delle condizioni di fissione risulta molto problematico e di fatto non sono ancora sfruttati industrialmente.

Caratteristica fondamentale delle reazioni nucleari è l'utilizzo e la produzione di elementi radioattivi. Lo stesso Uranio naturale è radioattivo.

La radioattività è un fenomeno fisico spontaneo che deriva dall'instabilità di alcuni particolari atomi (radionuclidi) che si trasformano in un altro tipo di atomo, emettendo una radiazione ionizzante particellare (alfa, beta ecc.) e/o elettromagnetica (raggi X e gamma). Il nuovo atomo può essere stabile e il processo di decadimento si chiude, oppure può essere ancora instabile e, quindi, si comporta come il radionuclide di partenza, dando luogo ad un nuovo processo di decadimento.

Procedendo in questa maniera, alla fine tutti gli atomi radioattivi raggiungeranno, inevitabilmente, uno stato di stabilità e la materia che li contiene diminuirà progressivamente la sua radioattività, fino a raggiungere valori trascurabili. Ogni radionuclide, però, è caratterizzato da una diversa velocità di decadimento, fisicamente espressa come "tempo di dimezzamento" ( $T_{1/2}$ ), ovvero il tempo necessario affinché un certo numero di atomi di quel radionu-

### Decadimento radioattivo e radioattività

Il **decadimento radioattivo** è il processo attraverso il quale un nuclide instabile si disintegra spontaneamente, emettendo parte della materia del suo nucleo atomico sotto forma di particelle Alfa (nucleo di Elio), Beta (elettrone+antineutrino), Beta positive (positrone+neutrino), Protoni (singoli o coppie), Neutroni ecc., con emissione dell'energia in eccesso sotto forma di radiazioni elettromagnetiche (raggi X e gamma).

Il fenomeno del decadimento radioattivo è alla base della **radioattività** ed i nuclidi soggetti a decadimento radioattivo sono denominati **radionuclidi**.

La probabilità ( $P$ ) che un determinato radionuclide subisca una disintegrazione in un tempo  $dt$  è dato dalla formula  $P = \lambda dt$ , dove  $\lambda$  è la **costante di decadimento** (specifica per ciascun radionuclide). Una popolazione di  $N$  atomi di tale radionuclide, dopo un tempo  $dt$ , sarà diminuita di  $dN$  atomi, quindi  $P = -dN/N$  e  $-dN/N = \lambda dt$ , che in forma integrata equivale a:  $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , dove  $N$  è il numero di atomi al tempo  $t$ ,  $N_0$  è il numero di atomi iniziali al tempo  $t_0$  (inizio del processo di decadimento).

L'**attività** è definita come numero di disintegrazioni in un tempo prestabilito e l'unità di misura **Becquerel** (Bq) corrisponde ad una disintegrazione al secondo. Essa è determinata dal rapporto  $-dN/dt$  che equivale a  $\lambda N$ , pertanto:  $A = A_0 e^{-\lambda t}$ , dove  $A$  è l'attività al tempo  $t$ ,  $A_0$  è l'attività iniziale al tempo  $t_0$ .

Il **Tempo di dimezzamento** ( $T$ ) è definito come il tempo necessario affinché il numero di atomi radioattivi si riduca alla metà di quella iniziale (ovvero, l'attività diventa la metà di quella iniziale), pertanto  $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T}$ , da cui  $T = \ln(2) / \lambda$ .

clide, per effetto del decadimento, si riduce alla metà di quella iniziale. Tale tempo può variare, a seconda del tipo di radionuclide, da frazioni di secondo a diverse decine di migliaia di anni. Così, per un materiale contenente  $^{137}\text{Cs}$ , caratterizzato da un  $T_{1/2}$  di circa 30 anni, il contenuto di radioattività dopo 300 anni si è ridotto di 1.000 volte e dopo ulteriori 300 anni si è ridotto di 1 milione di volte. Analogamente un materiale che contiene  $^{239}\text{Pu}$ , caratterizzato da un  $T_{1/2}$  di circa 24.400 anni, per ridurre di 1.000 volte il suo contenuto di radioattività deve attendere 244.000 anni e per ridurlo di 1 milione di volte deve attendere quasi mezzo milione di anni!

Per quanto riguarda l'Uranio – presente in natura con due principali isotopi, entrambi radioattivi,  $^{238}\text{U}$  (99,27 atomi %,  $T_{1/2}= 4,47 \cdot 10^9$  anni) e  $^{235}\text{U}$  (0,72 atomi %,  $T_{1/2}= 7,04 \cdot 10^8$  anni)<sup>[1]</sup>, con tracce di  $^{234}\text{U}$  (0,0055 atomi %,  $T_{1/2}= 2,44 \cdot 10^5$  anni) generato dal decadimento del  $^{238}\text{U}$  – sostanzialmente si tratta di quello primordiale, formatosi verosimilmente nella supernova che ha generato la nube di polvere stellare dalla quale si è formato il nostro sistema solare. Altri elementi radioattivi naturali hanno la stessa origine, come ad esempio il  $^{40}\text{K}$  ( $T_{1/2}= 1,28 \cdot 10^9$  anni).

La radioattività, dunque, oltre a poter essere generata artificialmente, è prodotta da fenomeni naturali, come peraltro anche dalla radiazione cosmica che bombarda costantemente la terra. In definitiva esiste la "radioattività di fondo naturale" diffusa dovunque nell'ambiente ed a livelli molto variabili: nei terreni, nelle acque, nell'aria, nei materiali da costruzione, negli alimenti, nelle acque potabili, negli oggetti della vita quotidiana. Anche gli esseri viventi sono radioattivi: contengono radionuclidi come  $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,

$^3\text{H}$  e molti altri elementi radioattivi naturali.

La questione più importante, però, è capire quali sono gli effetti delle radiazioni ionizzanti sull'uomo e, in generale, sugli esseri viventi e sull'ambiente. Dette radiazioni sono in grado di produrre ionizzazione nella materia che, a sua volta, può evolvere in una ulteriore modificazione, quindi, nel caso degli esseri viventi, trasformarsi in un danno biologico, trascurabile o molto serio, a seconda della quantità (dose, o equivalente di dose) di energia trasferita dalla radiazione alla materia biologica, dalle caratteristiche della radiazione e dalle caratteristiche tessuto biologico stesso.

L'equivalente di dose radiologica alle persone, associata alla radioattività di fondo naturale, mediamente è di circa 3 mSv/anno, anche se oscilla nell'intervallo 1-10 mSv/anno e, in particolari aree, può raggiungere 20 mSv/anno. Per tali valori, tuttavia, non si rilevano rischi per la salute delle persone<sup>[2]</sup>. Le attività industriali che fanno uso o producono materiali radioattivi, secondo la normativa italiana, devono essere progettate e condotte in modo da non attribuire agli individui della popolazione una dose radiologica superiore a 0,01 mSv/anno e il limite massimo di dose radiologica alla popolazione, aggiuntiva a quella naturale, è stabilito in 1 mSv/anno.

## Ciclo del combustibile nucleare

In *figura 1* è riportata una ricostruzione delle varie fasi del ciclo del combustibile, come definite dalle principali organizzazioni internazionali.

L'Uranio naturale è abbastanza diffuso nelle aree continentali, nelle rocce della crosta terrestre, nei suoli, nei depositi fosfatici ecc., ma prima di arriva-

### Attinidi, Attinidi Minori e Transuranici

Gli Attinidi sono gli elementi chimici del 7° periodo della tabella periodica degli elementi, aventi come primo elemento l'Attinio (Ac) da cui prendono il nome: Ac; Th; Pa; U; Np; Pu; Am; Cm; Bk; Cf; Es; Fm; Md; No. Gli **Attinidi Minori** sono gli Attinidi presenti nel combustibile nucleare esausto in minore concentrazione rispetto all'Uranio ed al Plutonio, che sono denominati **Attinidi Maggiori**. I più importanti **Attinidi Minori** nel combustibile nucleare esausto sono: Np(237); Am(241 e 243); Cm(da 242 a 248); Cf(da 249 a 252).

I **Transuranici** sono gli Elementi aventi numero atomico superiore a 92, quello dell'Uranio. Essi sono tutti di origine artificiale e si formano dall'Uranio stesso o Elementi a più basso numero atomico attraverso sequenze di catture neutroniche e decadimenti radioattivi.

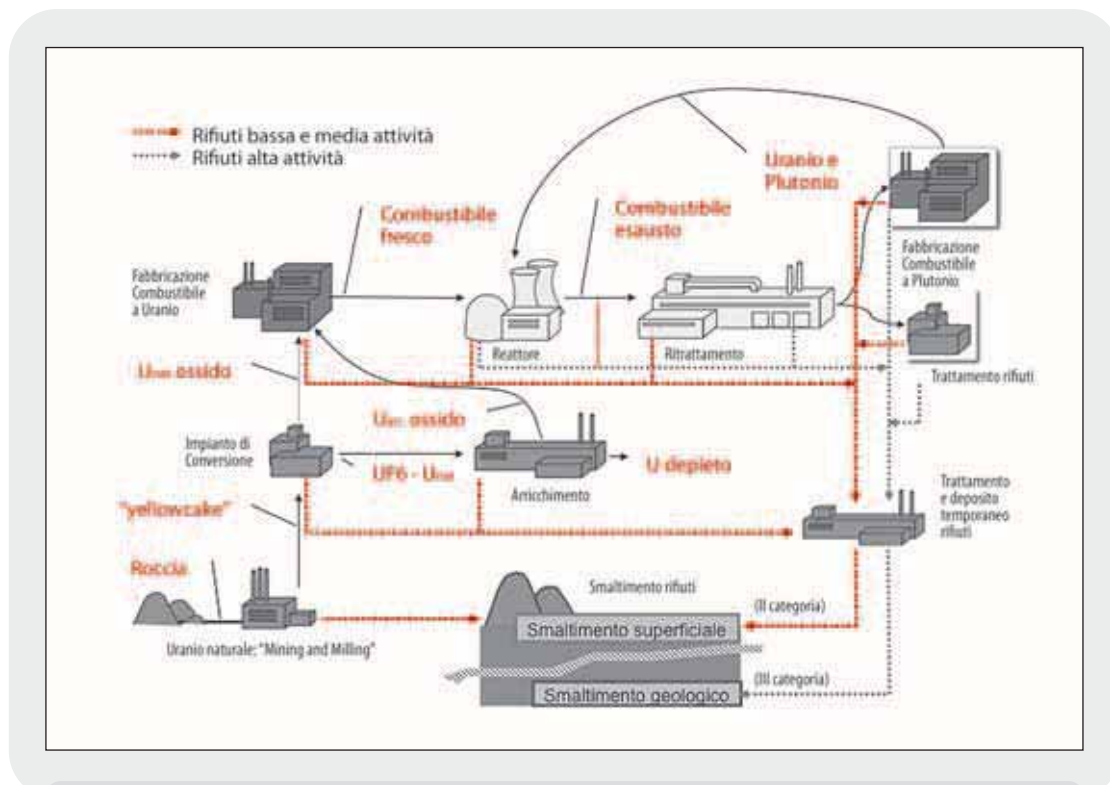


Figura 1

Ciclo chiuso del combustibile nucleare

Fonte: F. Troiani, presentazione dell'Associazione Nucleare Italiana alla camera dei Deputati, luglio 2008

riflettore su

re al reattore è necessario procedere con una lunga serie di attività di front-end (estrazione, conversione, arricchimento e fabbricazione del combustibile). La sua concentrazione è molto variabile e grazie alla sua alta solubilità è presente nei corpi idrici, tra cui l'acqua di mare, ed è possibile estrarlo anche per lisciviazione delle rocce nelle quali è contenuto. Secondo i dati riportati nel *Red Book 2007*<sup>[3]</sup>, le risorse identificate ed estraibili ad un costo inferiore a 130 \$/Kg ammontano a 5,47 milioni di tonnellate (MtU), mentre largamente superiori sono le risorse stimate (10,5 MtU) e le risorse non-convenzionali (22 MtU), ovvero materiali dove l'Uranio può essere estratto come prodotto secondario. Tali quantità sono sufficienti ad alimentare il parco attuale degli oltre 430 reattori in esercizio, rispettivamente per 100, 300 e 700 anni<sup>[4]</sup>.

I prezzi dell'Uranio naturale sono molto variabili e non sono esenti da azioni speculative. Attualmente, per l'Uranio estratto da miniera (con Ura-

nio > 0,1 %) sono inferiori ai 130 \$/Kg, mentre per quello derivante dalla lavorazione dei fosfati è dell'ordine di 200 \$/Kg<sup>[5]</sup>.

Le operazioni di **estrazione** e **lavorazione** del minerale grezzo per ottenere il prodotto di partenza  $U_3O_8$  *yellowcake*, sono operazioni simili a quelle di estrazione e trattamento di altri minerali<sup>[4]</sup>, con la differenza che la sua radioattività richiede alcune precauzioni in più per la tutela dei minatori e dell'ambiente ed una idonea sistemazione dei materiali di scarto, che normalmente sono sistemati nella miniera stessa. Nel 2008, su base mondiale, gli impianti di estrazione e lavorazione censiti e controllati dalla Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) erano 37<sup>[6]</sup>.

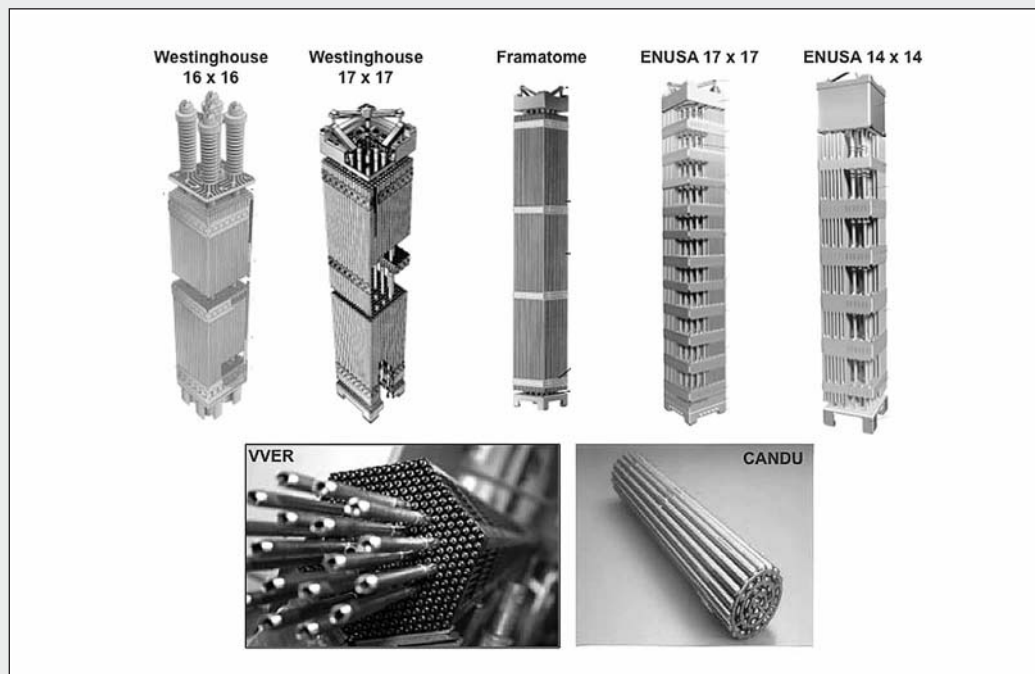
L'Uranio naturale è sfruttato direttamente solo in un tipo particolare di reattore ad acqua pesante (filiera CANDU). Nella totalità degli altri reattori ad acqua leggera, per sostenere la reazione di fissione nucleare è necessario aumentare la concentrazio-



ne (arricchimento) dell'isotopo  $^{235}\text{U}$ , da 0,72% a 3,5-5%. L'ossido di Uranio naturale, quindi, attraverso un processo di **conversione** è trasformato in gas esafluoruro di Uranio ( $\text{UF}_6$ ), che si presta meglio al successivo processo di arricchimento. Nel 2008, su base mondiale, gli impianti di conversione, censiti e controllati dalla IAEA erano 22<sup>[6]</sup>.

Il processo di **arricchimento** è una fase molto delicata dell'intero ciclo del combustibile nucleare, sia per i risvolti tecnici ed economici sia per le possibilità di diversione nell'utilizzo del materiale fissile. L'Uranio arricchito a valori superiori al 90% può essere utilizzato per la costruzione di ordigni nucleari e questa possibilità suscita non poche preoccupazioni. In ogni caso per il processo di arricchimento è sfruttata la diversa massa dei gas  $^{235}\text{UF}_6$  e  $^{238}\text{UF}_6$ , attraverso sistemi di diffusione gassosa o ultracentrifugazione. Altri processi di separazione, che si basano sulla diversa massa o differente (sebbene piccolissima) struttura elettronica degli isotopi da separare, possono essere sfruttati e sono allo studio, come ad

esempio la ionizzazione selettiva mediante laser di un solo isotopo per estrarlo con appropriati campi elettromagnetici, ma a livello industriale non sembrerebbero (il condizionale è d'obbligo per gli ovi motivi di riservatezza sul tema) a tutt'oggi sfruttati. Nel 2008, su base mondiale, gli impianti di arricchimento, censiti e controllati dalla IAEA, erano 13<sup>[6]</sup>. L'esafluoruro di Uranio, arricchito in  $^{235}\text{U}$ , mediante reazione di idrolisi è trasformato in ossido di Uranio e ridotto a  $\text{UO}_2$ , il quale, dopo trasformazione in pellets cilindrici e sinterizzazione a 1.400 °C per fargli assumere consistenza ceramica, capacità di conduzione termica e resistenza agli stress termici, è impilato in tubi metallici di zircaloy. Le barrette di zircaloy, sigillate e verificate, sono pronte per la fase finale di **fabbricazione del combustibile**, dove sono assemblate in fasci di qualche centinaio (figura 2), in una struttura metallica di precisione con distanziatori calibrati, al fine di permettere sia l'ottimale flusso dell'acqua di refrigerazione sia il mantenimento della geometria ottimale per lo sfrut-



**Figura 2**  
Esempi di elementi di combustibile  
Fonte: Global Nuclear Energy Partnership

tamento dei flussi neutronici. Nel 2008, su base mondiale, gli impianti di fabbricazione, censiti e controllati dalla IAEA, erano 40<sup>[6]</sup>.

Il processo di arricchimento produce notevoli quantità di Uranio impoverito (o depleto) con contenuto di  $^{235}\text{U}$  a valori di circa 0,2%. Ne consegue che circa 85% dell'Uranio naturale di partenza risulta impoverito. L'Uranio impoverito, sebbene caratterizzato da bassa radioattività, ha un uso molto limitato nel settore civile e solo piccoli quantitativi sono utilizzati nell'industria nucleare (fabbricazione di combustibile con plutonio, schermi ecc.). In generale esso è immagazzinato per futuri usi o smaltito come rifiuto.

La geometria e le dimensioni degli elementi di combustibile sono molto variabili, così pure le caratteristiche del combustibile nucleare (es: arricchimento) e dei materiali di assemblaggio (figura 2). Così, oggi, più della metà dei reattori in esercizio hanno un solo fornitore di combustibile ed oltre un terzo dei reattori in esercizio hanno appena due fornitori.

Questa peculiarità, in aggiunta al fatto che il mercato mondiale di combustibile per l'85% è in mano a solo quattro compagnie (Areva 31,7%, Westinghouse/Toshiba 25,5%, Global Nuclear Fuel 19,0%, Atomenergoprom 7,8%)<sup>[7]</sup> e in considerazione della crescita della domanda, genera qualche preoccupazione sia a livello economico, dove la mancanza di competizione potrebbe generare tendenze al rialzo dei prezzi ed azioni speculative, sia a livello di sicurezza, dove l'indisponibilità del combustibile a prezzi sostenibili potrebbe spingere i paesi emergenti a sviluppare i cicli del combustibile e le tecnologie sensibili fuori dal controllo internazionale e quindi aumentare i rischi della proliferazione delle armi nucleari.

In base a tali considerazioni<sup>[7]</sup>, il *Reliable Nuclear Fuel Services Working Group* dell'iniziativa statunitense *Global Nuclear Energy Partnership*, ha concluso che le strategie di approvvigionamento a livello nazionale dovrebbero prevedere dei contratti di fornitura a lungo termine, soprattutto per quelle realtà (come l'Italia) che avviano le attività nucleari. La stessa IAEA, di fronte all'emergere di queste problematiche, ha commissionato uno studio ad un gruppo di esperti, i quali hanno individuato la soluzione della problematica nelle seguenti linee stra-

tegiche (*Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle*<sup>[8]</sup>):

- Contratti a lungo termine con forme di banche governative del combustibile; strumenti di leasing e offerte di take-back del combustibile; offerte di stoccaggio a lungo termine e di smaltimento del combustibile esausto; banche commerciali private del combustibile;
- Creazione di sistemi internazionali di rifornimento del combustibile, garantiti dalla IAEA;
- Promozione della conversione volontaria delle attuali capacità produttive ad un sistema multilaterale di fornitura, anche al fine di aumentare la fiducia dei potenziali acquirenti sulle future possibilità di approvvigionamento;
- Creazione di sistemi di rifornimento multinazionali o regionali, costruendo nuovi impianti di fabbricazione in multiproprietà;
- Sviluppo di un ciclo di combustibile nucleare con forti accordi regionali o continentali, con ampia cooperazione e con la partecipazione della IAEA.

Il combustibile nucleare nel reattore produce energia, prodotti di fissione (PdF) e molti altri elementi radioattivi o stabili. Solo l'isotopo  $^{235}\text{U}$ , però, è in grado di sostenere la fissione; pertanto un combustibile fresco con arricchimento del 3,5% ( $^{238}\text{U} = 96,5\%$ ;  $^{235}\text{U} = 3,5\%$ ), a seconda delle condizioni di irraggiamento, dopo 12-24 mesi presenta una notevole riduzione di tale isotopo ed è necessario procedere al ricambio del combustibile<sup>[4]</sup> (che in realtà, per questioni pratiche e di miglior sfruttamento, avviene in fasi, cambiando solo una parte del combustibile per volta).

Durante l'irraggiamento una parte dell'isotopo  $^{238}\text{U}$ , per catture neutroniche e successivi decadimenti, è trasformato in  $^{239}\text{Pu}$ , il quale partecipa alla reazione di fissione contribuendo per circa 1/3 alla produzione di energia e il combustibile esausto contiene:  $^{238}\text{U} \approx 94\%$ ;  $^{235}\text{U} \approx 1\%$ ; Pu e attinidi  $\approx 1\%$ ; PdF  $\approx 3,5\%$ , Altri  $\approx 0,5\%$ .

L'energia termica prodotta nel nocciolo del reattore è trasformata in energia elettrica attraverso la generazione di vapore ad alta pressione e l'utilizzo di un gruppo turbina-alternatore. Il rendimento del processo è di circa il 35%, per cui quasi 2/3 dell'energia termica è persa nel circuito di raffreddamento del reattore o destinata ad altri usi (riscal-

damento a bassa temperatura). L'energia termica prodotta dalla fissione nucleare per unità di massa del combustibile (*burn-up*) è un importante parametro per stabilire il grado di sfruttamento del combustibile nucleare.

Aumentare il *burn-up* (partendo ovviamente da arricchimenti maggiori) ottimizza il processo produttivo, con minore produzione dei rifiuti a lunga vita o di quelli originati da materiali strutturali del combustibile, oltre all'allungamento della durata della carica di combustibile (*Tabella 1*). I prodotti di fissione crescono, ma sono ovviamente sempre la stessa quantità per unità di energia elettrica prodotta, essendo praticamente equivalenti alla quantità di materiale nucleare fissionato. Pertanto la tendenza è quella di alimentare il reattore con combustibile a maggior arricchimento (fino al 5%) o con aggiunta di Pu (combustibile MOX) e spingere il *burn-up* a valori più alti (60 GWd/tHM), compatibilmente con le capacità di resistenza agli stress neutronici e termici del combustibile stesso<sup>[4]</sup>.

Il **combustibile esausto**, scaricato dal reattore viene avviato alle attività di *back-end* (stoccaggio temporaneo e smaltimento/riprocessamento). Esso contiene una grande quantità di radioattività e le catene di decadimento radioattivo producono una sensibile quantità di calore, soprattutto all'inizio. Il combustibile, pertanto, è temporaneamente immagazzinato per qualche anno nelle piscine di stoccaggio del reattore, affinché possa smaltire il calore di decadimento. Dopo tale fase, esso può essere stoccato a secco in particolari contenitori idonei per il trasporto e per il deposito temporaneo a lungo termine (superiore a 50 anni) in attesa di essere smaltito, o ri-

processato, oppure semplicemente stoccato in attesa di decisione.

Il **riprocessamento** (o ritrattamento) del combustibile esausto è un processo atto a recuperare il materiale nucleare pregiato (U e Pu) che può essere riutilizzato nella fabbricazione del combustibile. Il plutonio può essere utilizzato al posto dell'isotopo <sup>235</sup>U come elemento fissile in combustibili particolari ad ossidi misti Uranio-Plutonio (MOX), mentre l'Uranio, che presenta un arricchimento superiore a quello dell'Uranio naturale, rappresenta un materiale pregiato riutilizzabile nella filiera del ciclo del combustibile (fabbricazione di nuovo combustibile dopo nuovo arricchimento o aggiunta di Uranio a maggiore tenore di <sup>235</sup>U).

Il processo di ritrattamento rende disponibile grandi quantità di plutonio che può essere utilizzato per la costruzione di ordigni nucleari e questa possibilità suscita molte preoccupazioni.

Il ritrattamento del combustibile nucleare è una strategia adottata solo in alcuni paesi (es.: Francia, Regno Unito, Giappone ecc.) e gli impianti censiti e controllati dalla IAEA, nel 2008, a livello mondiale erano solo 5<sup>[6]</sup>.

### Rifiuti radioattivi: origini e smaltimento

Il rifiuto radioattivo è un "materiale radioattivo in forma solida, liquida o gassosa per il quale non è previsto alcun ulteriore uso e che è tenuto sotto controllo come rifiuto radioattivo dall'autorità di controllo a ciò preposta". Così lo definisce la Convenzione congiunta sulla sicurezza della gestione

**Tabella 1** – Impatto sul *back-end* in relazione all'aumento del *burn-up* del combustibile esausto

Burn-up (GWd/tHM)	33	45	60
Prodotti di Fissione (Kg/TWhe)	140	140	140
Materiali strutturali e guaine del combustibile (Kg/TWhe)	1.210	890	660
Uranio riciclabile (Kg/TWhe)	3.830	2.810	2.100
Attinidi Minori (Kg/TWhe)	4,3	4,5	4,7
Plutonio riciclabile (Kg/TWhe)	37	32	27

Legenda: GWd: gigawatt-days di energia da fissione; tHM: tonnellate di metallo pesante (U e Pu); TWhe: terawatt-ora di energia elettrica prodotta

Fonte: OECD-NEA, *Nuclear Energy Outlook*, 2008



del combustibile nucleare esausto e dei rifiuti radioattivi, gestita dalla IAEA e ratificata dall'Italia agli inizi del 2006.

Sembrirebbe una definizione di applicabilità non immediata o addirittura ambigua, ma non è così, si tratta solo di stabilire su quali elementi si basa l'autorità di controllo per distinguere un rifiuto radioattivo da un rifiuto convenzionale, non radioattivo.

I rifiuti che contengono radioattività tale da poter attribuire alla popolazione una dose radiologica superiore al 0,01 mSv/anno (come precedentemente riportato), sono considerati radioattivi, quindi mantenuti sotto controllo ed isolati dall'ambiente con opportuni ed efficaci sistemi. Risulta, quindi, immediatamente evidente che l'accertamento del contenuto di radioattività del rifiuto è di fondamentale importanza per stabilire il pericolo ad esso associato, le successive fasi di trattamento ed il suo destino finale.

La **caratterizzazione** è una delle fasi più importanti dell'intero processo di gestione dei rifiuti radioattivi. Attraverso il processo di caratterizzazione si riescono a stabilire le caratteristiche chimiche, fisiche, biologiche e meccaniche del rifiuto, il suo contenuto di radioattività, la resistenza agli agenti che ne possono ridurre la stabilità e rendere la radioattività libera di fuoriuscire e disperdersi nell'ambiente.

Dopo la loro produzione, i rifiuti radioattivi sono temporaneamente stoccati e caratterizzati, per essere poi sottoposti a **condizionamento**, ovvero specifici trattamenti chimici e fisici, diversi a seconda del tipo di rifiuto, per la loro trasformazio-

ne in una forma solida stabile e duratura, che ne permetta in modo sicuro la manipolazione, lo stoccaggio, il trasporto e infine lo smaltimento. Il rifiuto condizionato è quindi un manufatto costituito dal materiale solido, in genere cemento o vetro, inglobante la radioattività e dal contenitore esterno in acciaio o leghe speciali.

I rifiuti radioattivi sono **classificati** in base al contenuto di radionuclidi, alla loro origine, allo stato fisico, al tipo di radiazione emessa (alfa, beta, gamma), al tempo di dimezzamento dei radionuclidi presenti. Ai fini dello smaltimento finale, i criteri principali di classificazione sono il contenuto di radioattività, che determina il livello di protezione richiesto e il tempo di dimezzamento dei radionuclidi contenuti, che definisce il tempo per il quale deve essere garantito l'isolamento dall'ambiente. La Guida Tecnica n. 26 dell'autorità di controllo è la normativa tecnica italiana di riferimento, che stabilisce tre categorie di rifiuto radioattivo ed alla quale si deve far riferimento per la gestione, il condizionamento e lo smaltimento dei rifiuti radioattivi.

Appartengono alla **I categoria** i rifiuti con basso contenuto di radioattività e che decadono, in tempi dell'ordine di mesi o al massimo di qualche anno. Per questa tipologia di rifiuto è sufficiente la conservazione in sicurezza, affinché dopo decadimento possano essere gestiti come rifiuti convenzionali o speciali.

I rifiuti di **II categoria** sono quelli a contenuto medio di radioattività e che entro un massimo di qualche centinaio di anni raggiungono concentrazioni di radioattività dell'ordine di alcune centinaia di

### Dose ed Equivalente di dose

La **Dose** è la quantità di energia depositata da una radiazione nella materia. La dose (D) è misurata in Gray (Gy). 1Gy corrisponde all'energia (Joule) depositata in un Kg di materia.

La stessa Dose sulla materia biologica può produrre danni diversi a seconda della tipologia ("qualità") della radiazione ionizzante che la colpisce. Per tener conto di tale effetto è stato attribuito un **fattore di qualità** ( $Q_f$ ) di ciascun tipo di radiazione, moltiplicativo della dose.

L'**Equivalente di Dose** ( $H_T$ ) corrisponde alla Dose, moltiplicata dal fattore di qualità, che vale 1 per le radiazioni elettromagnetiche e le radiazioni beta, 5 per i Protoni, da 5 a 20 per i Neutroni a seconda della loro energia e 20 per le radiazioni Alfa ed i frammenti di fissione:  $H_T = Q_f D$

L'Equivalente di dose è misurata in **Sievert** (Sv), ma spesso ai fini pratici è utilizzato il sottomultiplo milliSievert (mSv).

Bq/g, nonché quei rifiuti contenenti radionuclidi a vita molto lunga purché in concentrazioni di tale ordine. Tali rifiuti devono essere trattati e condizionati.

Appartengono, infine, alla **III categoria** i rifiuti che richiedono migliaia di anni per raggiungere concentrazioni di radioattività di alcune centinaia di Bq/g, nonché quelli contenenti emettitori alfa e di neutroni, indipendentemente dal loro periodo di dimezzamento. Fra tali rifiuti, che devono essere trattati e condizionati, vengono considerati anche tutti i rifiuti che non rientrano nella II categoria, in particolare il combustibile esausto quando non è sottoposto a riprocessamento.

I rifiuti a bassa attività (I categoria) provengono generalmente da installazioni nucleari, applicazioni medicali, industria, ricerca scientifica e includono materiali contaminati quali: carta, stracci, indumenti protettivi, filtri e liquidi vari. L'esercizio di reattore nucleare di media potenza genera circa 200 m<sup>3</sup> all'anno di rifiuti appartenenti a questa categoria. Un contributo importante proviene anche dallo smantellamento degli impianti nucleari a fine vita.

I rifiuti a media attività (II categoria) provengono generalmente da centrali nucleari, impianti del ciclo del combustibile (fabbricazione del combustibile, impianti di ritrattamento del combustibile irraggiato, installazioni di ricerca ecc.). Essi includono generalmente scarti di lavorazione, rottami metallici, liquidi vari, fanghi, resine esaurite. L'esercizio di reattore nucleare di potenza genera mediamente circa 100 m<sup>3</sup> all'anno di tali rifiuti. Un significativo contributo proviene dallo smantellamento degli impianti nucleari a fine vita.

I rifiuti ad alta attività (III categoria) contengono la maggior parte dei prodotti di fissione e dei transuranici prodotti nel reattore. Sono tipicamente rifiuti ad alta attività: il combustibile irraggiato esausto, come tale se non è ritrattato (strategia dello smaltimento diretto), oppure i liquidi acquosi del primo ciclo di estrazione, se il combustibile è soggetto a ritrattamento. L'esercizio di un reattore nucleare di potenza genera circa 30 tonnellate all'anno di combustibile irraggiato esausto e, nel caso di ritrattamento, questo quantitativo corrisponde a circa 4 m<sup>3</sup> di

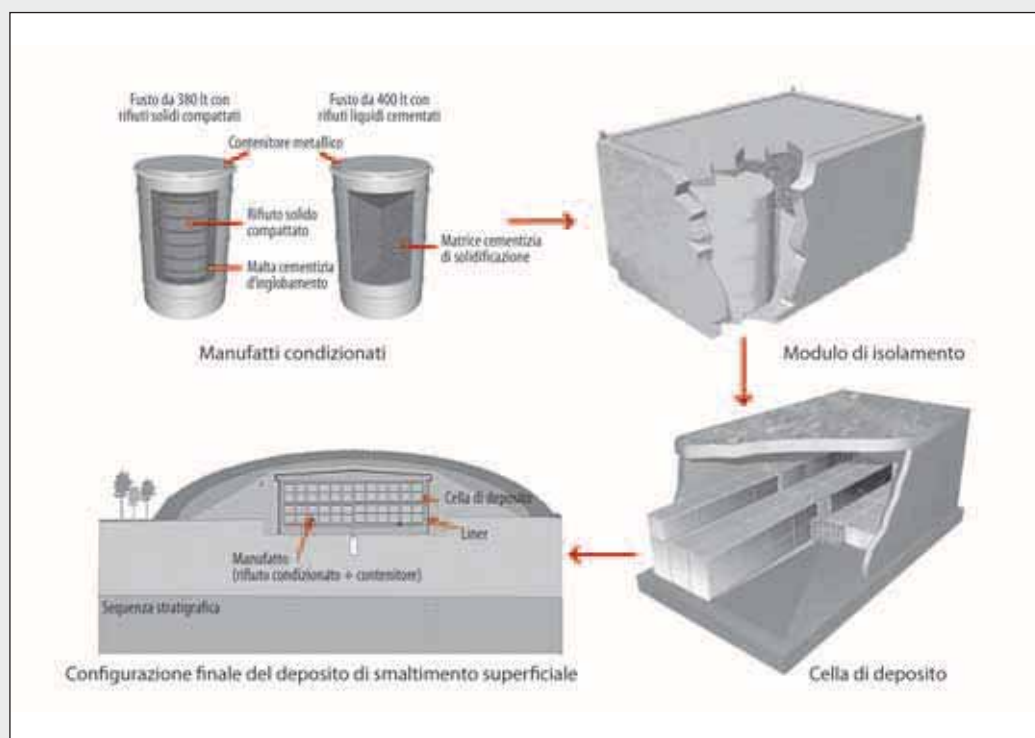
prodotti della vetrificazione dei rifiuti liquidi ad alta attività.

Come accennato, una quantità significativa di rifiuti radioattivi è prodotta durante la fase di smantellamento degli impianti nucleari e si tratta prevalentemente (circa 95%) di rifiuti a bassa e media attività. In base alle esperienze maturate dagli operatori dei paesi membri dell'OCSE, il quantitativo di rifiuto prodotto dallo smantellamento è molto variabile e dipende dal regime regolatorio in atto in ciascun paese, dalle condizioni al contorno, dalla dimensione degli impianti da smantellare, sia in termini geometrici sia in termini di potenza installata, dai materiali di costruzione utilizzati e dalla loro messa in opera, dal combustibile nucleare utilizzato, dai livelli di *burn-up* raggiunti ecc.

Per le filiere dei *Pressurized Water Reactor* (PWR) e dei *Boiling Water Reactor* (BWR), che sono i principali candidati per il rientro nella filiera nucleare produttiva in Italia, le quantità di rifiuti generati dallo smantellamento sono molto limitate, mediamente inferiori alle 5.000 tonnellate per unità. Si deve inoltre sottolineare che, con la semplificazione del progetto nei nuovi reattori, si ottiene una sensibile riduzione di detti quantitativi.

I rifiuti radioattivi da smaltire sono una piccola parte dei rifiuti industriali pericolosi. La loro produzione mondiale annua ammonta a circa 0,4 milioni di tonnellate, mentre i rifiuti industriali pericolosi prodotti sono dell'ordine di circa 400 milioni di tonnellate l'anno ed includono componenti molto tossici. I rifiuti radioattivi prodotti in Italia e stoccati sugli impianti o nei depositi temporanei, in attesa di essere smaltiti, secondo l'inventario dell'autorità di controllo, nel 2005, ammontavano a circa 25 mila metri cubi<sup>[9]</sup>, ai quali andranno a sommarsi, nei prossimi 10-20 anni, alcune altre decine di migliaia di metri cubi, derivanti dal programma di smantellamento delle vecchie centrali. Anche il comparto della ricerca, medico-ospedaliero ed industriale contribuisce, con alcune centinaia di metri cubi l'anno, ad incrementare detti quantitativi.

Lo **smaltimento** dei rifiuti radioattivi si pone l'obiettivo principale della protezione delle popolazioni (presenti e future) e dell'ambiente fino a quando il contenuto di radioattività nei rifiuti



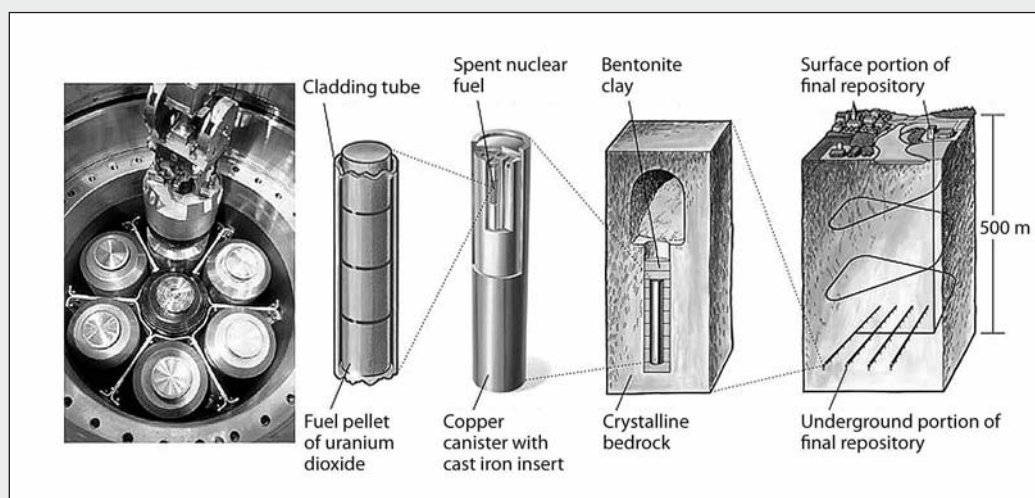
**Figura 3**  
Ciclo di smaltimento superficiale dei rifiuti radioattivi  
Fonte: Task Force Sito ENEA

non avrà raggiunto un livello comparabile con quello naturale, con dose radiologica alla popolazione sempre inferiore ai livelli stabiliti dalla normativa (0,01 mSv/anno). Per prevenire il rilascio della radioattività nell'ambiente, i rifiuti radioattivi sono quindi confinati all'interno di un adeguato numero di barriere artificiali e naturali (di provata capacità), che devono mantenersi efficienti per tutto il tempo necessario al decadimento radioattivo.

Per lo smaltimento dei rifiuti di II categoria è necessario predisporre opportune strutture tecniche per la loro conservazione ed isolamento dall'ambiente per un periodo di circa 3-4 secoli. I sistemi di **deposito superficiale** o sub-superficiale (*figura 3*), costituito dall'insieme sinergico delle matrici di condizionamento e da barriere artificiali (opere ingegneristiche), sono idonei a mantenere confinata la radioattività per tale periodo.

Tale metodologia è stata applicata con successo, su base mondiale, in oltre 150 installazioni, di cui un centinaio ancora in esercizio.

Per lo smaltimento dei rifiuti di III categoria, per i quali l'isolamento dall'ambiente deve essere garantito per alcune centinaia di migliaia di anni, le opere realizzate dall'uomo non forniscono sufficienti garanzie di durata. Per il loro smaltimento, quindi, si fa ricorso al **deposito geologico** (*figura 4*), che è costituito da barriere naturali stabili (formazioni saline, argillose, granitiche ecc.), capaci di mantenere confinata la radioattività per lunghi periodi. Le barriere artificiali (contenitori, materiali di riempimento e di sigillatura ecc.), associate a tale tipologia di smaltimento devono comunque garantire il confinamento della radioattività nel periodo iniziale e fino a quando le penetrazioni nella formazione geologica non si sono riformate in maniera stabile.



**Figura 4**  
Esempio di incapsulamento e smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi a lunga vita  
Fonte: Anders Ström, SKB, Svezia

Al momento, lo smaltimento geologico è stato adottato negli Stati Uniti per i rifiuti radioattivi a lunga vita di origine militare, in una formazione salina a 650 m di profondità nel New Mexico, con l'impianto *Waste Isolation Pilot Plant*. Sempre negli Stati Uniti il sito di Yucca Mountain, dopo alterne vicende, con l'amministrazione Obama è in fase di riconsiderazione. In Finlandia (Olkiluoto) e Svezia (Forsmarks), che hanno assunto la decisione di procedere con lo smaltimento geologico dei rifiuti a lunga vita e del combustibile esausto, in formazioni rocciose, sono in corso le attività di studio e di qualificazione del sito prescelto.

In molti paesi orientati allo smaltimento geologico (Belgio, Canada, Cina, Francia, Giappone, Germania, Regno Unito, Russia, Spagna, Svizzera ecc.) sono attivi laboratori sotterranei di studio e qualificazione di varie formazioni saline, argillose, granitiche. La dimostrazione dell'efficacia delle suddette barriere di isolamento è effettuata con lunghi ed approfonditi studi, verifiche delle mutue interazioni rifiuto-deposito, con test di laboratorio e in situ, che necessitano alcuni decenni.

## Prospettive future

La sostenibilità della filiera nucleare, ovvero l'ottimizzazione della gestione dei rifiuti a lunga vita ed una maggiore efficienza nell'utilizzo delle risorse di Uranio naturale, è uno degli obiettivi del programma *Generation IV*<sup>10]</sup>. I sistemi nucleari di IV generazione, che saranno disponibili per l'industrializzazione nei prossimi 20-30 anni, mediante l'impiego di reattori veloci autofertilizzanti e il riciclo dei materiali nucleari (U, Pu ed Attinidi Minori) saranno in grado di aumentare lo sfruttamento dell'Uranio di un fattore 60 ed allungare, quindi, la durata delle scorte naturali a diverse migliaia di anni.

Dal momento che gli attinidi costituiscono la componente più longeva dei rifiuti radioattivi, con il loro riciclo ai fini produttivi la quantità dei rifiuti da smaltire nei depositi geologici subirà una drastica riduzione. I processi di ritrattamento dei combustibili per reattori di IV generazione sono in una fase di sviluppo molto avanzata e prevedono il recupero del plutonio insieme agli attinidi minori, riducendo drasticamente i rischi di proliferazione.

Il Torio è un elemento naturale molto abbondante che per cattura neutronica e successivo decadimento si trasforma in  $^{233}\text{U}$  fissile.

L'utilizzo di Torio<sup>[4]</sup>, quindi, nei reattori nucleari può portare alla formazione di nuovo combustibile a base di  $^{233}\text{U}$ . I cicli del combustibile con il Torio sono stati già sperimentati in passato, anche in Italia con l'impianto ITREC, poi abbandonati sia per la maggiore complessità sia per la maggiore economicità del ciclo ad Uranio. La ripresa della domanda energetica ha spinto alcuni paesi a riconsiderare l'opzione del Torio e ad avviare studi specifici, anche in considerazione che il ciclo del Torio non produce attinidi, che sono i principali costituenti dei rifiuti a lunga vita.

## Conclusioni

L'energia nucleare è una fonte energetica abbondante e sicura, tecnologicamente matura, economicamente sostenibile ed industrialmente consolidata.

La radioattività associata al ciclo del combustibile nucleare è mantenuta sotto controllo in tutte le fasi, sia con mezzi tecnici, sia attraverso disposizioni normative, garantendo l'assenza di ri-

schì aggiuntivi a quelli derivanti dalla radiazione naturale di fondo.

Le risorse naturali di Uranio sono sufficienti a garantire gli approvvigionamenti per almeno il presente secolo a prezzi adeguati, sebbene, anche in previsione di una crescita della domanda, sia necessario riconsiderare la struttura del mercato del combustibile, aumentare il numero dei fornitori e sviluppare un sistema di garanzia delle forniture, gestito da organismi sovranazionali. Le varie fasi del ciclo del combustibile nucleare fanno uso di tecnologie molto avanzate e presentano interessanti opportunità di crescita.

I rifiuti radioattivi prodotti sono sotto controllo, esistono soluzioni provate e sono state maturate numerose esperienze per la loro corretta gestione e smaltimento. La strategia di gestione dei rifiuti radioattivi è fattore rilevante nella definizione ed attuazione del programma di smantellamento degli impianti nucleari a fine vita.

I robusti programmi di R&D puntano sia all'ottimizzazione degli attuali processi e tecnologie, sia alla realizzazione di sistemi più efficienti e sicuri e di minore impatto.

## Bibliografia

- [1] K.J.R. Rosman, P.D.P. Taylor, *Pure Appl. Chern.*, Vol. 70, No. 1, pp 217-235 (Great Britain, IUPAC 1998).
- [2] OECD-NEA, *Nuclear Energy Today*, 2003, ISBN 92-64-10328-7, pp 49-57.
- [3] OECD-NEA&IAEA, *Uranium 2007: Resources, Production and Demand "The Red Book"*, 2007.
- [4] P. Agostini, F. De Rosa, G. Gualdrini, A. Lantieri, A. Luce, S. Migliori, S. Monti, F. Padoani, R. Tinti, F. Troiani, F. Vettrano, *Nucleare da fissione: Stato e prospettive*, ENEA – 2008, ISBN 88-8286-189-9, pp 105-119.
- [5] M. Delpech, C. Loaec, CEA DEN/DDIN, Saclay, France, presentazione al GNEP Reliable Nuclear Fuel Services Working Group, 1-2 ottobre 2009, Varsavia, Polonia.
- [6] OECD-NEA, *Nuclear Energy Outlook 2008*, pp 370-406.
- [7] R. Goorevich, S. Oehlbert, DOE – *National Nuclear Security Administration*, presentazione al GNEP Reliable Nuclear Fuel Services Working Group, 1-2 ottobre 2009, Varsavia, Polonia.
- [8] *Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle*, IAEA, VIENNA, 2005.
- [9] *Dati di inventario radiologico nazionale*, 2005 (APAT, oggi ISPRA).
- [10] GIF, Generation IV International Forum, <http://www.gen-4.org/>