

Una strategia per la gestione delle scorie nucleari

di MASSIMO SCALIA

Facoltà di Scienze, Università La Sapienza di Roma

e GIUSEPPE ONUFRIO

Istituto Sviluppo Sostenibile Italia

Premessa

La questione della sistemazione delle scorie nucleari italiane ha avuto, prima del famigerato “decreto Scanzano” una fase costruttiva alla fine degli anni '90.

Nella strategia identificata a suo tempo dalla “Commissione bicamerale sul ciclo dei rifiuti” con un documento approvato all’unanimità nell’aprile del 1999, così come nel documento di indirizzo del Governo nello stesso anno (1999), si proponeva la scelta di uno, preferibilmente, o più depositi di superficie per la II^a categoria – i cui tempi di decadimento radioattivo a livelli simili alla crosta terrestre sono stimati in circa 3 secoli. La strategia identificata dai due documenti citati - con qualche differenza non marginale sugli assetti istituzionali, più semplificati nell’ipotesi dell’allora Governo – oltre a promuovere uno smantellamento accelerato (20 anni) dei vecchi impianti nucleari, implicava di ospitare negli stessi siti - “temporaneamente” cioè per alcune decadi – anche i rifiuti di III^a categoria, in attesa di definire anche a scala sovranazionale una sistemazione di lungo termine, viste le piccole quantità, in volume, coinvolte.

La strategia non originale di adottare “due velocità” – per le scorie di II^a e per quelle di III^a – era motivata tra l’altro anche dal fatto che la scelta di un sito geologico profondo, non è considerata ancora da molti una “soluzione” affidabile per rifiuti i cui tempi di decadimento sono dell’ordine dei milioni quando non dei miliardi di anni e su cui la comunità internazionale negli ultimi anni sta facendo sforzi significativi che potrebbero modificare gli scenari nel giro di qualche lustro. Poiché la parte più pericolosa delle scorie di III^a categoria – il combustibile irraggiato - è calda e va lasciata raffreddare per alcune decadi, le due strategie hanno un margine di gestibilità abbastanza lungo. Questa strategia va ripresa, come cerchiamo qui di argomentare.

A chiusura di questa premessa, va aggiunto che, a nostro avviso, l’accelerazione impressa dall’attuale Governo con il “decreto Scanzano”, le cui motivazioni fondate sull’emergenza terrorismo non meritano in questa sede nemmeno una disamina, ha avuto come unico effetto netto quello di rendere assai difficile la scelta di un solo deposito nazionale anche per la II^a categoria.

1. Rifiuti nucleari: aspetti fisici

Vale la pena ricordare qui alcuni aspetti fisici fondamentali per dare un quadro di riferimento al tema. L’inventario radioattivo delle scorie che appartengono alla terza categoria, cioè quelle con tempi di dimezzamento estremamente lunghi, ci pone di fronte a uno scenario che sfida ogni fantasia.

Com’è noto, gli elementi transuranici, - Pu , Am, Np, ecc. - non presenti in natura, sono prodotti dalle reazioni di fissione che avvengono in un reattore nucleare. Hanno tempi di dimezzamento o “emivite”¹ tali che nel caso del Pu₂₃₉, transuranico maggioritario generato in un reattore di potenza, si ha la riduzione a un millesimo dell’attività iniziale dopo 240.000 anni (cfr Tab. 1).

Ma questo è niente di fronte all’Uranio, che nei reattori nucleari si trova in una composizione un po’ diversa da quella naturale a causa dell’“arricchimento” dell’isotopo fissile U₂₃₅, dallo 0,7% al 2,5-4%, ma il cui componente di gran lunga predominante, l’U₂₃₈, ha un tempo di dimezzamento che coincide con l’età della Terra!

E’ utile riportare qui di seguito i dati della miscela isotopica come si rinviene in natura: l’U₂₃₈ è oltre il 99% dell’Uranio naturale, ha un’attività di 12.400 Bq/g (Bq = Becquerel, unità di misura della radioattività pari a una disintegrazione al secondo²; g = grammo) e una emivita di circa 4,5 miliardi di anni; l’U₂₃₅ è lo 0,7%, ha un’attività di 80.000 Bq/g e una emivita di

circa 700 milioni di anni; l' U_{234} è lo 0,0055%, ha un'attività 231.000.000 Bq/g e una emivita di poco meno di 250.000 anni.

La conoscenza dei prodotti figli è fondamentale per poter calcolare l'attività complessiva dell'Uranio: ad esempio, l'attività dell'Uranio naturale è determinata pressoché in ugual misura dalla somma delle attività dell' U_{238} e dell' U_{234} e dalla somma delle attività dei "figli", per un totale di 50.800 Bq/g.

L' U_{238} è infatti il "progenitore" della famiglia radioattiva dell'"Uranio": il Torio, Th_{234} ; l' U_{234} ; il Th_{230} e il Radon, Rn_{222} , per citare gli elementi più noti di una "catena" di decadimenti in metalli pesanti (tranne il Radon che è un gas), che si origina attraverso successive disintegrazioni α , β e γ che ha come ultimo elemento, stabile, il Piombo (Pb_{206}). Analogamente, l' U_{235} è il "progenitore" della famiglia radioattiva dell'Attinio (Ac_{227}) che è, appunto, uno degli elementi della catena di decadimenti che parte dall' U_{235} . Anche la famiglia dell'Attinio ha come ultimo elemento della catena di decadimenti il Piombo (Pb_{207}).

A seguito della reazione di fissione si hanno non soltanto i transuranici, ma vengono prodotti anche dei "frammenti di fissione": essi sono gli isotopi degli elementi originati dall'atomo di U_{235} quando si spacca nei diversi modi possibili. I "canali" di fissione sono una cinquantina, ai quali corrisponde un lungo inventario di frammenti (un nucleo si "fissiona" in due frammenti, non troppo diversi tra di loro rispetto alla massa atomica, più un numero di neutroni variabile da 1 a 4): in Tab. 1 sono riportati solo quelli di vita più lunga.

Anche in questo caso ci troviamo di fronte a tempi di dimezzamento che vanno molto al di là. In un tempo pari all'età delle Alpi l'attività dei circa 45 chili di radionuclidi a emivita più lunga (LLFP) di Tab. 1 sarà ancora pari a quella di circa 19 chili. Ma per questo tipo di materiali radioattivi, proprio la stima sulle attività potrà far ipotizzare una loro possibile gestione.

Questi tempi di dimezzamento, su cui abbiamo qui brevemente riflettuto, ci appaiono un primo insormontabile ostacolo all'ipotesi generalizzata di confinamento di un tale tipo di materiali in un sito profondo come "soluzione definitiva". Non c'è alcun modello previsionale - in realtà solo stime approssimative - che possa far tornare i conti quando non si accetti il "cut off" (taglio) dei diecimila anni per il calcolo della dose. Questo taglio appare assai discutibile se confrontato con i tempi in gioco; esso è evidentemente dettato non da considerazioni scientifiche, ma da necessità operative. Ma anche quando si prenda in esame un orizzonte di 10 mila anni, la valutazione degli scenari di rilascio è un esercizio assai difficile nel quale entrano anche scelte per così dire "politiche", come vedremo avanti nel caso del sito USA per gli elementi transuranici del sito del New Mexico.

Tab.1 Produzione annuale di plutonio, attinidi minori e prodotti di fissione da un reattore PWR di 3000 Mwterm con combustibile bruciato a 33.000 MWgiorno/ton (Dopo un decadimento di 10 anni)		
<i>Plutonio e Attinidi Minori (MA)</i>		
Isotopo	Emivita anni	Massa kg/anno
Np ₂₃₇	2.100.000	14,5
Pu ₂₃₈	80	4,5
Pu ₂₃₉	24.000	166,0
Pu ₂₄₀	6.600	76,7
Pu ₂₄₁	14	25,4
Pu ₂₄₂	380.000	15,5
Am ₂₄₁	430	16,6
Am ₂₄₃	7.400	3,0
Cm ₂₄₄	18	0,6
<i>Prod. di fissione a vita lunga (LLPF)</i>		
Isotopo	Emivita anni	Massa kg/anno
Se ₇₉	65.000	0,2
Sr ₉₀	29	13,4
Zr ₉₃	1.500.000	23,2
Tc ₉₉	210.000	24,7
Pd ₁₀₇	6.500.000	7,3
Sn ₁₂₆	100.000	1,0
I ₁₂₉	17.000.000	5,8
Cs ₁₃₅	3.000.000	9,4
Cs ₁₃₇	30	31,8
Sm ₁₅₃	90	0,4

Fonte: vedi nota 7

2. Le quantità. Una prima ipotesi

C'è un'altra questione da affrontare per i materiali radioattivi a vita lunghissima: le quantità associate a tutto il ciclo del combustibile nucleare, la loro tipologia e i loro attuali siti. Questo comporta, ancora una volta, di stendere lo sguardo ben oltre la vicenda di Scanzano.

L'inventario del combustibile irraggiato è in continua crescita. Nel suo rapporto annuale 2002 la IAEA stimava in 255.000 tonnellate di metalli pesanti (tHM) il quantitativo cumulativo di combustibile esaurito, di cui circa 84.000 tonnellate erano state avviate al riprocessamento e

171.000 erano stoccate: l'andamento negli anni precedenti e le proiezioni al 2015 sono riportate in fig. 1, dove si fa riferimento a valori globali che, necessariamente, mascherano le sostanziali variazioni tra le diverse aree geopolitiche

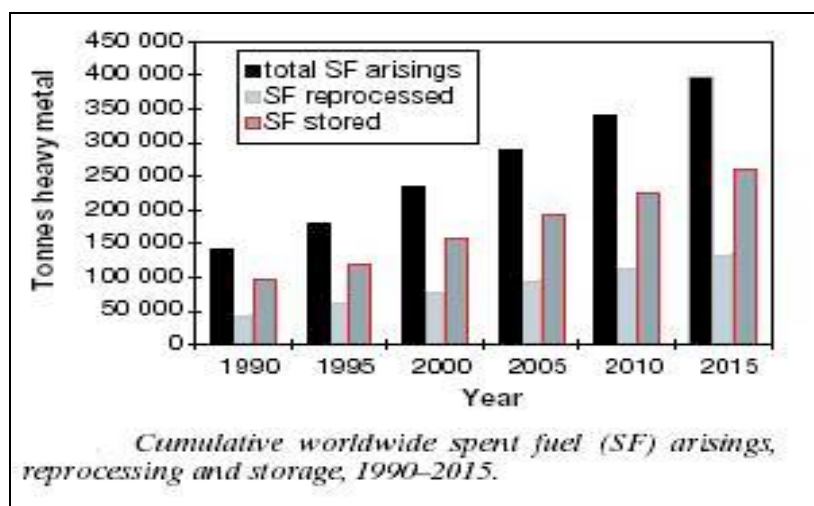


FIGURA 1: COMBUSTIBILE ESAUSTO: QUANTITÀ PRODOTTE, RIPROCESSATE E STOCCATE
 FONTE: IAEA, ANNUAL REPORT 2002

C'è poi un altro aspetto di dimensioni quantitativamente superiori: la gestione dell'Uranio impoverito o depleto. L'Uranio depleto, com'è noto, è un residuo del ciclo del combustibile nucleare per la produzione di energia elettrica nelle centrali nucleari. Col termine depleto o impoverito si indica una presenza di U_{235} nell'Uranio inferiore a quella della miscela naturale. E' il processo industriale dell' "arricchimento" in U_{235} , fino alla percentuale *reactor grade* (3-4%), che produce come scoria l'Uranio depleto, principalmente nella forma di esafluoruro di Uranio, UF_6 . Anche la produzione di armi atomiche, nelle quali la percentuale di U_{235} si spinge anche oltre il 90%, necessita di una fase di arricchimento che contribuisce alla produzione di Uranio depleto e di UF_6 . Per l'Uranio depleto, nel caso che l'impoverimento in U_{235} sia lo 0,2% e che l' U_{234} sia lo 0,001%, la somma dell'attività degli isotopi dell'Uranio è di poco inferiore ai 15.000 Bq/g e la parte maggiore dell'attività viene dai "figli" per oltre 24.000 Bq/g: l'attività complessiva dell'Uranio depleto è, in questo caso, di 39.400 Bq/g, cioè oltre il 20% in meno dell'attività dell'Uranio naturale³.

Per quanto riguarda gli Usa, che detengono più di un quarto della potenza nucleo-elettrica installata, la valutazione del DOE⁴ (Department of Energy) all'agosto 1999 era che "circa 700.000 tonnellate metriche di esafluoruro di Uranio depleto sono l'eredità della produzione di combustibili nucleari sia civili che militari"

L' UF_6 è, dal punto di vista chimico, fortemente reattivo; a temperatura ambiente è un solido a struttura cristallina, ma a 56,4°C esso sublima. Per i depositi di lungo termine o per lo smaltimento è pertanto opportuno convertirlo in forme chimicamente meno reattive: UF_4 , UO_2 , U_3O_8 , l'ultima delle quali è la più stabile. Da qui la decisione del DOE, nel 1999, di convertirlo in una forma più stabile nei tempi più rapidi praticamente possibili.

Se questa era la situazione degli Usa non è arbitrario valutare in circa sei milioni di tonnellate di esafluoruro di Uranio impoverito il quantitativo di tale sostanza accumulato in tutto il mondo, cui corrispondono circa quattro milioni di tonnellate di Uranio depleto. La stima tiene conto anche del fatto che, sul versante militare, la produzione di un chilo di Uranio *weapon grade*, dell' U_{235} che serve cioè per le bombe atomiche, produce una "coda" di oltre 240 chili di Uranio depleto.

La maggior parte dell'Uranio depleto è accumulata sotto forma di UF_6 in cilindri d'acciaio che vengono abitualmente installati all'aperto nei cosiddetti "cortili dei cilindri" adiacenti agli impianti di arricchimento. Ad esempio, l' UF_6 prodotto in Usa ha richiesto oltre 54.000 cilindri, tenendo conto che ogni cilindro contiene fino a circa 13 tonnellate di UF_6 ⁵.

Data la sua elevata attività, quando deve essere immagazzinato in vasti quantitativi, l'Uranio depleto può superare quei limiti di radioattività, espressi in Curie, che comportano per gli impianti industriali un tipo di autorizzazione, per la quale è prevista una più ampia partecipazione pubblica⁶.

Anche senza tener conto, se non parzialmente e indirettamente, del nucleare degli armamenti atomici i dati esposti ci pongono di fronte a colossali quantitativi di Uranio "concentrato": quelli relativi al combustibile esaurito sono meno di un decimo di quelli che provengono dai processi di arricchimento.

C'è poi da considerare, con riferimento alle stime DOE e RAND, un quantitativo di circa un milione e mezzo di tonnellate all'anno di scorie radioattive di basso livello, oltre centomila di livello intermedio, anch'essi in crescita. I materiali di scavo e di "macinazione" corrispondono a circa 100 milioni di tonnellate all'anno⁷, che tranne la parte avviata alla fabbricazione del combustibile nucleare, rappresentano delle code che resterebbero eminentemente *in situ*.

Il panorama complessivo ci parla quindi di migliaia di siti in molte aree del pianeta, nei quali sono insediati rilevanti quantitativi di Uranio "concentrato" nelle diverse tipologie descritte; e rilevanti quantitativi di scorie di livello basso e intermedio. Se facciamo entrare anche il fattore tempo lo scenario conseguente è una disseminazione radioattiva distribuita a pelle di leopardo sulla crosta terrestre per milioni di anni.

Una tale situazione, lungi dal poter far ritenere che esista una sola soluzione al problema, ci rende del tutto consapevoli che l'aver messo il piede nel nucleare, l'aver rubato il fuoco agli dei, comporta orizzonti indefiniti di convivenza con la radioattività prodotta dall'attività dell'uomo. E' possibile fare delle ipotesi almeno sensate? Se guardiamo ora alle curve che ci forniscono la dose specifica impartita in funzione del tempo di Fig. 2 possiamo tentare una prima risposta al "puzzle atomico".

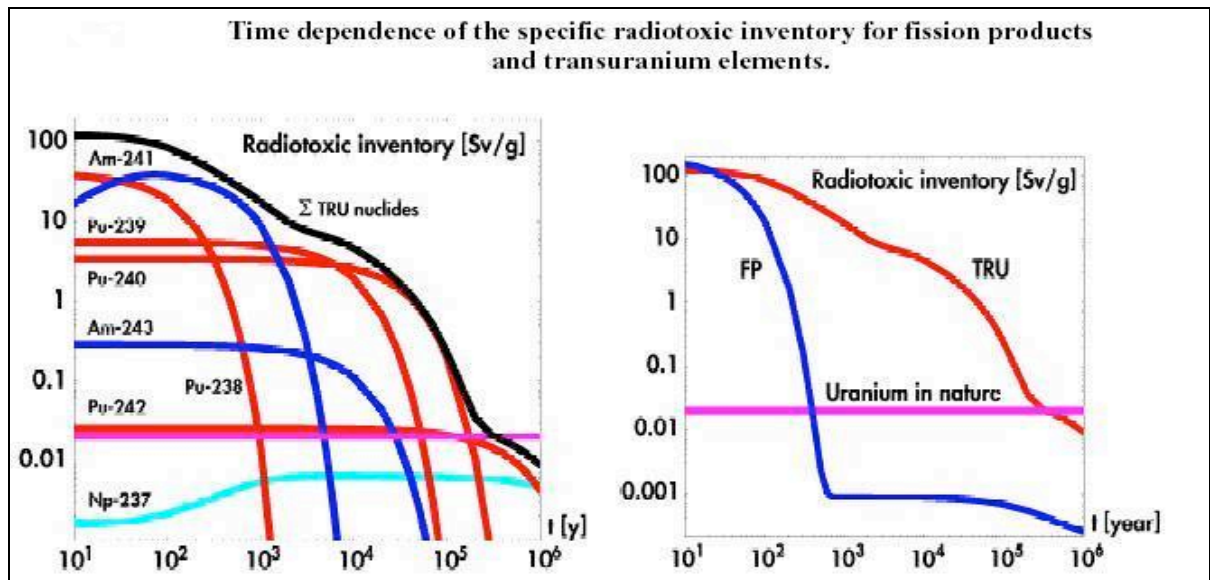


FIGURA 2: DIPENDENZA DAL TEMPO DELL'INVENTARIO RADIOTOSSICO SPECIFICO PER I PRODOTTI DI FISSIONE (FP) E GLI ELEMENTI TRANSURANICI (TRU). FONTE: VEDI NOTA 7

Nella figura non compaiono i prodotti di attivazione, e cioè quegli elementi radioattivi prodotti per cattura neutronica a partire da elementi stabili, alcuni dei quali presentano emivite dell'ordine di alcune migliaia di anni. Ciò che interessa qui rilevare sono le due componenti, una costituita dai prodotti di fissione che scendono al di sotto della radiotossicità specifica dell'Uranio naturale in poche centinaia di anni, e dunque in tempi ancora gestibili con tecnologie e materiali esistenti, mentre per i prodotti transuranici ci vogliono tempi dell'ordine del milione di anni.

Il confinamento di questi ultimi in un sito geologico profondo pone un tema di fondo non nuovo alla Fisica moderna. La crisi della Fisica classica era derivata dall'aver supposto valide anche nel mondo microscopico, nell'ambito subatomico, e nello studio degli ammassi stellari quelle leggi che erano state verificate su una scala di distanze che andava da 10⁻⁸ metri ad almeno 10¹⁴ metri. Era un presupposto che si rivelò arbitrario, come la Meccanica Quantistica da un lato e la Teoria della Relatività Generale dall'altro si incaricarono di mostrare. E restò l'esigenza di garanzie da porre per evitare di ricommettere gli stessi errori. Ebbe allora, e dopo, molta popolarità nella comunità dei Fisici la proposta di concedere cittadinanza piena solo a quelle formulazioni di teorie che si fondassero su una definizione operativa dei concetti sui quali si basavano; che cioè potessero essere definite in termini di sperimentazioni concettuali coerenti con i dettami di una logica operativa. Si può allora ben comprendere l'inaccettabilità, anche da questo punto di vista, dell'affrontare una questione, i radionuclidi a emivite lunghissime, alla quale il tempo - i milioni di anni - toglie ogni possibile approccio di logica operativa.

3. La spallazione e l'ESS

L'ipotesi, avanzata da circa 15 anni e nella quale un gran lavoro è stato svolto da Carlo Rubbia e da gruppi di ricercatori che hanno collaborato con lui, è quella di bombardare un bersaglio con ioni pesanti o, come si sta ormai da tempo affermando in tutto il mondo, con protoni portati ad un'energia superiore a 1 GeV (1 GeV = 1 Giga elettronVolt = 10⁹ elettronVolt) da una macchina acceleratrice (Accelerator Driven System). Nel bersaglio ha luogo la "spallazione", cioè un urto anelastico tra particelle di alta energia e nucleo atomico, quello degli atomi del bersaglio, con la produzione di varie particelle secondarie. Tra le particelle secondarie ci sono neutroni, la cui intensità di flusso (10¹⁵⁻¹⁶ neutroni al secondo) è correlata all'energia del fascio incidente. I neutroni sono i "proiettili" in grado, attraverso

varie reazioni nucleari, di “incenerire” le scorie radioattive operando la loro “trasmutazione” in altri radionuclidi; e la spallazione è vista come una intensa sorgente di neutroni.

Per il “bersaglio” si usano tantalio, tungsteno e piombo, ma la spallazione è un processo che si realizza anche in natura, ad esempio nei raggi cosmici.

Su un’idea di tal genere si sono mossi, fin dai primi anni 90, vari gruppi di ricercatori in Europa, e, dal 1993, è partito il progetto European Spallation Source (ESS) e si è insediato un Consiglio dell’ESS, nel quale sono rappresentati istituti di ricerca soprattutto europei.

Anche se elevati flussi di neutroni possono essere ottenuti dalla tecnologia dei reattori nucleari, come quelli a neutroni veloci (*fast breeders reactors*), il fallimento del progetto Superphoenix e motivi di maggior efficienza e maggior sicurezza hanno posto alla base dell’ESS la tecnologia dell’acceleratore lineare (LINAC) con un bersaglio per la spallazione.

L’ESS si propone di realizzare un acceleratore lineare da 1334 MeV, cioè 1,334 GeV, tra i più potenti al mondo, la cui fase realizzativa è prevista nel periodo 2005-2010 e il cui costo è previsto in 1,5 miliardi di euro.

L’ESS non è il solo progetto di tal tipo: negli Stati Uniti c’è il progetto US SNS (Spallation Neutron Source), che include un acceleratore lineare da 1330 MeV e che dovrebbe diventare operativo entro il 2006; in Giappone il KEK-JAERI J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex), che prevede un acceleratore lineare da 3.000 MeV entro il 2005 e uno da 50.000 MeV programmato per il 2007⁸.

Mentre il progetto giapponese dichiara come principale proposito proprio la ricerca sulla trasmutazione delle scorie nucleari, l’ESS, nel corso delle varie modifiche che ha subito, ha abbandonato l’idea di un *multipurpose facility* (MFP) per dare priorità a un progetto unico, seppur dotato di flessibilità (giugno 2001). In realtà, anche se la trasmutazione sembra essere stata ufficialmente abbandonata, essa rimane un’opzione aperta per l’ESS. Nel corso del 2004 è prevista l’approvazione del progetto e la localizzazione dell’impianto, ma già l’individuazione di un’area a Lund in Svezia, tra le cinque possibili designazioni, ha prodotto vivaci contestazioni anche da un punto di vista strettamente scientifico.

Quali motivazioni sono state addotte contro l’ipotesi, ancora aperta, dell’ESS come prima fase per la trasmutazione delle scorie radioattive?

Forse quella meno rilevante riguarda gli alti costi non solo del progetto, ma dell’energia elettrica necessaria per il suo esercizio; non è la prima volta che compaiono alti costi in rapporto alle realizzazioni della “Big Science”, anzi della Megascienza (Peter Tindemans, presidente del Consiglio dell’ESS è stato anche presidente dell’OECD Megascienza Forum). I soli costi dei consumi elettrici sono stati valutati in 44 milioni di euro che, tenendo conto dei circa duecento giorni all’anno di operatività, comportano circa 9000 euro l’ora per l’elettricità. A fronte di questo parametro vanno tenuti presenti i 650 posti di ricercatori, amministrativi e tecnici previsti e, soprattutto, il fatto che l’impianto verrebbe usato da circa 4.000 ricercatori⁸.

Le obiezioni più corpose a questa linea di ricerca sono sostanzialmente due. La prima riguarda il ricorso al riprocessamento postulato dalla tecnologia di trasmutazione. Il riprocessamento, che peraltro non esaurisce le costose operazioni di separazione dei vari radionuclidi, è osteggiato dagli ecologisti sia per motivi sanitari - per l’impatto sui lavoratori professionalmente esposti e sulle popolazioni residenti nei siti degli impianti - e, ancor più, per motivi strategici. Nel riprocessamento infatti si separa il Plutonio, l’elemento non presente in natura, che è un componente base per gli ordigni atomici.

La seconda obiezione riguarda l’efficacia stessa dei processi di trasmutazione, in quanto alcune reazioni possono produrre radionuclidi a vita media assai più lunga di quella di partenza. Infatti, per esemplificare, se la cattura dei neutroni irradiati dal bersaglio consente, attraverso una catena di reazioni nucleari, di “abbattere” lo I_{129} , emivita 16 milioni di anni, fino allo Xe_{130} che è stabile; o il Cs_{135} , emivita di 2,3 milioni di anni, fino al Ba_{136} , anch’esso stabile, o il Pu_{239} al Pu_{241} , emivita 14 anni, non così avviene per il Cs_{133} , che fa parte insieme al Cs_{135} della miscela di isotopi presenti nel combustibile irraggiato, o per il Pu_{241} . Il primo, che è stabile, si trasmuta per cattura neutronica in Cs_{135} ; il secondo da Pu_{241} in Pu_{242} con emivita di 380.000 anni.

Non è questa la sede per un’esposizione delle ricerche sui processi che si innescano nei vari tipi di reattore, anche in quelli sub critici del tipo proposto da Carlo Rubbia. Per un quadro di estrema sintesi, con una bibliografia essenziale, rimandiamo a una nota già citata⁷.

4. La tecnologia laser

L'esperimento, condotto nel 2003 da ricercatori di istituti inglesi e tedeschi coordinati da Ken Ledingham della Strathclyde University⁹, consisteva nel colpire col laser un piccolo bersaglio d'oro per ionizzarlo e formare un plasma, accelerando gli elettroni del plasma fino a raggiungere velocità relativistiche. Quando gli elettroni colpivano l'oro solido del bersaglio essi emettevano raggi γ come radiazione di *bremsstrahlung*¹⁰. Ponendo dietro il bersaglio d'oro un campione di scoria nucleare contenente iodio radioattivo, i raggi γ colpivano un nucleo di I_{129} strappandogli un neutrone e trasmutandolo così in I_{128} , la cui emivita è 25 minuti circa.

Il VULCAN glass laser del laboratorio di Rutherford, pulsato con la durata di 0,7 picosecondi (1 picosecondo= 10^{-12} sec.) e l'energia di 360 joule, era focalizzato per fornire un'intensità di 5×10^{20} Watt/cm². Ogni impulso laser produceva circa 3 milioni di nuclei I_{128} ⁹.

Questo esperimento potrebbe essere definito come un approccio alla trasmutazione tramite un sistema guidato dal laser. Più in generale ci troviamo nel campo della fisica nucleare con i laser, cioè delle reazioni nucleari, fissione inclusa, che possono essere indotte dal laser¹¹. Le prime idee risalgono a circa 15 anni fa e sono divenute esperienze di laboratorio a partire dal 1999 sia nel UK che nel Lawrence Livermore National Laboratory (US), proprio con la fissione indotta dal laser nell' U_{238} . Su questo tema e, più in particolare, sulla trasmutazione dello I_{129} si è esercitato anche un gruppo di ricercatori della Friedrich Schiller University di Jena in Germania¹². Riguardo alle possibilità di questa tecnologia è lo stesso Ledingham a dichiarare necessario un aumento di scala per trattare in futuro i volumi prodotti dall'industria nucleare, ritenendo che l'uso dei laser per trattare le scorie nucleari si presenta come una via efficiente e relativamente a basso costo e che le reazioni nucleari indotte dal laser possono avere applicazione nel campo degli isotopi per la medicina.

Un ruolo importante lo gioca ovviamente anche l'intensità del laser. Al presente le più alte intensità raggiungono 10^{21} Watt/cm², ma sono già in corso progetti per costruire laser 100 volte più intensi per uno studio degli eventi riportati in Fig. 3.

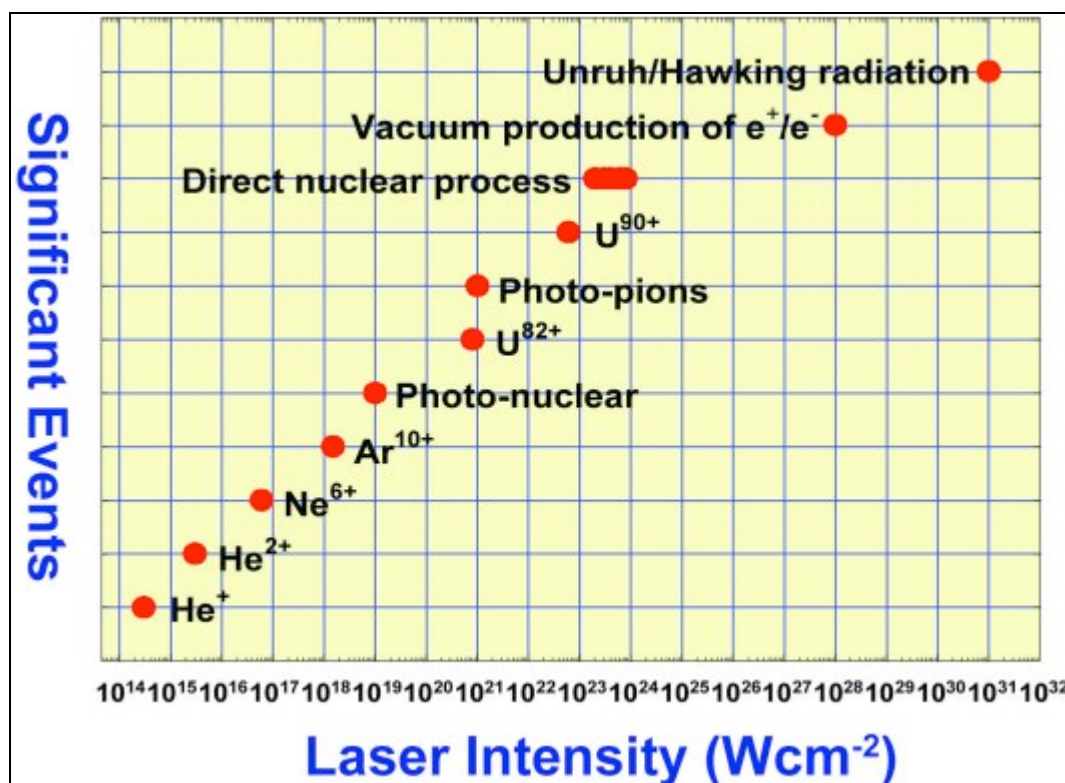


FIG 3 ALCUNI SIGNIFICATIVI EVENTI ATOMICI E NUCLEARI IN FUNZIONE

5. Il sito di profondità come “soluzione”? Il caso del WIPP

La nuova versione del decreto elimina il riferimento a Scanzano, ma per il sito per la III^a categoria fissa il termine per l'individuazione “concertata” con la Conferenza Stato-Regioni entro un anno, dopo di che deciderà il governo. Un anno per individuare il sito geologico profondo appare abbastanza irrealistico e non motivato e, se si accettassero le posizioni espresse nel documento Sogin¹³ a commento degli studi preliminari effettuati da alcuni decenni in qua, Scanzano apparirebbe come unico sito geologico proponibile per l'Italia.

L'analogia del sito lucano con quello dove si trova il deposito statunitense sperimentale WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) del New Mexico, in funzione dal 1998, è stata proposta con superficialità da parte dei decisori politici (non invece da parte tecnica). La zona è desertica, la qual cosa costituisce una profonda differenza con Scanzano riguardo al rischio di rilasci radioattivi: la dose impartita in corrispondenza a un rilascio, stimato o reale, dipende infatti dalla popolazione coinvolta. Inoltre, anche se il sito del WIPP è una formazione salina a oltre 600 m di profondità in una formazione geologica vecchia di 225 milioni di anni (molto più vecchia di Scanzano), si tratta di un deposito progettato non per ospitare rifiuti ad alta attività (HLW) ma per contenere rifiuti a lunga vita (contenenti transuranici) provenienti da attività militari e che a regime avrà un volume di 170.000 m³. La possibilità di ospitare HLW – rifiuti che presentano una produzione significativa di calore (>100W per m³) è attualmente esclusa, anche se sono in corso degli studi.

Il criterio di progettazione del WIPP, come di altri depositi, è quello di garantire che la massima esposizione non comporti – sull'arco di 10 mila anni - una dose superiore a 150 µSv (15 mrem). Per il WIPP gli aspetti che hanno ricevuto la maggiore attenzione nel dibattito pubblico tra i tecnici dell'EPA e del DOE e le osservazioni, anche di carattere tecnico, presentate da esperti a vario titolo hanno riguardato in particolare gli scenari di intrusione umana. Come la Basilicata, anche quella è un'area soggetta ad attività estrattive (petrolifere e minerarie).

E' utile ricordare alcuni degli scenari e che tipo di discussione sia stata condotta per la valutazione delle caratteristiche del deposito (Performance Assessment), che il DOE ha condotto per la verifica dei criteri di conformità ai rilasci massimi ammessi dalle linee guida dell'EPA¹⁴.

Perforazione ad aria

E' stato osservato che il caso dell'utilizzo di aria, tecnica che potrebbe essere impiegata nell'area del WIPP (lo è già nel Delaware Basin), comporterebbe degli scenari di rilascio sostanzialmente diversi da quelli adottati dal DOE nelle sue valutazioni per la certificazione del sito.

Per rispondere a queste osservazioni, l'EPA ha elaborato uno studio specifico che ha messo a disposizione del pubblico per osservazioni e commenti. Lo studio ha esaminato la frequenza dell'uso di questa tecnica nell'area del WIPP, la probabilità che tale tecnica possa essere impiegata nelle condizioni specifiche del WIPP, e il volume di rifiuti radioattivi che potrebbe essere rilasciato nel caso di intrusione nel deposito.

L'EPA ritiene teorica l'assunzione che tale tecnica possa essere impiegata in futuro perché le aziende ne riconosceranno la bontà. I criteri di conformità assunti dall'EPA richiedono che il DOE ipotizzi che le tecniche future di estrazione rimangano quelle già consolidate al tempo in cui la domanda di conformità è stata presentata.

Tutte le verifiche hanno confermato che questa tecnica è impiegata in rari casi e non nelle vicinanze del WIPP; la valutazione dell'EPA è che tale pratica non è comune nell'area (<1,65% dei pozzi).

E' comunque stato calcolato dall'EPA - per rispondere ai commenti del pubblico - un potenziale rilascio di rifiuti radioattivi, che rientrerebbe nel range valutato per la perforazione con fanghi. E' stato impiegato anche un modello quasi-statico, che sovrastima le fuoriuscite rispetto a un altro codice di calcolo usato per le fuoriuscite di gas. In ogni caso, la conclusione dell'EPA è stata che il DOE non è tenuto a inserire questo scenario nella Performance

Assessment. E' curioso che i risultati delle stime preliminari dell'EPA siano confortanti ma che lo stesso lo scenario non sia stato incluso nella valutazione di conformità, forse per evitare di allungare i tempi.

Lo "scenario Hartman". Iniezione di fluidi.

Si tratta di un caso realmente avvenuto a 40 miglia dal sito, al di fuori del Delaware Basin, in una situazione geologicamente diversa. Mr Hartman ha riscontrato, durante una perforazione petrolifera, una fuoriuscita di acqua salmastra in pressione, che dopo le indagini risultò essere stata introdotta un miglio più lontano.

Lo "scenario Hartman" è quello di una iniezione di fluidi che causi movimenti di fluidi ad alta pressione. All'inizio il DOE escluse lo scenario perché da calcoli preliminari risultava che l'intrusione di fluidi sarebbe stata nel range degli scenari senza intrusione. Alcuni commentatori hanno riportato le conclusioni di un modello elaborato sullo scenario Hartman da due ricercatori¹⁵ da cui risultavano fuoriuscite in eccesso rispetto al limite di autorizzazione. L'EPA ha cercato di verificare le ipotesi con un altro modello¹⁶ che in due casi dava risultati analoghi, anche se le caratteristiche dei due modelli non rendono confrontabili i risultati.

L'EPA ha giudicato non realistico il modello proposto (generazione di fratture nell'anidrite fino a 3 km che rimangono aperte) rispetto alla situazione reale del "caso Hartman", che comunque non è geologicamente confrontabile rispetto al WIPP. Alcuni aspetti del modello citato non erano chiari (ad es. se la lunghezza delle fratture generate era basata su fratture completamente aperte o parzialmente aperte). Contattando l'autore principale per chiarimenti non è stata ottenuta documentazione aggiuntiva.

Anche se l'EPA ha accettato la valutazione del DOE che le conseguenze di una iniezione di fluidi avrebbe conseguenze scarse sul sito, il DOE ha presentato una documentazione aggiuntiva dalla quale emerge una probabilità molto bassa per la catena di eventi che realizza uno scenario catastrofico come quello prospettato.

Le conclusioni dell'EPA sono state di non includere neanche questo scenario nel Performance Assessment perché:

1. nei modelli utilizzati, per giustificare uno scenario catastrofico come possibile, si sono adottate ipotesi non realistiche che massimizzerebbero i rilasci;
2. alcuni dei risultati delle simulazioni con il codice del DOE erano simili a quelli dei commentatori, ma non direttamente confrontabili per la diversità del modello; l'EPA ha effettuato delle sue valutazioni della probabilità del caso peggiore, che risulta compresa nel range di 1/56889 e 1/667 milioni.
3. in generale, invece, il modello del DOE predice scarsi flussi che non alterano i risultati generali della valutazione
4. il nuovo regolamento estrattivo entrato in vigore con il WIPP elimina l'iniezione di fluidi in prossimità del sito
5. comunque vi sono differenze significative tra i due siti geologici tali da non renderli confrontabili.

Iniezione di CO₂

Si tratta di una pratica comune per sfruttare l'ultima fase dell'estrazione petrolifera, effettuata anche nel Delaware Basin, che non è stata inclusa negli scenari del DOE per il Performance Assessment. Il DOE considera questa tecnica non impiegata nella zona e quindi esclusa dalle simulazioni per la verifica di conformità del sito.

L'EPA ha verificato che non esiste la pratica in quella porzione del Delaware Basin che ricade nel New Mexico ma in Texas. Peraltro, la tecnica nell'area del WIPP è limitata da altre considerazioni rispetto all'ampiezza delle riserve petrolifere e alla presenza di condotte petrolifere.

L'EPA ha comunque effettuato stime con ipotesi molto conservative sulle condizioni di diffusione negli interstizi - stime disponibili nell'archivio pubblico - per le quali l'iniezione di anidride carbonica non pone una minaccia al WIPP. L'EPA ha consentito di omettere anche questo scenario nel Performance Assessment del DOE.

Ci siamo voluti soffermare con relativa abbondanza di dettagli su tale questione perché, aldilà di considerazioni di merito, essa ben illustra il tipo di dibattito, ricco e articolato, tra

istituzioni federali e tra loro e i cittadini, in particolare con le osservazioni degli esperti indipendenti, che caratterizza i passaggi tecnico-scientifici a monte delle decisioni. E nonostante questa attenzione, emerge come alcune delle valutazioni abbiano comunque un margine non piccolo di opinabilità.

6. La situazione italiana

Com'è noto, le stime correnti sul volume totale dei rifiuti nucleari di II^a e III^a categoria sono dell'ordine di circa 100 mila m³, di cui l'80% dovrebbe provenire dallo smantellamento delle centrali nucleari. La III^a categoria è stimata in circa il 12% del volume totale, con poco meno del 95% del contenuto di radioattività¹⁷. Di questi sarebbe utile avere un inventario il più possibile preciso dei diversi nuclidi nelle varie categorie di rifiuti. Non è un'impresa semplice perché la caratteristica dell'inventario dei rifiuti italiani è quella di avere quasi tutte le tipologie dei rifiuti anche se in quantità limitate.

Nella classificazione dei rifiuti nucleari in Italia – secondo la Guida Tecnica ANPA n. 26 - convergono nella III^a categoria due distinte classi: i rifiuti a media attività e lunga vita (come alcune parti attivate dei reattori nucleari); i rifiuti ad alta attività (come il combustibile esaurito).

Va evidenziato come dei volumi stimati per le scorie di III^a categoria, circa 12.000 m³, la quota di rifiuti ad alta attività (HLW) rappresenti una parte minore, circa un migliaio di m³, essendo il resto prevalentemente costituito da rifiuti intermedi e a lunga vita. (LILW–LL Low and Intermediate Level Wastes – Long Lived) per i quali si potrebbe ipotizzare, previo studi e adeguate indagini sul campo, un condizionamento in matrice cementizia ed uno smaltimento in un sito a profondità non eccessiva (100-200m)¹⁸. Questa ipotesi pone problemi diversi sul piano tecnico, ma assai simili in termini di accettabilità sociale del sito geologico profondo. E' giustificabile la ricerca di un sito di profondità in virtù della presenza di una quantità assai ridotta di rifiuti ad alta attività? Altri Paesi, con ben maggiori quantità rispetto all'Italia, dovranno affrontare la questione nei prossimi anni e trovare una collaborazione non presenterà difficoltà insormontabili.

7. Considerazioni conclusive

Il primo elemento è quello di ricostruire le condizioni di credibilità e di trasparenza, senza cui nessuna soluzione appare possibile, e dunque riaprire la discussione ampliando l'informazione e la partecipazione in un contesto di trasparenza, sui principi che ispirano la proposta di direttiva europea e le linee di condotta già seguite in altri Paesi.

La partecipazione e la trasparenza sono necessarie anche per avere maggiori garanzie di qualità nelle diverse fasi del condizionamento dei rifiuti e dello smantellamento delle centrali, essendo la accuratezza di ognuna di queste operazioni un elemento importante per la sicurezza del deposito. Dalle considerazioni qui esposte, emerge che:

A. La sistemazione delle scorie nucleari di II^a categoria può avvenire in depositi definitivi superficiali o sub superficiali con garanzie di sicurezza per la salute e per l'ambiente, attraverso una gestione e un controllo l'operatività dei quali attiene a dinamiche temporali che possiamo affrontare. Alla serietà e al rigore degli studi scientifici per l'individuazione dei siti possibili e delle procedure per la qualificazione tecnica dei siti scelti, deve far riscontro un'informazione completa e non reticente alle popolazioni e agli amministratori interessati e un contraddittorio tecnico-scientifico che coinvolga i cittadini in un confronto pubblico.

Tutto ciò non è avvenuto nel caso di Scanzano, come anche prima per il trasporto degli elementi di combustibile irraggiato da Saluggia, con la conseguenza grave di aver reso problematica una sistemazione che sarebbe stata, certo, difficile, ma che ora non si può davvero giovare della credibilità di chi ha la responsabilità di decidere ed operare.

Dopo la gestione del "decreto Scanzano" sarà assai difficile trovare un solo sito per la II^a categoria; sarà necessario identificarli nelle Regioni che già ospitano la parte più rilevante dei rifiuti nucleari – Piemonte e Emilia Romagna, e poi Lazio, Campania, Basilicata, Toscana – sulla base di due considerazioni: lo scenario attuale contiene già dei rischi, che tendono a crescere nel tempo. E dunque ogni scenario futuro (ad esempio la sistemazione in siti superficiali della II^a categoria) va espresso in termini di riduzione dei rischi rispetto alla situazione attuale. Il decreto ha eliminato ogni riferimento alla II^a categoria come se fosse un problema amministrativo del Commissario di Governo; in realtà per ottenere il "consenso

informato” è necessario un coinvolgimento e un’assunzione di responsabilità (cosa certo difficile trovare nelle istituzioni alla vigilia di tre tornate elettorali!).

B. La questione dei prodotti di fissione e dei radionuclidi a emivita lunghissima dovuti all’attivazione neutronica potrebbe essere equiparata, dopo ulteriori approfondimenti e miglioramenti tecnologici, a quella delle scorie radioattive di II^a categoria. Una componente importante di questi prodotti (oltre il 30% in volume) è data dalla grafite della centrale nucleare di Latina con C₁₄ attivato, per il quale l’emivita è dell’ordine di 5.700 anni. Non siamo cioè, per questa componente, nelle condizioni degli FP di fig.2. Poiché altri Paesi europei, la Russia ad es., e della UE hanno un problema analogo per quantitativi maggiori è ragionevole inquadrare la questione in un progetto di ricerca per un’eventuale alternativa al sito geologico (che, peraltro, potrebbe essere comune).

C. Il problema non risolvibile nel breve-medio periodo rimane quello dei rifiuti radioattivi di III^a categoria, e dunque del combustibile irraggiato, dei prodotti di attivazione a vita lunga, degli elementi transuranici e dell’Uranio. La risposta del sito geologico profondo non rappresenta una “soluzione” perché non è data una stabilità geologica per centinaia di milioni di anni e perché ogni progetto perde del tutto, in questo contesto, i connotati di una logica operativa.

Non è escluso affatto che la mole dei progetti di ricerca sulla spallazione, aperti o esplicitamente mirati alla trasmutazione, i tempi brevi previsti, l’indubbio fascino della “Big Science”, possano rendere questa tecnologia disponibile per l’incenerimento nel giro di dieci-quinici anni. Ma un impegno rilevante in questa direzione, con l’intensa attività di riprocessamento collegata, oltre ad accrescere i timori per la proliferazione atomica, potrebbe costituire un tentativo di rilancio del nucleare fin dai prossimi anni, mentre lo stesso “Generation IV”, un progetto che collega nove Paesi, Stati Uniti in testa, pone al 2030 l’obiettivo di un nucleare più “socialmente accettabile” per risollevarlo dagli attuali livelli, assai modesti - poco più del 6% del fabbisogno mondiale di energia - se si pensa alle previsioni che accompagnavano ancora venti anni fa questa fonte energetica. L’opposizione a questa strategia è già scesa in campo, anche con il supporto di validi contributi scientifici¹⁹; e non è difficile prevedere una sua estensione. L’opposizione al rilancio del nucleare è assai forte in tutto il mondo; anche chi scrive ritiene corretto dichiarare di muoversi in un tale contesto.

Sarebbe ragionevole pensare a un’industria dedicata alla chiusura di tutto il nucleare, sia civile che militare; questa distinzione essendo stata sostanzialmente vanificata già dai tempi dell’INFCE (International Nuclear fuel Cycle Evaluation), la Commissione insediata nel 1977 da Jimmy Carter che concludeva nell’ ’80 i suoi lavori negando l’esistenza di una filiera di reattori per la produzione elettronucleare esente dal rischio della proliferazione delle armi nucleari. Ma questa “ragionevolezza” presuppone accordi complessivi assai difficilmente ipotizzabili allo stato attuale.

A meno che la tecnologia laser che, anche se ai primi stadi, per vari punti sembra più promettente, non faccia compiere passi da gigante.

D. Aver aperto l’era nucleare significa, anche per coloro che sono fermamente intenzionati a chiuderlo, scontare, come del resto avevano denunciato fin dall’inizio proprio sul problema delle scorie radioattive, un lungo periodo ancora di convivenza con tecnologie e materiali nucleari. Appare saggio allora affidare per questo periodo questo tipo di scorie alla tecnologia dei “cask”, senza impelagarsi in imprudenti avventure come è accaduto per Scanzano, quando, con disprezzo delle indicazioni che pure provenivano dalla sede tecnica, si è pensato di poter collocare per decreto in un sito geologico, “definitivamente” e insieme, scorie nucleari di II^a e III^a categoria.

La così limitata quantità di rifiuti a lunga vita e di quelli ad alta attività, e la proposta di direttiva europea già citata, indica nella collaborazione con Paesi che hanno maggiori quantità e che dovranno investire comunque ingenti risorse nelle soluzioni, la strategia per la soluzione per il lungo termine.

Al contrario, attrezzarsi per un sito di profondità come “soluzione finale” ci candida a diventare importatori netti di rifiuti, visto che altri Paesi non hanno ancora un sito di

profondità e che un sito di quel genere - se si fa una analogia con il WIPP - può ospitare circa il doppio di tutti i nostri rifiuti, compresi quelli di II^a categoria, e circa 20 volte quelli di III^a. Dunque una strategia a due velocità – sistemare da subito i rifiuti di II^a categoria e stoccare “temporaneamente” per alcune decadi quelli di III^a – è invece più gestibile e può consentire una soluzione di lungo termine a minor rischio, a patto di mettere in campo per tutto il tempo necessario, risorse umane ed economiche adeguate.

Note

¹ Per emivita o periodo si intende l'intervallo di tempo in capo al quale l'attività di un chilo (massa) di un elemento radioattivo si riduce a quella di mezzo chilo (dello stesso elemento).

² La disintegrazione è il processo elementare alla base della radioattività: essa consiste nell'emissione da parte di un nucleo atomico di "raggi" α (due protoni più due neutroni) o β (elettroni) o γ (radiazione elettromagnetica di frequenza superiore ai raggi X), che trasforma il nucleo originario in un altro nucleo. Solo alcuni elementi (si pensi alla tabella di Mendelejev) sono spontaneamente soggetti alla disintegrazione, che, per ognuno di essi, può avvenire secondo una o più delle forme dette (uno stesso elemento può, ad esempio, "disintegrarsi" emettendo sia α che β che γ : è il caso dei tre isotopi dell'Uranio).

³ C. Cantaluppi, S. Degetto, Ann. di Chim., Journ. of Analytical and Envir. Chemistry 90, p.665, 2000.

L'Uranio è presente, in concentrazioni piccolissime e differenti per vari ordini di grandezza, nell'ambiente naturale: nella crosta terrestre; nelle acque del mare, delle falde e dei fiumi e nell'aria.

Nella crosta terrestre l'Uranio è presente con un livello medio di 3 ppm (ppm = parte per milione, corrisponde a un grammo per tonnellata), ma la sua concentrazione è rilevabile con valori assai diversi: in alcune rocce fosfatiche (utilizzate per la produzione dell'acido fosforico) essa va, in diverse aree geografiche, da 20 a 60 volte il livello medio (fino cioè a circa 150/200 ppm). Nelle acque marine invece la concentrazione dell'Uranio si mantiene sostanzialmente costante sul valore di 3 ppb (parte per miliardo) pari a 3 mg/litro (mg = microgrammo, cioè un milionesimo di grammo). Il mare è la vera "riserva": un km³ di mare contiene circa tre tonnellate di Uranio e ogni anno l'erosione delle rocce ne porta, attraverso i fiumi, una quantità complessiva che, per tutti gli oceani, è stata stimata in 10.000 tonnellate all'anno (cfr D.V. Botole, D.L.K.Somayajulu, Mar. Chem. 5, p.291, 1977). Sono stati proposti vari metodi di estrazione dell'Uranio dal mare. Nelle acque dei fiumi il valor medio della concentrazione è stimato in 0,3 mg/litro (cfr K.K.Bertine et al., Geochim. Cosmochim. Acta 34, p.641, 1971). In aria il valor medio della concentrazione è dell'ordine di 0,00003 mg/m³. Per quel che riguarda i valori di concentrazione dell'Uranio nella crosta terrestre, nel mare e in aria essi coincidono con i valori medi forniti da varie altre fonti, tra le quali i Rapporti dell'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation).

⁴ cfr. www.cfo.doe.gov/stratmgmt/plan/doesplan.htm

⁵ Peter Diehl: "Depleted Uranium: a by-product of the nuclear chain" in Depleted Uranium. A post-war disaster for environment and health, Laka Foundation, May 1999

⁶ E' stato, ad esempio, il caso della compagnia nucleare francese Cogema che, non avendo tenuto conto dell'isotopo U₂₃₆, aveva valutato in 15.900 Bq/g l'attività dell'Uranio depleto per il progetto a lungo termine di Bessines (vicino a Limoges). Il fatto che, durante il processo autorizzativo, Cogema dovette ricalcolare l'attività includendo l'U₂₃₆, spostò l'attività dell'Uranio depleto a 21.100 Bq/g e il progetto superò allora il limite dei 100.000 Curie (1 Curie = 3,7x10¹⁰ Bq) e dovette essere sottoposto a un nuovo tipo di autorizzazione: quella per gli impianti nucleari di base, che prevede un maggior coinvolgimento pubblico (vedi ⁵).

⁷ H. Condé: "The Impact of Nuclear Science on Life Science. Introduction to ADS for Waste Incineration and Energy production", Dept. of Neutron Research, Uppsala University, 2001

⁸ V.Legrand, X.Coeytaux, M.Schneider, Y.B. Faïd: "The European Spallation Project and Nuclear Waste Transmutation", WISE, Paris, 27 Nov. 2002

⁹ K. Ledingham et al., J. Phys. D36 L79, 2003

¹⁰ La "bremsstrahlung", ovvero "radiazione di frenata", è la radiazione elettromagnetica emessa quando delle particelle elementari vengono fortemente decelerate. Essa è particolarmente significativa per gli elettroni frenati dai forti campi elettrici di un nucleo.

¹¹ K.W.D. Ledingham, R.P. Singhal, P. McKenna, I. Spencer: "Laser-induced nuclear physics and applications", Europhysics News, Vol. 33 No.4, 2002

¹² J. Magill et al., Applied Physics B77 387, 2003

¹³ SOGIN, Studio per la localizzazione di un sito di deposito, novembre 2003

¹⁴ EPA, 40 CFR Part 194 Part III, May 18, 1998

¹⁵ Bredehoeft e Gerstle citati in (14). Il lavoro iniziale è Bredehoeft JD. 1997. Hartman Scenario Implications for WIPP. La Honda (CA): Hydrodynamics Group

¹⁶ Il modello BRAGFLO del DOE cit in (14).

¹⁷ Dati Sogin citati nel Rapporto del Gruppo di Lavoro sulle condizioni per la gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi, Conferenza Stato Regioni, 2001. La radioattività è quella stimata al 2010.

¹⁸ Classification of Radioactive Waste - Safety Series n.111-G-1.1 - IAEA, 1994

¹⁹ cfr, ad es., A.Makhijani, H.Zerriffi: “Waste Transmutation: The Nuclear Alchemy Gamble”, IEER/SDA V8N3/ E&S#13, oltre alle pubblicazioni periodiche di WISE (vedi nota 8)