

Capitolo 4 – Le scorie nucleari e la radiotossicità

4.1 - Le scorie nucleari

Con il termine di *scorie nucleari* si intende indicare il combustibile esausto originatosi all'interno dei reattori nucleari nel corso dell'esercizio. Esse rappresentano un sottoinsieme dei rifiuti radioattivi, a loro volta suddivisibili in base al livello di attività in tre categorie: basso, intermedio ed alto. Esempio di rifiuti a basso livello sono costituiti dagli indumenti *usa e getta* usati nelle centrali nucleari; il 90% dei rifiuti radioattivi prodotti appartengono a questa categoria, ma contengono solo il 1% della radioattività di provenienza antropogenica [4.1].

Rifiuti a livello intermedio sono costituiti ad esempio dall'incamiciatura del combustibile, richiedono schermatura, e costituiscono il 7% del volume dei rifiuti radioattivi prodotti nel mondo (ma contengono solo il 4% della radioattività) [4.1].

Al contrario le scorie ad alto livello costituiscono il 3% del volume prodotto nelle attività umane, ma contengono il 95% della radioattività [4.1]. Tipico esempio è costituito dal combustibile esausto delle centrali nucleari. I 436 reattori nucleari presenti in 31 nazioni infatti producono annualmente migliaia di tonnellate di scorie.

Un reattore del tipo PWR scarica annualmente da 40 a 70 elementi di combustibile, un BWR da 120 a 200 (rispettivamente 461.4 e 183.3 Kg di uranio per assembly). Infatti dopo 3 anni di permanenza all'interno del reattore il combustibile passa alle piscine di raffreddamento; si sono formati in totale circa 350 nuclidi differenti, 200 dei quali radioattivi. Si ha, in media, la seguente composizione:

- 94% uranio 238
- 1% uranio 235
- 1% plutonio
- 0.1% attinidi minori (Np, Am, Cm)
- 3÷4% prodotti di fissione

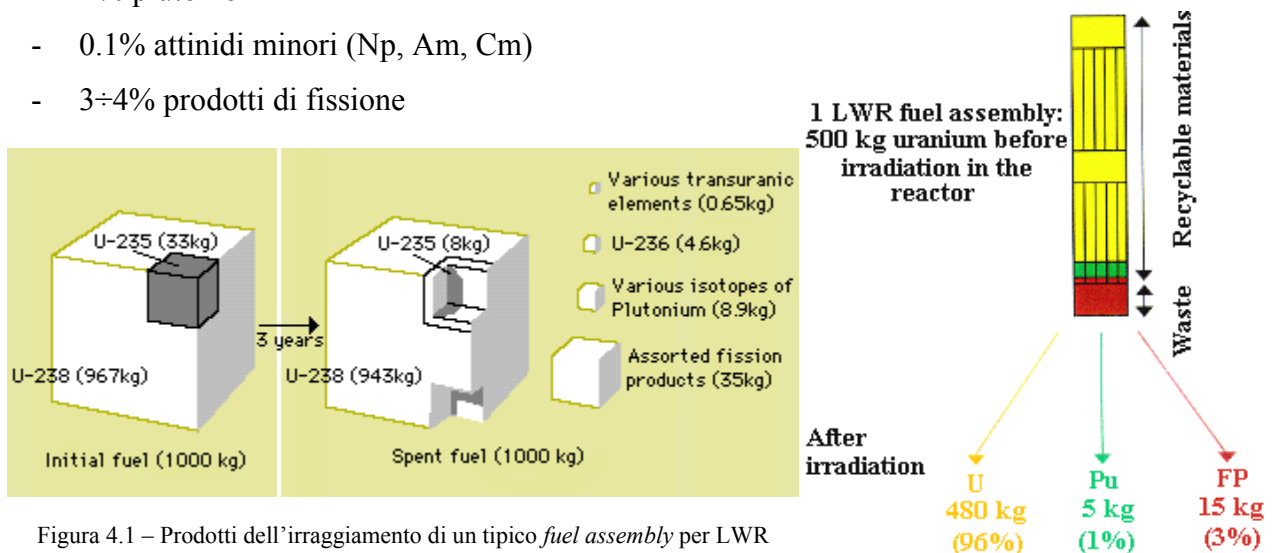


Figura 4.1 – Prodotti dell'irraggiamento di un tipico *fuel assembly* per LWR allo scarico [4.1]

Si osservi che:

- la radiotossicità del combustibile esausto decresce nel tempo e pareggia quella dell'uranio inizialmente caricato nel reattore solo dopo 250000 anni;
- il contributo maggiore alla pericolosità delle scorie è dato dal plutonio: l'80% dopo 300 anni, il 90 % dopo 500 anni;
- dopo il plutonio i maggiori contributori sono gli *attinidi minori* (nettunio, americio e curio), che contribuiscono per un ordine di grandezza meno del plutonio ma circa mille volte più dei prodotti di fissione;
- gli attinidi rappresentano dunque il maggiore pericolo potenziale delle scorie nucleari; tuttavia bisogna tener conto anche di alcuni prodotti di fissione quali alcuni isotopi dello iodio, del tecnezio e del cesio, data la loro maggiore mobilità nella biosfera e la loro maggiore affinità biologica (vie di ritorno per l'uomo).

Dato che le scorie radioattive, al contrario dei rifiuti convenzionali, decadono nel tempo, si osserva che i prodotti di fissione sono pericolosi per circa 300 anni, gli attinidi minori per circa 10000, il plutonio per circa 250000 [4.2].

Per alleggerire il problema dello stoccaggio permanente delle scorie dei reattori nucleari è necessario quindi:

- ridurre la formazione del plutonio;
- bruciare quello già prodotto.

A tale scopo sono state proposte varie soluzioni, fra le quali possono essere citati l'ADS (*Accelerator Driven System*), i reattori veloci ed ora anche i reattori HTR. Si noti che questo fenomeno è dovuto alla formazione degli elementi transuranici, in generale assai più radiotossici dell'uranio presente nelle miniere; si noti che le scorie *high-level* pareggiano la radioattività dell'uranio dopo 10000 anni, come illustrato nel in fig. 4.2.

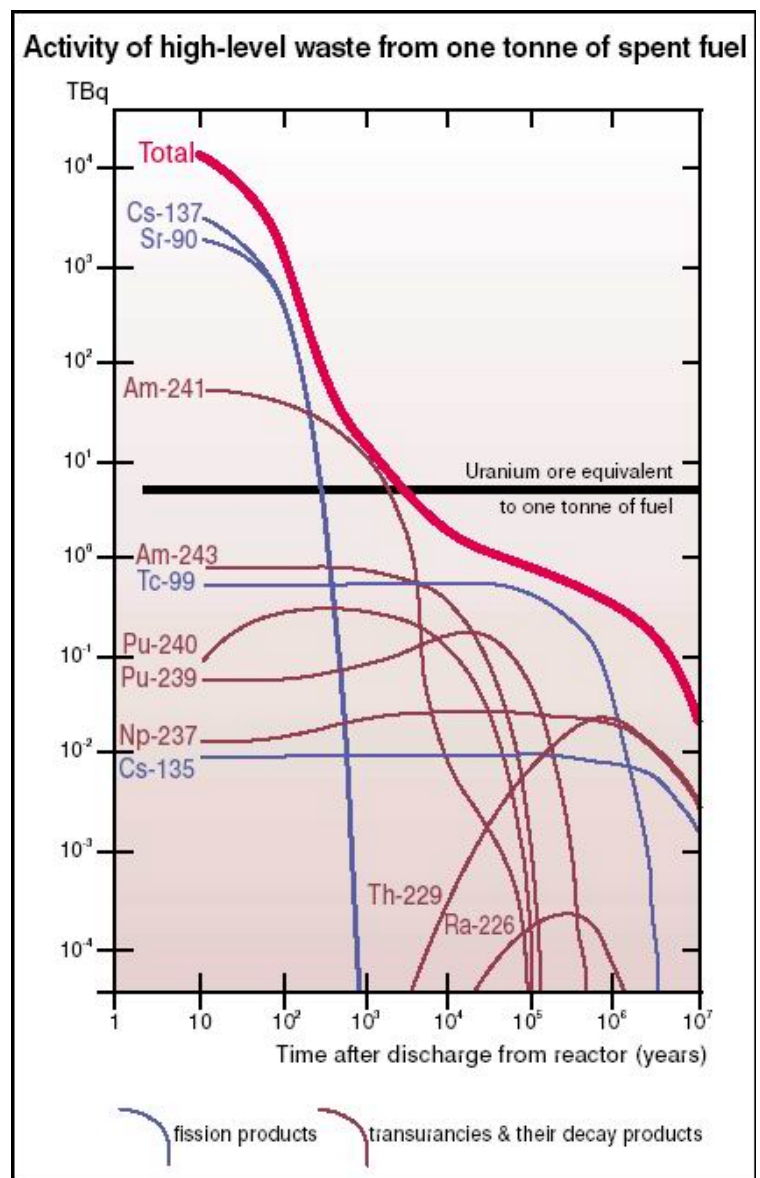


Figura 4.2 - Radioattività delle scorie in funzione del tempo [4.3]

Si noti che un impianto nucleare da 1000 MW_e produce annualmente solo 25÷30 tonnellate di scorie ad alto livello vetrificate, pari ad un volume [4.1] di circa 3 m³. E' stato calcolato che un uomo che usasse solo energia di origine nucleare produrrebbe, nell'arco della propria vita, un volume di scorie di questo tipo tale da poter essere contenuto nel palmo di una mano. Del resto dai dati sopra esposti si calcola facilmente che il consumo di 1 KWh per 100 anni produrrebbe un volume di scorie vetrificate pari a 0.3 litri (meno di una lattina da 33 cl!), o se si preferisce una sfera di diametro pari a 8.3 cm.

Un impianto da 1000 MW_e, annualmente, ne produce 12 cilindri di altezza 1.3 e diametro 0.4 metri con 400 Kg di vetro (fig. 4.3).



Figura 4.3 - Volume di scorie vetrificate prodotte nel corso della vita di un uomo [4.1]

4.2 – Lo smaltimento delle scorie

Varie sono state le proposte avanzate [4.4] per lo smaltimento permanente delle scorie. Fra queste:

- il deposito nei siti attuali;
- il seppellimento in formazioni geologicamente stabili;
- il seppellimento nei fondali oceanici;
- il deposito ai poli;
- lo smaltimento nello spazio.

Di queste solo la seconda ha trovato applicazione, mentre le altre hanno un sapore vagamente fantascientifico. L'obiettivo di questa strategia punta sul fatto che le barriere predisposte nello stoccaggio ritardino il ritorno nella catena biologica dei radionuclidi nocivi per l'uomo e per l'ecosistema in tempi dell'ordine dei millenni, durante i quali l'attività si sia andata riducendo a valori tali da non costituire un rischio significativo. Si assume infatti che comunque questi fuoriescano dal sito in futuro, per quanto remoto.

Le barriere sono di due tipi: ingegneristiche e naturali.

Le barriere ingegneristiche riguardano anzitutto la forma del combustibile che può essere:

- in formato ceramico, sotto forma di ossido (quindi scarsamente solubile);
- di scorie inglobate in vetro (vetrificazione) al borosilicato (geologicamente stabile);
- un metodo innovativo che prevede l'incapsulamento nei reticolo cristallini di minerali naturalmente stabili detto SYNROC (SYNthetic ROCK);
- il deposito in contenitori di acciaio inossidabile o di leghe del rame (si hanno prove storiche della formidabile resistenza del bronzo all'aggressione chimica nel tempo, come ad esempio fusti di cannoni o, addirittura, manufatti antichi risalenti al III millennio a.c.).

Le barriere naturali riguardano la natura dei siti e delle rocce e la disposizione delle falde acquifere. Sono da prendere in considerazione le rocce basaltiche (Svezia) per la loro consistenza e monoliticità o le miniere di sale nelle quali vi è la certezza dell'assenza dell'acqua, fin da tempi remoti.

Un esempio può essere considerato il sito USA scelto quale deposito permanente delle scorie nucleari.

Si tratta di Yucca Mountain, situato nel deserto di Amargosa, a nord della Valle della Morte, nello stato del Nevada (figura 4.4). E' stato studiato da geologi, idrologi, vulcanologi, ingegneri e scienziati ambientali; è stato fotografato da ogni angolazione, e le specie animali e vegetali accuratamente catalogate. Sono stati spesi 6 miliardi di dollari per lo studio del sito [4.5].

Quello che ha favorito la scelta di Yucca Mountain (figura 4.5) sono stati principalmente il clima secco e le falde acquifere profonde. In questa regione infatti si hanno precipitazioni annue dell'ordine dei 190 mm (clima arido), il 95% delle quali viene perso per evaporazione o assorbito dalla vegetazione del deserto [4.4]. Le acque sotterranee si trovano molto al di sotto (figura 4.6) della superficie terrestre (circa 600 metri).

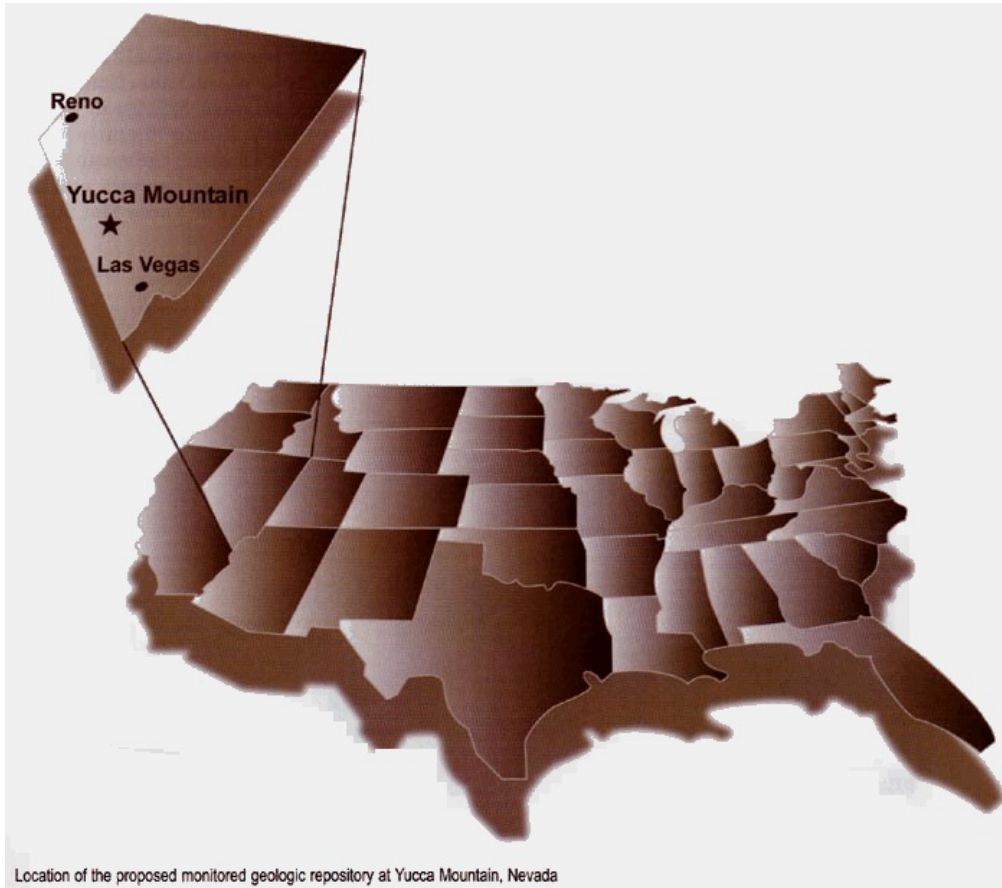


Figura 4.4 – Locazione del sito della Yucca Mountain in USA



Figura 4.5 – Vista della Yucca Mountain

Vale la pena di ricordare che gli USA rientrano nella lista degli stati che hanno deciso, al contrario del Regno Unito, Francia e Giappone, di non riprocessare il combustibile esausto (ciclo OTTO, *Once Through Then Out*).

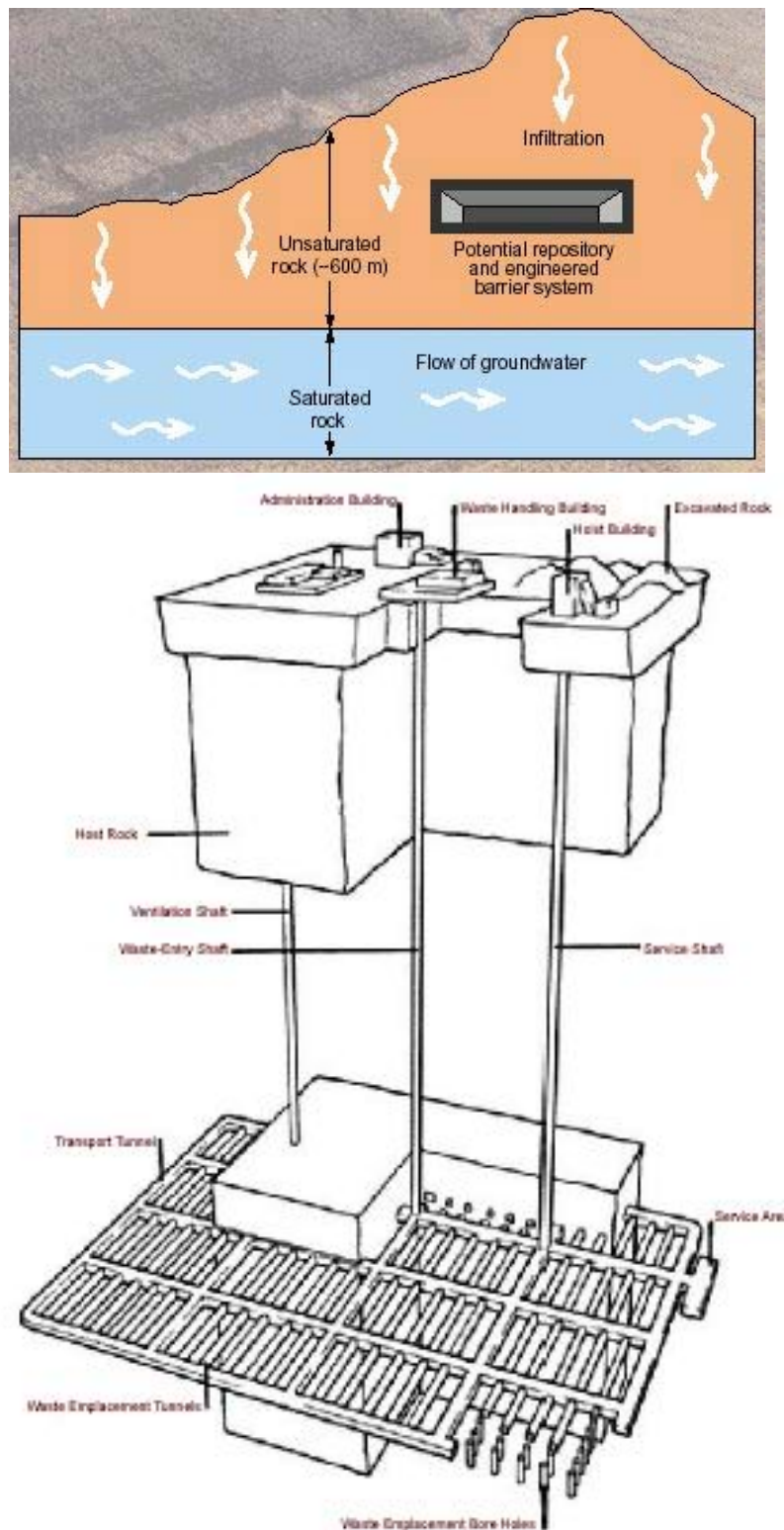


Figura 4.6 – Schema del deposito di Yucca Mountain

Secondo calcoli conservativi ci vorranno circa 100000 anni prima che i radionuclidi presenti nel sito possano dare alla popolazione che vive nelle vicinanze (circa 70 Km) equivalenti di dose pari a 20 mrem/anno (limite imposto dall'EPA, *Environmental Protection Agency*) [4.5]. Si riportano per confronto gli equivalenti di dose da fonti naturali e umane.

Si nota (figura 4.7) che una delle maggiori componenti dell'equivalente di dose è rappresentata dalla presenza all'interno delle abitazioni del gas radon, specialmente in alcuni paesi, quali la Finlandia, nella quale costituisce un serio problema.

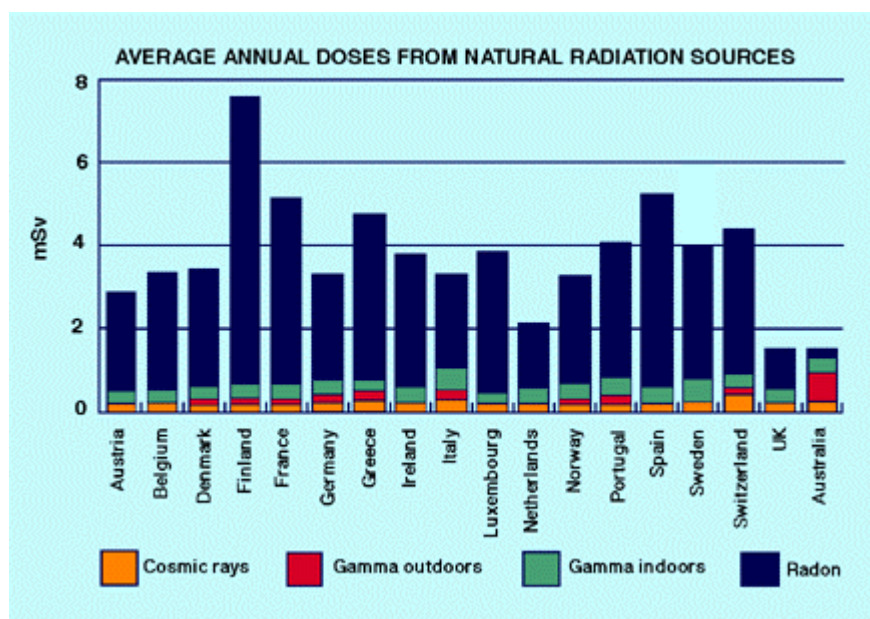
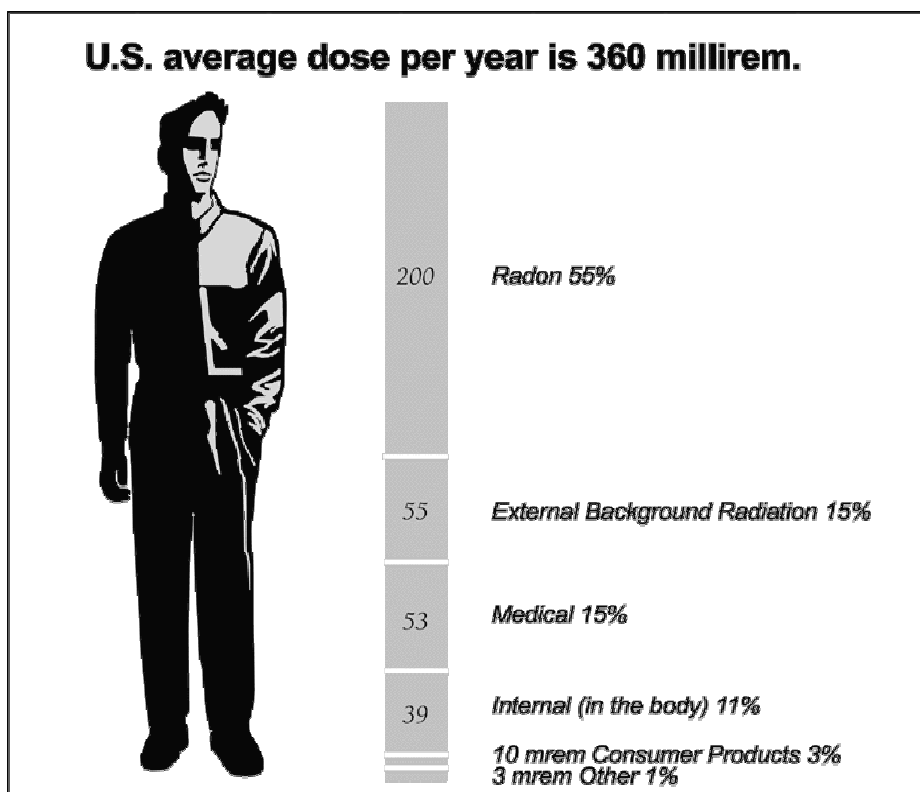


Figura 4.7 – Ripartizione media degli equivalenti di dose ed equivalenti di dose da fonti naturali [4.4]

4.3 - Il reattore di Oklo

A proposito della propagazione dei radionuclidi nel terreno dopo un'eventuale fuoriuscita dalle barriere ingegneristiche, è utile ricordare l'esperienza del reattore naturale di Oklo.

Il primo reattore nucleare funzionante della storia non è stata la pila di Fermi, il 2 dicembre 1942, bensì quello di Oklo circa 2 miliardi di anni fa.

Dati infatti i differenti periodi di dimezzamento dell'uranio 238 e 235 (4.47 miliardi e 704 milioni di anni, rispettivamente) si può calcolare che in quell'epoca geologica l'arricchimento dell'uranio naturale era pari circa al 3%, sufficiente per l'autosostentamento di una reazione a catena (figura 4.8).

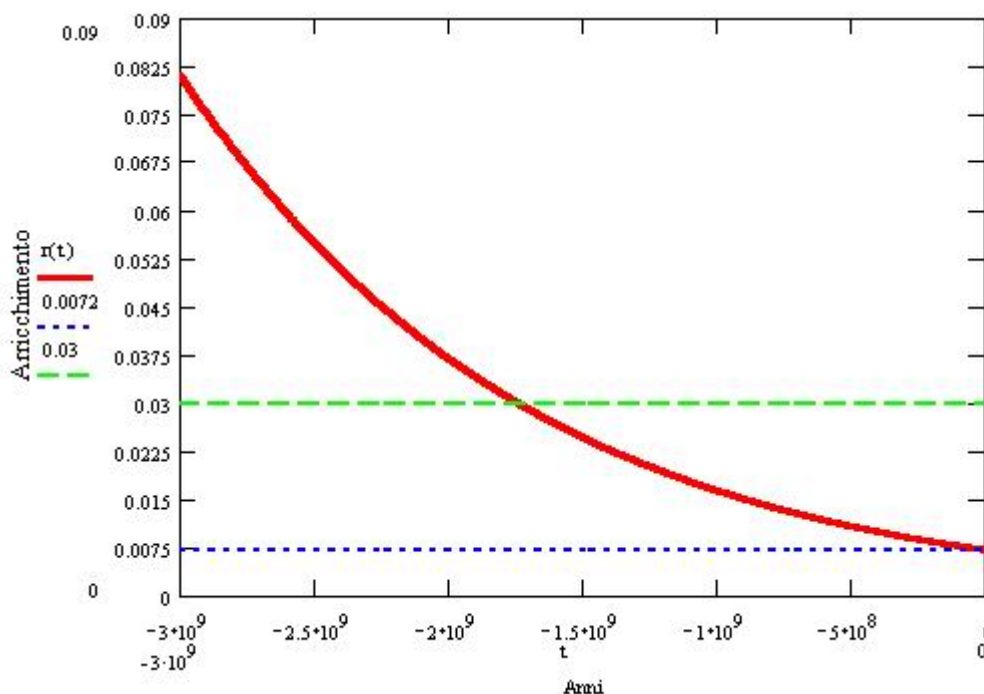


Figura 4.8 – Arricchimento dell'uranio naturale in funzione del tempo

L'arricchimento isotopico dell'uranio naturale è oggi ben conosciuto: $0.00720^{\pm 0.00001}$, pertanto anche piccole anomalie risultano evidenti. Nel 1972 un campione di uranio estratto dalla miniera di Oklo, nel Gabon (figura 4.9), fu analizzato dalla Commissione Francese per l'Energia Atomica, mostrando un'abbondanza nell'isotopo 235 pari solo a 0.00717, scostandosi di oltre tre standard deviation dal valore normale. Ulteriori analisi di campioni, situati in differenti posizioni, hanno riportato valori pari a 0.00440 [4.6].

I ricercatori francesi allora ipotizzarono che un reattore nucleare naturale si fosse formato in quel sito due miliardi di anni prima; la stima è dovuta al fatto che la formazione di depositi di uranio in

quella regione richiede il trasporto di ioni uranili con l'acqua, e si ritiene che l'ossigeno presente fosse insufficiente per la loro formazione prima della comparsa dei batteri ossigeno-produttori.

Si stima [4.6] che tale reattore abbia funzionato per circa 10^6 anni, ad un livello medio di potenza di 0.01 MW, erogando 10^8 MWh, fissionando circa 5 tonnellate di U^{235} e dando origine a 2.5 tonnellate di plutonio.

Nonostante siano passati due miliardi di anni la maggior parte dei prodotti di fissione si trovano ancora oggi nei pressi del sito, nonostante l'abbondanza di acqua; i metalli con valenza 1 o 2 sono solubili e sono stati dilavati, ma avendo periodi di dimezzamento brevi hanno ridotto rapidamente la loro pericolosità. I prodotti a lunga vita, quali il plutonio, sono stati ritenuti *in situ* e di fatto immobilizzati.

Tutto questo prova la ragionevolezza nella scelta dei depositi permanenti in siti geologicamente stabili, poiché si ritiene che essi costituiscano solo un complemento prudenziale delle già consistenti barriere ingegneristiche.

Location of Oklo site in Gabon (Africa)

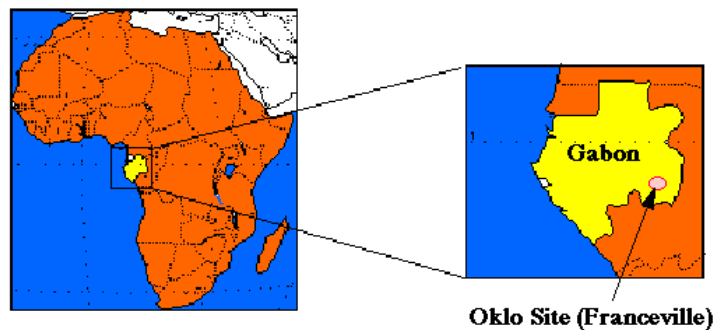


Figura 4.9 – Locazione del reattore naturale di Oklo

4.4 – La radiotossicità

La radiotossicità di un radionuclide è la capacità potenziale di indurre effetti dannosi ai tessuti viventi in seguito al suo incorporamento; quest'ultimo può avvenire per *inalazione* (in genere più pericoloso) o per *ingestione*. La radiotossicità assume valori diversi per i vari nuclidi in funzione della natura e dell'energia delle radiazioni emesse, dei periodi di dimezzamento fisico e biologico, della radiosensibilità dell'organo di interesse (o, nel caso, del corpo).

I radioisotopi sono stati classificati entro 4 distinte categorie di radiotossicità: bassa, moderata, alta, molto alta (vedi tabella 4.1).

La formula per calcolare il valore della radiotossicità è:

$$R[\text{Sv}] = F_d[\text{Sv/bq}] \times A[\text{bq}]$$

dove R è la radiotossicità (in sievert), F_d il *fattore di dose* (in sievert/becquerel), ed A l'attività del radionuclide (in becquerel). L'ICRP (*International Commission on Radiation Protection*) ha tabulato i fattori di dose per quasi tutti i radioisotopi dei nuclidi conosciuti.

Una misura alternativa del rischio potenziale dei radioisotopi è data dall'*ALI* (*Annual Limit of Intake*), definita come il quantitativo di isotopo che ingerito fornisce un equivalente di dose pari al limite stabilito dalle normative (ad esempio 2 rem, ossia 0.02 Sv, limite previsto per i lavoratori):

$$ALI = 0.02[\text{Sv}]/e$$

dove e rappresenta il *coefficiente di dose effettivo* (Sv/g).

E' interessante notare che i danni biologici non dipendono solo dalla quantità di energia depositata, ma soprattutto dalla sua natura (*fattore di qualità*). Ad esempio l'assorbimento da parte dei tessuti viventi di 6 J per Kg di radiazione gamma porta ad un equivalente di dose pari a 6 Sv, generalmente fatale; al contrario la stessa energia depositata sotto forma di calore innalza la temperatura di circa un millesimo di grado centigrado, senza alcuna conseguenza: questo deriva dal fatto che il danno biologico si origina dalla ionizzazione.

Di seguito si riporta la tabella 4.1 con l'indicazione dei gruppi di radiotossicità a cui appartengono i vari radionuclidi [4.7].

Element	Mass numbers of the radionuclides
Group 1. Very high radiotoxicity	
Lead	210
Polonium	210
Radium	223, 225, 226, 228
Actinium	227
Thorium	227, 228, 229, 230
Protactinium	231
Uranium	230, 232, 233, 234
Neptunium	237
Plutonium	236, 238, 239, 240, 241, 242
Americium	241, 242m, 243
Curium	240, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248
Californium	248, 249, 250, 251, 252, 254
Einsteinium	254
Group 2. High radiotoxicity	
Sodium	22
Chlorine	36
Calcium	45
Scandium	46
Cobalt	60
Strontium	90
Yttrium	91
Zirconium	93
Niobium	94
Ruthenium	106
Silver	110m
Cadmium	115m
Indium	114m
Antimony	124, 125
Iodine	124, 125, 126, 131
Caesium	134
Barium	140
Cerium	144
Europium	152, 154
Terbium	160
Thulium	170
Hafnium	181
Tantalum	182
Iridium	192
Thallium	204
Lead	212
Bismuth	207, 210
Astatine	211
Radium	224
Actinium	228
Thorium	232, natural
Protactinium	230

Element	Mass numbers of the radionuclides
Uranium	236
Plutonium	244
Americium	242
Curium	241
Berkelium	249
Californium	246, 253
Einsteinium	253, 254m
Fermium	255, 256
Group 3. Medium radiotoxicity	
Berilium	7
Carbon	14
Fluorine	18
Sodium	24
Silicon	31
Phosphorus	32, 35
Sulphur	35
Chlorine	38
Argon	41
Potassium	42, 43
Calcium	47
Scandium	47, 48
Vanadium	48
Chromium	51
Manganese	52, 54
Iron	52, 55, 59
Cobalt	55, 56, 57, 58
Nickel	63, 65
Copper	65
Zinc	65, 69m
Gallium	72
Arsenic	73, 74, 76, 77
Selenium	75
Bromine	82
Krypton	74, 77, 87, 88
Rubidium	86
Strontium	83, 85, 89, 91, 92
Yttrium	90, 92, 93
Zirconium	86, 88, 89, 95, 97
Niobium	90, 93m, 95, 96
Molybdenum	90, 93, 99
Technetium	96, 97, 97m, 99
Ruthenium	97, 103, 105
Rhodium	105
Paladium	103, 109
Silver	105, 111
Cadmium	109, 115
Indium	115m
Tin	113, 125
Antimony	122

Element	Mass numbers of the radionuclides
Tellurium	121, 121m, 123m, 125m, 127m, 129m, 131, 131m, 132, 133m, 134
Iodine	120, 123, 130, 132m, 133, 135
Xenon	135
Cerium	132, 136, 137
Barium	131
Lanthanum	140
Cerium	134, 135, 137m, 139, 141, 143
Praseodymium	142, 143
Neodymium	147, 149
Promethium	147, 149
Samarium	151, 153
Europium	152m, 155
Gadolinium	153, 159
Dysprosium	165, 166
Holmium	166
Erbium	169, 171
Thulium	171
Ytterbium	175
Lutetium	177
Tungsten	181, 185, 187
Rhenium	183, 186, 188
Osmium	185, 191, 193
Iridium	190, 194
Platinum	191, 193, 197
Gold	196, 198, 199
Mercury	197, 197m, 203
Thallium	200, 201, 202
Lead	203
Bismuth	206, 212
Radon	220, 222
Thorium	226, 231, 234
Protactinium	233
Uranium	231, 237, 240
Neptunium	239, 240
Plutonium	234, 237, 245
Americium	238, 240, 244m, 244
Curium	238
Berkelium	250
Californium	244
Fermium	254
Group 4. Low radiotoxicity	
Hydrogen (Tritium)	3
Oxygen	15
Argon	37
Manganese	51, 52m, 53, 56
Cobalt	58m, 60m, 61, 62m
Nickel	59
Zink	69

Element	Mass numbers of the radionuclides
Germanium	71
Krypton	76, 79, 81, 83m, 85m, 85
Strontium	80, 81, 85m, 87m
Itrium	91m
Niobium	88, 89, 97, 98
Molybdenum	93m, 101
Technetium	96m, 99 m
Rhodium	103m
Indium	113m
Tellurium	116, 123, 127, 129, 133
Iodine	120m, 121, 128, 129, 134
Xenon	131m, 133
Ceasium	125, 127, 129, 130, 131, 134m, 135, 135m, 138
Cerium	137
Osmium	191m
Platinum	193m, 197m
Polonium	203, 205, 207
Radium	227
Uranium	235, 238, 239, natural
Plutonium	235, 243
Americium	237, 239, 245, 246m, 246
Curium	249

Tabella 4.1 – Gruppi di radiotossicità dei vari radionuclidi [4.7]