

# CLASSIFICAZIONE E SISTEMAZIONE IN SICUREZZA DELLE SCORIE NUCLEARI

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

L’energia nucleare, con una percentuale di produzione elettrica nel mondo pari al 17% (24% nei paesi OECD, 35% nell’Unione Europea) riduce annualmente l’immissione di 2.4 miliardi di tonnellate di anidride carbonica [1] nell’atmosfera (la cui concentrazione è aumentata sensibilmente nell’ultimo secolo [2]), costituendo altresì una forma di energia abbondante, poco soggetta alle fluttuazioni dei mercati, e rispettosa dell’ambiente. Prodotto della fissione del combustibile nucleare sono le cosiddette *scorie nucleari*. Con tale termine si intende indicare il combustibile che giunto alla fine del proprio ciclo di vita deve essere smaltito.

## CLASSIFICAZIONE DELLE SCORIE NUCLEARI

Bisogna tenere innanzitutto presente che i rifiuti nucleari vengono suddivisi in tre grandi categorie:

- **basso livello:** sono i più abbondanti e scarsamente pericolosi (ad esempio il materiale sanitario usato nella medicina nucleare, gli indumenti usa e getta forniti in una visita ad un impianto nucleare, etc.) che costituiscono il 90% delle scorie prodotte ma contengono solo l’1% della radioattività;
- **medio livello:** sono costituiti, ad esempio, dalle guaine degli elementi combustibili del reattore; richiedono una schermatura, ma costituiscono solo il 7% delle scorie (e contengono il 4% della radioattività);
- **alto livello:** costituiscono il 3% delle scorie ma contengono il 95% della radioattività e sono i più pericolosi a lungo termine.

Il caso più semplice è ovviamente quello dei rifiuti a basso livello. Per essi si tratta la problematica si riduce a mantenerli in deposito, anche presso gli stessi siti ove sono stati prodotti, per i pochi anni (al massimo) necessari al loro decadimento, prima di smaltirli come rifiuti convenzionali, tenendo conto delle loro eventuali altre caratteristiche di pericolosità [3].

## CONDIZIONAMENTO DEI RIFIUTI DI SECONDA E TERZA CATEGORIA

Per i rifiuti della seconda [3] e della terza categoria, a valle del trattamento con il quale si riduce il loro volume, ad esempio comprimendoli, la prima operazione da compiere è il *condizionamento*, che consiste (come verrà meglio dettagliato in seguito) nell’inglobare (o, nel caso di liquidi, solidificare) i rifiuti all’interno di una matrice solida, tipicamente cemento o, per una piccola parte, la più calda, di quelli della terza categoria, vetro. Con questa operazione, la radioattività resta imprigionata in una massa inerte, che costituisce una prima barriera tra la radioattività stessa e l’ambiente. La qualità dei manufatti ottenuti con il condizionamento deve rispondere a precisi standard, che vengono verificati attraverso prove, ad esempio, di resistenza alla compressione, al calore, alle stesse radiazioni, alla lisciviazione in caso di eventuale presenza di acqua, circostanza che viene comunque prevenuta attraverso opportuni provvedimenti riguardanti il deposito. I rifiuti condizionati possono essere posti in due tipologie di depositi:

- **depositi di tipo ingegneristici:** costituiti cioè esclusivamente da strutture fabbricate;
- **depositi di tipo geologico:** realizzati in formazioni profonde, ad esempio argillose o saline, la cui storia è tale da dare garanzie sulla loro stabilità futura, per tempi, appunto, geologici.

## DEPOSITI PER I RIFIUTI DI SECONDA CATEGORIA

I depositi ingegneristici sono adatti ad ospitare i rifiuti radioattivi della seconda categoria e sono costituiti da celle in cemento armato, edifici realizzati in superficie o a livello immediatamente sub-superficiale. La Figura 1 mostra un esempio di schema di una cella di un deposito superficiale.

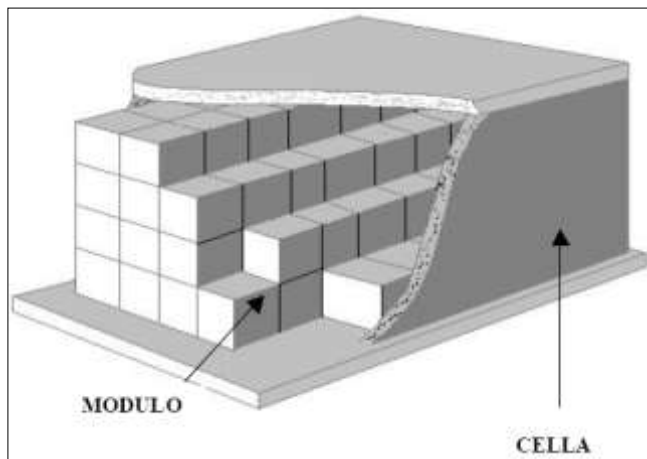


Figura 1

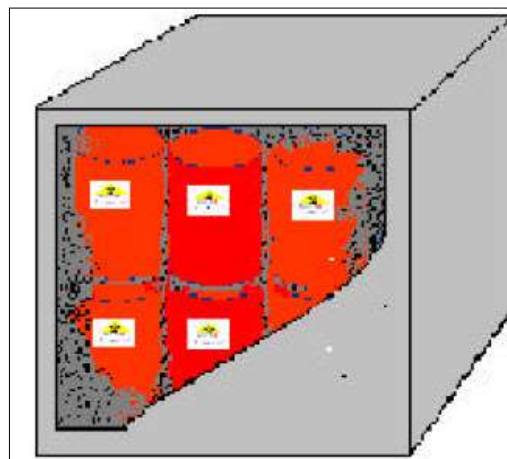


Figura 2

Le loro caratteristiche costruttive sono tali da garantire l'isolamento dei rifiuti per alcune centinaia di anni, quelli necessari al loro decadimento.

Nella soluzione da considerare migliore [3], i rifiuti, preventivamente cementati all'interno di fusti metallici, non vengono posti direttamente nelle celle, ma con essi vengono preliminarmente confezionati dei "moduli", contenitori anch'essi di cemento armato, al cui interno si dispone un certo numero di fusti, riempiendo quindi gli interstizi con ulteriore malta cementizia (Figura 2).

In tal modo, rispetto all'ambiente esterno si realizzano altre due barriere, costituite rispettivamente dal modulo e dalla cella di deposito.

Al deposito può essere conferita una robustezza tale da renderlo resistente, oltre che agli eventi naturali, anche a possibili atti di terrorismo.

Al di sotto della cella vengono disposti sistemi di raccolta dei drenaggi, dove si convoglierebbero le eventuali infiltrazioni di acqua. Il campionamento di tale acqua consentirebbe di rilevare, nel caso (altamente improbabile) dovesse esservi, la presenza di radioattività e quindi di intervenire. Con depositi di questo tipo possono infatti essere ottenuti elevati livelli di reversibilità, con la possibilità quindi di recuperare, ove se ne ravvisasse la necessità, moduli danneggiati per effettuare le opportune azioni di ripristino. I rifiuti non sono insomma abbandonati nell'ambiente, ma su di essi viene esercitata una sorveglianza per verificare l'assenza di anomalie, fino a che il contenuto residuo di radioattività non scenda a livelli tali da rendere ogni forma di monitoraggio del tutto superflua, fermo restando che anche in caso di perdite non rilevate, i rilasci di radioattività all'ambiente non potrebbero che essere comunque contenuti, data la natura sostanzialmente inerte del rifiuto condizionato.

Un'eventuale copertura finale con un manto di terreno potrebbe favorire l'inserimento delle strutture nell'ambiente circostante, tenendo conto che l'altezza delle celle non supera la decina di metri.

Depositi di questo tipo sono stati ormai ampiamente sperimentati in diversi paesi e, a fronte di una corretta e trasparente procedura di localizzazione, apparirebbero francamente ingiustificate le resistenze alla realizzazione di uno di essi, che consentirebbe di dare finalmente soluzione al problema della sistemazione dei rifiuti presenti in Italia e spesso precariamente ospitati presso i vecchi impianti ove sono stati prodotti, una realizzazione che renderebbe tra l'altro finalmente possibile anche lo smantellamento degli impianti e la liberazione dei rispettivi siti.

Giova sottolineare che un deposito del tipo descritto si porrebbe per i rifiuti della seconda categoria come soluzione definitiva, ma non escluderebbe la possibilità di un recupero dei rifiuti stessi, per dar loro una sistemazione diversa che dovesse un domani essere ritenuta migliore, eventualmente anche sulla base di considerazioni tecnico-economiche.

## RADIOTOSSICITÀ ED EQUIVALENTE DI DOSE

Quando si affronta dunque la tematica dell'energia nucleare, ed in particolare quella delle scorie, bisogna tenere presenti questi numeri, ma anche considerare in che modo tali scorie, per quanto ridotte in termini di massa (volume) possano costituire un pericolo potenziale attuale o futuro.

L'approccio attualmente seguito per effettuare tale valutazione (in verità fortemente conservativa) è quello di considerare il lasso di tempo necessario affinché, decadendo, tali prodotti raggiungano la radiotossicità (che è una misura della pericolosità potenziale) dell'uranio originariamente presente in miniera.

La radiotossicità è infatti definita come la potenzialità di indurre effetti dannosi (per irraggiamento interno) da parte di un radionuclide. Tale termine può riferirsi sia all'inalazione che all'ingestione.

La radioattività è un fenomeno fisico complesso, caratterizzato da diverse grandezze; quello che interessa però ai fini della salute umana è il cosiddetto *equivalente di dose*, ossia l'energia specifica depositata nel tessuto umano corretta da opportuni fattori di qualità. In particolare bisogna considerare la natura delle radiazioni, la loro energia, il meccanismo con cui un radionuclide può essere assorbito e poi eliminato dal corpo, etc.

Per ciò che concerne la pericolosità potenziale delle scorie nucleari ci si riferisce, di norma, alla radiotossicità per ingestione, poiché si ipotizza (anche qui forse con eccessiva prudenza) che dopo un certo lasso di tempo, per quanto lungo, tali prodotti vengano disciolti dall'acqua e trasportati attraverso le falde acquifere, costituendo queste quindi una via di ritorno per l'uomo.

A tal proposito, è fondamentale tenere presente che le scorie nucleari vengono depositate in appositi siti (i cosiddetti depositi geologici) dotati di particolari caratteristiche, durevoli nel tempo. Inoltre le scorie, dopo essere state, come già detto, vetrificate (o comunque inglobate in una opportuna matrice inerte), vengono inserite in appositi contenitori protettivi di elevata sicurezza (resistenti anche alla corrosione a lunghissimo termine). Il fine di tali barriere naturali ed ingegneristiche predisposte è quello di ridurre a valori di fatto nulli l'equivalente di dose che le popolazioni che abiteranno in prossimità di tali depositi geologici potrebbero ricevere in un futuro remoto.

## RIFIUTI DI TERZA CATEGORIA

### La quantificazione

L'ultima categoria è sicuramente quella che pone i maggiori rischi, dati i periodi di dimezzamento molto lunghi e la complessa catena di decadimenti necessaria per raggiungere la stabilità nucleare. I circa 440 reattori nucleari presenti in 31 nazioni producono annualmente migliaia di tonnellate di scorie.

Un reattore ad acqua pressurizzata da 1.000 MW<sub>e</sub> scarica annualmente da 40 a 70 elementi combustibili contenenti 461.4 kg di uranio ciascuno; tuttavia il 94% del combustibile esausto è costituito da U<sup>238</sup>, l'1% da U<sup>235</sup> (elementi presenti in natura e quindi considerati non pericolosi), il 3-4 % da prodotti di fissione (quali cesio, stronzio, iodio, tecnezio, etc.), pericolosi se liberati in caso di incidente, ma innocui dopo qualche centinaio di anni se custoditi in un deposito geologico.



Figura 3

Gli elementi di maggiore rischio perché molto più pericolosi dell'uranio naturale presente in natura sono costituiti per l'1% da i vari isotopi del plutonio e per lo 0.1 % dagli *attinidi minori* (nettunio, americio e curio; così chiamati perché prodotti in minore quantità nei reattori nucleari tradizionali).

Da una semplice analisi si rileva che un *PWR* (reattore ad acqua pressurizzata) di grossa taglia, annualmente scarica circa 2÷3 kg di plutonio, 0.2÷0.3 kg di attinidi minori. Per avere un termine di paragone con le fonti tradizionali, si può rilevare che il volume di rifiuti prodotto da queste ultime per produrre la stessa quantità di energia è milioni di volte maggiore. Per meglio visualizzare questo dato basti pensare che è stato calcolato che se un uomo per soddisfare i propri bisogni energetici durante tutta la sua vita usasse la sola energia nucleare [2] produrrebbe un volume di scorie (già vetrificate) minore di quello di una lattina da 33 cl. (Figura 3)!

### I depositi

Gli USA hanno previsto per il deposito delle scorie nucleari delle centrali il sito di Yucca Mountain, situato nel deserto del Nevada, a circa 100 miglia da Las Vegas. Esso è stato sottoposto innanzitutto dal *DOE* (*Department Of Energy*) ad una approfondita analisi geologica con una spesa di 6 miliardi di dollari [4]. Inoltre l'*EPA* (*Environmental Protection Agency*), cioè l'ente di controllo ambientale, ha richiesto che fra 10.000 anni l'equivalente di dose ricevuto dagli abitanti in seguito ad un eventuale rilascio dei radionuclidi, sia non superiore a 20 mrem/anno. Per valutare l'esosità della richiesta, si noti che l'equivalente di dose medio naturale (che assorbiamo senza danni da centinaia di migliaia di anni) è pari in Italia a circa 300 mrem/anno. Come se ciò non bastasse, recentemente tale lasso di tempo è stato oggetto di critiche, poiché ritenuto insufficiente e si è richiesto addirittura un aumento di tale periodo fino a 100.000 anni.

## LIVELLO DI MINIERA E PERICOLOSITÀ NEL TEMPO DELLE SCORIE

In questo quadro, uno degli approcci più seguiti oggi è quello di calcolare il *tempo di ritorno della radiotossicità ai livelli di miniera*, di considerare cioè il tempo necessario affinché la radiotossicità per ingestione delle scorie pareggi quella dell'uranio naturalmente presente in miniera. Il concetto è quello di non aumentare il livello della radiotossicità naturale, o, per lo meno, di controllarlo accuratamente finché questo non decada.

Bisogna sempre considerare infatti che qualunque sostanza radioattiva, in quanto tale, è soggetta a decadimento, ossia la sua pericolosità generalmente diminuisce nel tempo, al contrario di quanto accade con la tossicità chimica di sostanze come l'arsenico, che rimane costante. Trattasi di un approccio teorico ed indubbiamente molto cautelativo.

Con le ipotesi attuali, tali tempi di ritorno sono per le scorie non trattate dei reattori esistenti dell'ordine di 250.000 anni (da qui le richieste riguardanti il sito di Yucca Mountain).



Figura 4

Anche in presenza di acqua, i prodotti transuranici (in particolare il plutonio) hanno dimostrato una scarsa motilità dall'esame dei risultati "sperimentali" delle analisi condotte [5] sul terreno circostante un complesso di reattori nucleari formati per un insieme di cause naturali ad Oklo, nel Gabon (Africa), circa 2 miliardi di anni fa (Figura 4).

La Figura mostra i resti del reattore fossile numero 15 di Oklo. Sono visibili i residui di colore giallo di ossido di uranio. I prodotti di fissione ed il plutonio non sono migrati e sono praticamente rimasti sul posto [5].

Per motivi che saranno spiegati meglio in un altro articolo un giacimento di uranio ha dato vita nel corso del tempo a ben 17 reattori nucleari naturali che hanno fissionato circa 5 tonnellate di  $U^{235}$  sviluppando approssimativamente  $10^8$  MWh con un periodo complessivo di funzionamento dell'ordine di  $10^6$  anni [5] [6].

La composizione delle "scorie" trovate nel sito è molto simile a quella dei moderni reattori nucleari. Come già detto, si è rilevato che praticamente tutti i prodotti di fissione sono rimasti nelle immediate vicinanze dei reattori naturali per quasi due miliardi di anni. Il plutonio presente (2.5 tonnellate) non si è spostato che di pochissimo (circa 3 metri secondo i tecnici) [7]. Questo esempio naturale prova, come meglio non sarebbe possibile fare, la ridotta motilità dei prodotti delle reazioni nucleari e quindi l'affidabilità della soluzione del deposito in siti geologicamente stabili.

## BARRIERE NATURALI ED INGEGNERISTICHE PER I RIFIUTI DI TERZA CATEGORIA

Alla luce di quanto detto, la più importante garanzia nello smaltimento dei rifiuti nucleari è quindi rappresentata proprio dalla natura dei siti prescelti: trattasi di miniere di salgemma vecchie milioni di anni (non vi è mai stata acqua che avrebbe sciolto il sale), banchi basaltici o depositi in zone desertiche, situati al di sopra delle falde acquifere. Le scorie vengono in tali casi depositate a 500÷1000 metri di profondità e pertanto nessun danno da irraggiamento diretto è possibile.

Come già anticipato, nei depositi nucleari oltre alle barriere "naturali", vengono interposte una serie di significative barriere ingegneristiche (che costituiscono quindi una ulteriore garanzia di sicurezza).

La prima barriera ingegneristica è costituita dalla matrice in cui vengono inglobate le scorie. Trattasi di cemento, vetro o SynRock (Synthetic Rock), frutto di decennali ricerche. Sulle scorie così condizionate, vengono effettuate verifiche riguardanti il calore di decadimento, l'auto-irraggiamento e l'eventuale azione chimica dell'acqua (possibile nel lungo periodo). I modelli via via sviluppati sono divenuti sempre più accurati e precisi: oggi si pensa ragionevolmente che la sola vetrificazione possa garantire la tenuta per almeno un milione di anni [8].

Il danno potenziale originato dall'auto-irraggiamento è dovuto principalmente ai nuclei di rinculo nel decadimento alfa, che depositano grandi quantità di energia (dell'ordine di 0.1 MeV) in piccolissime distanze (dell'ordine di 30 nm), generando una cascata di difetti che nel lungo termine potrebbero compromettere la struttura della matrice. Tali effetti sono stati studiati in vetri opportunamente "dopati" con  $Cm^{244}$ , ottenendo dosi integrate nel giro di pochi anni che riproducono l'effetto che i vetri dovrebbero ricevere nel corso delle centinaia di migliaia di anni (si parla di  $4\div5\cdot 10^{18}$  particelle  $\alpha$  per grammo, con una dose di  $4\div5\cdot 10^9$  gray). I francesi hanno messo a punto l'R7T7, di natura simile a quella dei vetri vulcanici, a base di ossidi di silicio, boro, alluminio, sodio e zirconio.

I risultati di tali prove sono rassicuranti: la variazione percentuale di volume è trascurabile (0.6%), e la resistenza a corrosione da parte dell'acqua non viene compromessa significativamente. Inoltre non solo il vetro non risulta infragilito, ma le sue proprietà meccaniche risultano addirittura migliorate (si ha una fragilità ridotta ed un incremento della resistenza alla frattura). Tali vetri presentano la favorevole caratteristica di ripristinare la loro struttura dopo il passaggio del nucleo di rinculo.

Nonostante si sia dimostrato che la matrice vetrosa costituisca già di per se una efficiente e durevole barriera al rilascio dei radionuclidi, bisogna sottolineare che questa rappresenta solo una parte del sistema di isolamento a barriere multiple adottato.

### I contenitori usati nella soluzione svedese

Ad esempio, nella soluzione adottata dagli svedesi (SKB), il combustibile esausto viene racchiuso in opportuni contenitori di acciaio inossidabile (spessore di 50 mm), a loro volta contenuti in cilindri di rame con spessore di 50 mm.

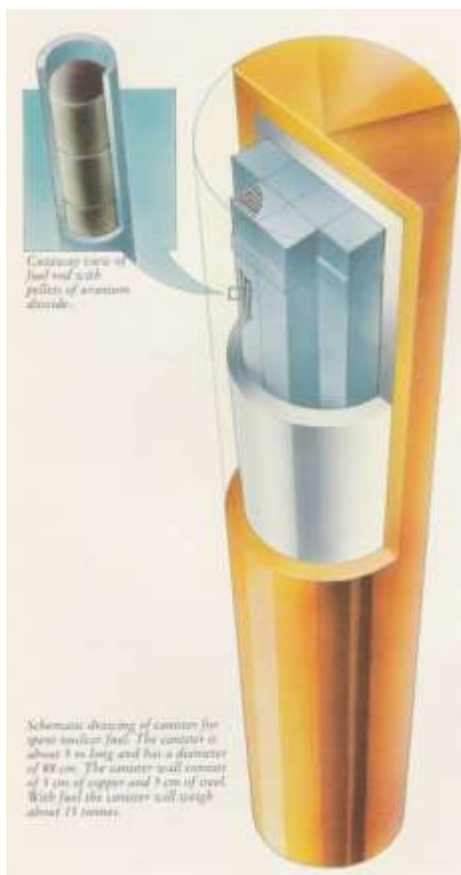


Figura 5

In Figura 5 è rappresentato un contenitore cilindrico per rifiuti nucleari lungo circa 5 metri e del diametro di 880 mm. Il contenitore interno di acciaio inossidabile ha uno spessore di 50 mm, ed è a sua volta contenuto in un cilindro di rame dello spessore 50 mm. Il peso totale, compreso il combustibile è di circa 15 tonnellate [9]. Tali contenitori vengono fabbricati con le più moderne e sofisticate tecnologie ed il 'tappo' (Figura 6) viene saldato elettronicamente [9]. Per quanto riguarda il contenitore interno di acciaio, esso, oltre a costituire una barriera aggiuntiva, serve a sopportare le sollecitazioni meccaniche.



Figura 6

### Utilizzo del rame

L'adozione del rame quale involucro esterno rappresenta una garanzia notevole rispetto a possibili, anche se altamente improbabili, infiltrazioni di acqua. Il rame nativo è risultato essere stabile fino ad oltre 500 milioni di anni, e gli archeologi hanno trovato oggetti di rame risalenti ad oltre 8.000 anni fa, ancora in buone condizioni. La Figura 7 mostra un esemplare di rame nativo rinvenuto in Arizona che si stima abbia un'età di circa un miliardo di anni.



Figura 7



Figura 8

Questo metallo è duttile, anche a basse temperature e quindi conserva le sue caratteristiche meccaniche anche nel caso di una eventuale glaciazione. Per tali applicazioni si utilizza puro, privo di ossigeno. La stessa acqua presente in profondità è priva di ossigeno, quindi una sua eventuale presenza, causerebbe una corrosione molto ridotta.

Le ipotesi di resistenza del rame sono suffragate dal ritrovamento di un cannone della nave da guerra svedese Kronan, affondata nel XVII secolo. Tale nave, affondata nel giugno 1676 (oltre trecento anni fa), è rimasta fino ad epoche recenti sui fondali del Mare Baltico.

Il cannone della Figura 8 è stato analizzato, ed è stato trovato in perfetto stato di conservazione: misure accurate hanno consentito di stimare che la corrosione del rame nell'argilla è dell'ordine di pochi millimetri in 100.000 anni [9].

### Le barriere multiple nella soluzione svedese

Sulla base delle suddette considerazioni, si può dedurre che le barriere utilizzate nel contenitore rimarranno integre per un periodo praticamente infinito, comunque superiore ad un milione di anni.

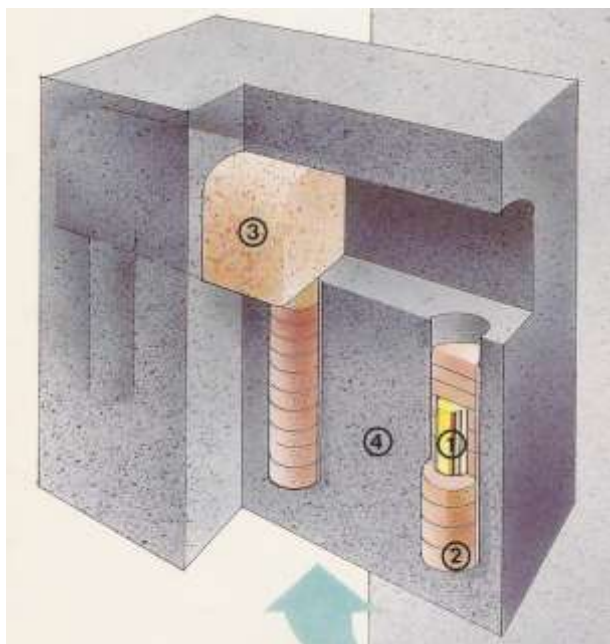


Figura 9

Infine, nel caso svedese, i contenitori vengono sepolti a 500÷1.000 metri di profondità in una struttura di bentonite situata nel banco basaltico. Tale materiale, assieme alla roccia, agirebbe da 'filtro' in caso di una quanto mai improbabile fuoriuscita dei radionuclidi. In questo caso il sistema di protezione risulterebbe essere sostanzialmente costituito da 4 barriere (Figura 9):

- 1) contenitore di acciaio e rame (la stessa natura ceramica del combustibile costituisce una prima efficace barriera)
- 2) blocchi di bentonite: l'argilla protegge ulteriormente i contenitori dall'acqua (con la quale forma un gel impermeabile) e ne impedisce il movimento
- 3) misto di bentonite e sabbia che riempie i tunnel
- 4) roccia che offre un ambiente protettivo sia dal punto di vista meccanico che chimico e che agisce inoltre quale filtro per l'acqua

In un deposito chiuso di tal tipo non è richiesta ulteriore sorveglianza e/o manutenzione per garantirne la sicurezza. Comunque la natura e la quantità del materiale stoccato è opportunamente documentata.

### Gli analoghi naturali

Per rinforzare le affermazioni precedenti, si può constatare che la stessa natura si è dimostrata una eccellente fonte di conoscenza al fine della progettazione di un deposito permanente. Per prevedere quello che avverrà fra centinaia di migliaia di anni possiamo fare riferimento a quello che è successo nel passato. Possiamo esaminare il comportamento del sito, risalendo a milioni di anni fa, ottenendo così informazioni di valore insostituibile ai fini della determinazione delle sue caratteristiche. Gli studiosi parlano, in questo caso, di "analoghi naturali". Ad esempio possiamo studiare il comportamento dei giacimenti naturali di uranio, risalenti a milioni di anni quali, ad esempio, il già citato caso di Oklo.

La natura ha altresì dimostrato come sia possibile isolare alti livelli di radioattività in un sito senza alcun impatto ambientale: in Canada, nel deposito di Cigar Lake, si trova una concentrazione di uranio naturale che arriva al 55% del minerale. Tale miniera si è formata 1,3 miliardi di anni fa ed è situata a 430 metri di profondità; contiene più di un milione di metri cubi di uranio.



Figura 10

L'argilla ha isolato il deposito. Non ci sono tracce in superficie (quali radiazioni, sostanze radioattive, calore) che indichino la presenza della miniera.

L'argilla ha dimostrato di poter resistere a temperature dell'ordine del centinaio di gradi centigradi per milioni di anni (come dimostrato nel sito di Hamra, sull'isola di Gotland, nel corso di trivellazioni petrolifere [9]). Ha inoltre l'eccellente capacità di conservare nel tempo gli oggetti che ricopre: la Figura 10 mostra un pezzo di legno proveniente da una foresta vecchia 1.5 milioni di anni. Il ritrovamento è avvenuto a Dunarobba (Italia, Umbria) dove sono stati ritrovati circa una ventina di alberi sepolti nell'argilla: il deterioramento del legno è stato visibilmente prevenuto dalle sue eccellenti proprietà protettive [9].

### La soluzione statunitense

Accenniamo infine che la tecnologia presentata rappresenta soltanto una delle tante a disposizione. Negli USA ad esempio i contenitori, oltre ad inglobare le scorie già sotto forma di vetri al borosilicato (ampiamente collaudati), sono costituiti da un rivestimento esterno di Hastelloy C22, lega molto resistente alla corrosione (si stima un valore del danneggiamento per questa via di circa 0.8 mm in 10.000 anni!), e da uno interno di titanio (Grade 7), anch'esso molto resistente alla corrosione (stimata in circa 2 mm dei 15 a disposizione in 10.000 anni). Secondo le proiezioni al massimo l'1% dei contenitori potrebbe perdere la propria integrità entro i primi 80.000 anni [7].

### **Le soluzioni francese, britannica e giapponese: il riprocessamento**

Altri paesi, come Francia, Giappone e Regno Unito adoperano la tecnologia del “*riprocessamento del combustibile*”: essa consiste nella separazione per via chimica (processo *Purex*) dell'uranio e del plutonio (che costituiscono circa il 96% del combustibile esausto) dai prodotti di fissione, che vengono quindi isolati, vetrificati, e stoccati in siti geologici con le tecniche già viste. Tale opzione però non costituisce un'alternativa al deposito geologico, bensì una tecnologia legata al ciclo del combustibile che lo completa; si ha però l'effetto del bruciamento del plutonio, molto favorevole sia da un punto di vista ambientale che energetico. Con tale processo, per ogni tonnellata di combustibile esaurito, si ottiene, attraverso il bruciamento del fissile recuperato, un'energia pari a quella sviluppata da 100.000 barili di petrolio. Fino ad oggi nel mondo sono state riprocessate circa 75.000 tonnellate di combustibile nucleare [10].

### **CONCLUSIONI**

Si può concludere che la tecnologia dei depositi permanenti delle scorie nucleari è stata analizzata e messa a punto, nei suoi molteplici aspetti, attraverso ricerche condotte in più parti del mondo che hanno visto la collaborazione attiva di università, istituti tecnologici, di ricerca ed esperti del settore [11].

Sono state effettuate lunghe e complete esperienze ed è stata valutata la solubilità e la migrazione dei radionuclidi: si è visto che, in particolare, il plutonio presente nel combustibile presenta una solubilità molto bassa (i livelli sono talmente bassi che sono difficili da misurare!).

Appare chiaro che le attuali tecnologie mettono a disposizione delle valide soluzioni alla questione dello smaltimento sicuro delle scorie nucleari di alto livello. La tematica è sicuramente delicata e merita accurate riflessioni ed approfondimenti (al di là di un certo “accanimento ecologico” imperante sull'argomento). In particolare, oltre alla necessità della nostra protezione immediata, si pone il problema di non lasciare delle pesanti eredità ‘radioattive’ alle generazioni future, fatto di per se moralmente inaccettabile. Le soluzioni attuali però consentono una custodia sicura per centinaia di migliaia di anni (più realisticamente per milioni di anni), senza alcuna necessità di sorveglianza/controllo. La documentazione esistente potrebbe consentire alle generazioni future di rivedere le nostre decisioni e scegliere una diversa destinazione per le scorie, soprattutto qualora queste fossero ritenute in quel momento ancora utilizzabili e vi fosse la necessità di energia.

Riassumendo possiamo dire che:

- *la soluzione attuale riguardante il deposito in siti geologici delle scorie nucleari appare del tutto affidabile, adeguata e sicura;*
- *attualmente, per minimizzare ulteriormente la consistenza delle scorie, sono in corso di studio in tutto il mondo ricerche di tecnologie adatte a ‘bruciare’ il waste (ossia a riportare la sua radiotossicità ai livelli naturali dell'uranio da cui sono state originate) in poche centinaia di anni, e tali tecnologie saranno commercialmente mature entro pochi anni;*
- *al contrario dei rifiuti pericolosi convenzionali, quali il mercurio o l'arsenico, che sono ‘stabili’, quelli radioattivi sono soggetti a decadimento: questo implica che la loro pericolosità decresca continuamente nel tempo.*

Alla luce di queste considerazioni, si può concludere che le scorie radioattive non costituiscono un reale problema ai fini della produzione di energia per via nucleare.

Si può inoltre osservare che sono oggi in fase avanzata di studio impianti nucleari di IV generazione sicuri e con caratteristiche particolarmente favorevoli riguardo ai costi di realizzazione ed alla produzione di scorie.

Ad esempio sono in corso una serie di studi anche nel quadro di attività di ricerca comunitarie [12] [13] sui reattori a gas ad alta temperatura (i reattori del futuro), in grado di utilizzare le scorie per produrre energia, riducendone drasticamente nel tempo la pericolosità.

Possiamo pertanto ritenere che l'utilizzo pacifico dell'energia nucleare rappresenta una valida quanto necessaria alternativa alle fonti tradizionali (in particolare quelle fossili).

L'aumento dei consumi energetici su scala mondiale ed il conseguente rapido esaurirsi delle scorte con le conseguenti tematiche riguardanti gli equilibri geopolitici, nonché i reali problemi ambientali, ci pongono oggi di fronte a delle scelte delicate ed urgenti che richiedono, particolarmente per l'Italia, un riesame di affrettate ed immotivate decisioni che si sono già dimostrate gravide di negative conseguenze.

Molto del nostro futuro e di quello dei nostri discendenti dipenderà dall'equilibrio, dalla saggezza e dalla lungimiranza delle nostre decisioni attuali.

### **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Uranium Information Centre Ltd. – <http://www.uic.com>
- [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] “Considerazioni sui fattori di rischio connessi alla scelta della fonte nucleare di energia” – R. Mezzanotte – Conferenza Petrolio&Atomo – Roma, Luglio 2005

- [4] “Yucca Mountain – Looking ten thousand years into the future” – Los Alamos Science, number 26, 2000 – Roger C. Eckhardt
- [5] NASA – <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap021016.html>
- [6] “Introductory Nuclear Physics” – Kenneth S. Krane – Wiley & Sons
- [7] OCRWM (Office of Civilian Radioactive Waste Management) – <http://www.ocrwm.doe.gov>
- [8] “Glass packages guaranteed for millions of years” – CEA Clefs n. 46
- [9] “Activities 1994 – The Swedish system for radioactive waste” – SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) – <http://www.skb.se>
- [10] “Nuclear Energy Institute” – NEI – <http://www.nei.org>
- [11] “La tematica delle scorie nucleari” – V. Romanello, G. Lomonaco, N. Cerullo – 21<sup>mo</sup> Secolo, Luglio 2005
- [12] “The Capabilities of HTRs to Burn Actinides and to Optimize Plutonium Exploitation” – N. Cerullo, D. Bufalino, G. Forasassi, G. Lomonaco, P. Rocchi, V. Romanello – Proceedings of ICONE12, 12<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, 25-29 April 2004, Arlington, Virginia, USA
- [13] “An additional performance of HTRs: the waste radiotoxicity minimization” – N. Cerullo, D. Bufalino, G. Forasassi, G. Lomonaco, P. Rocchi, V. Romanello – Proceedings of ICRS10, 9-14 May 2004, Madeira, Portugal, to be also published on Radiation Protection Dosimetry