

Capitolo 5 - Gli attinidi

5.1 - Premessa

Il presente capitolo, pur non essendo strettamente legato con lo sviluppo della tesi ne costituisce un indispensabile complemento. Infatti dovendo parlare di scorie nucleari sembra opportuno, per motivi di chiarezza e completezza, riassumere le più importanti ed aggiornate notizie sul concetto di radiotossicità e sul gruppo degli attinidi che costituiscono le "*dramatis personae*" dell'intera trattazione.

5.2 - Generalità

Con questo termine si indicano i 14 elementi della tavola periodica (fig. 5.1) che vanno dal numero atomico 90 (il *torio*, scoperto da Jons Berzelius nel 1829) al 103 (il *laurenzio*, scoperto nell'Università della California (USA) nel 1961). Sono gli elementi che seguono l'*attinio* (elemento 89) e precedono il *rutherfordio* (elemento 104).

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium	Lawrencium

Figura 5.1 - Gli attinidi nella tabella periodica

Fra le principali caratteristiche :

- sono tutti radioattivi;
- si alterano facilmente esposti all'aria;
- hanno un'elevata densità;
- reagiscono con acqua bollente ed acidi per formare idrogeno;
- si combinano direttamente con molti non metalli.

La scoperta dell'attinio (Ac) avvenne ad opera di André Debierne (fig. 5.3) nel 1899 (e pochi anni dopo, indipendentemente, da F. Giesel), pochi anni dopo la scoperta della radioattività da parte di Henry Becquerel (fig. 5.2). E' un elemento 150 volte più radioattivo del radio.



Figura 5.2 - Henry Becquerel



Figura 5.3 - André Debierne

Fino agli anni '30 del secolo scorso i tre elementi che seguivano l'attinio nella tabella periodica ossia il torio, il protoattinio e l'uranio venivano posti al di sotto rispettivamente dell'afnio, del tantalio e del tungsteno.

In seguito alla scoperta del *nettunio* (nel 1940 ad opera di McMillan e Abelson a Berkeley, in seguito al bombardamento dell'uranio con i neutroni generati da un ciclotrone) si osservò che questo non presentava caratteristiche simili all'osmio come ci si poteva aspettare, bensì il suo comportamento era più simile a quello dell'uranio.

Analoga osservazione fu fatta in seguito alla scoperta del *plutonio* (i due elementi furono chiamati così in analogia ai pianeti che seguono Urano, rispettivamente Nettuno e Plutone). Successivamente anche l'*americio* ed il *curio* furono così denominati in analogia agli omologhi elementi dei lantanidi *europio* ed *gadolinio*, che avevano preso il nome dal continente dove era stato scoperto, ed in onore del chimico Gadolin.

Pu, Am e Cm furono individuati da Glenn Seaborg (fig. 5.4) che introdusse, nel 1944, il concetto di attinidi (fig. 5.5).

Gli elementi dal numero 104 (rutherfordio) in poi seguono l'ordine originario della tabella periodica degli elementi. Si prevede dunque che l'elemento 118 sia un gas nobile.



Figura 5.4 - Glenn Seaborg

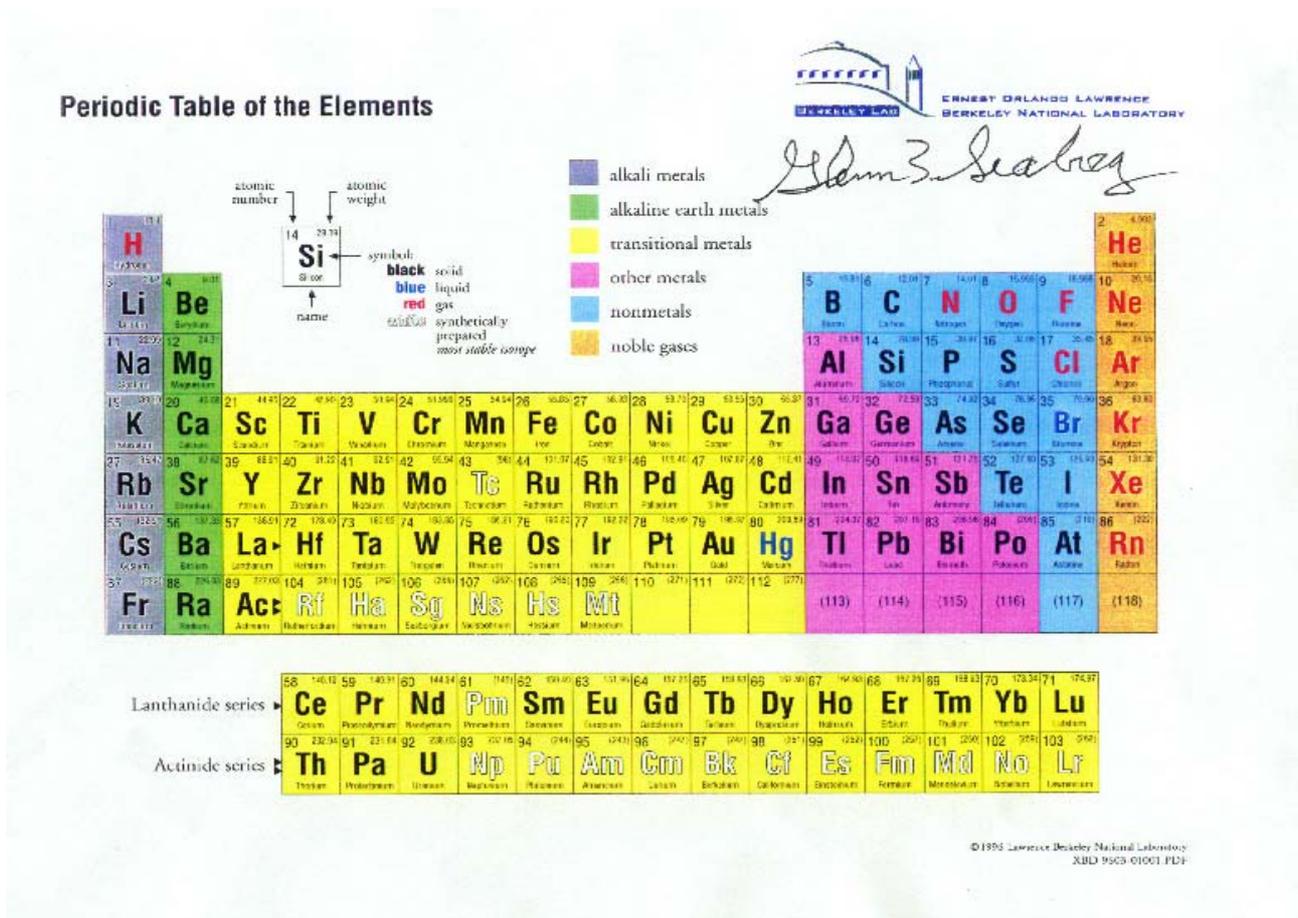


Figura 5.5 - La tabella periodica degli elementi firmata da Glenn Seaborg⁹⁸

⁹⁸ premio Nobel nel 1951 per le sue scoperte nella chimica degli elementi transuranici

Uno dei laboratori più impegnati nello studio degli attinidi è il LLNL (*Lawrence Livermore National Laboratory*). Esso riceve dal Department of Energy circa 100 milioni di dollari [5.1] all'anno per lo studio di questi elementi (fig. 5.6) . Le ricerche vengono condotte da chimici, fisici, ingegneri, metallurgisti e scienziati ambientali.



Metallurgists are probing the microstructure of actinides with a transmission electron microscope capable of near-atomic resolution.

Figura 5.6 - Centro studi per la determinazione delle proprietà degli attinidi del Lawrence Livermore National Laboratory

I campi di ricerca riguardano principalmente gli effetti ambientali del nettunio, del plutonio, dell'americio e del curio; una particolare attenzione è rivolta ai rischi della proliferazione nucleare ed allo sviluppo di misure opportune per contrastare l'inevitabile invecchiamento delle testate nucleari degli arsenali.

In merito ai rischi ambientali si può definire un **potenziale radiotossico** come la misura del possibile danno che deriverebbe dall'ingestione di una certa quantità di materiale radioattivo in termini di equivalente di dose (Sievert). Trattasi dunque non di una misura del rischio bensì semplicemente di un modo di esprimere la quantità totale di materiale tossico. Per fare questo si usa il *fattore di dose* (espresso tipicamente in Sv/Bq) che tiene conto anche del metabolismo del radionuclide, del tipo e del livello energetico delle radiazioni emesse, della radiosensibilità dei tessuti, ecc. La tabella di tali fattori viene periodicamente aggiornata dall'ICRP.

A titolo esemplificativo si riporta di seguito il grafico che mette in evidenza il sostanziale contributo degli attinidi al potenziale radiotossico totale del combustibile esausto dei LWR (fig. 5.7). Si può notare come il maggiore contributo spetti al plutonio (dopo 300 anni contribuisce all'80%), e di seguito agli attinidi minori (Np, Am e Cm, così chiamati perché negli LWR se ne forma grosso

modo 1 g ogni 10 di Pu) sebbene il contributo di questi sia 10 volte inferiore a quello del plutonio (ma 1000 volte superiore a quello dei prodotti di fissione).

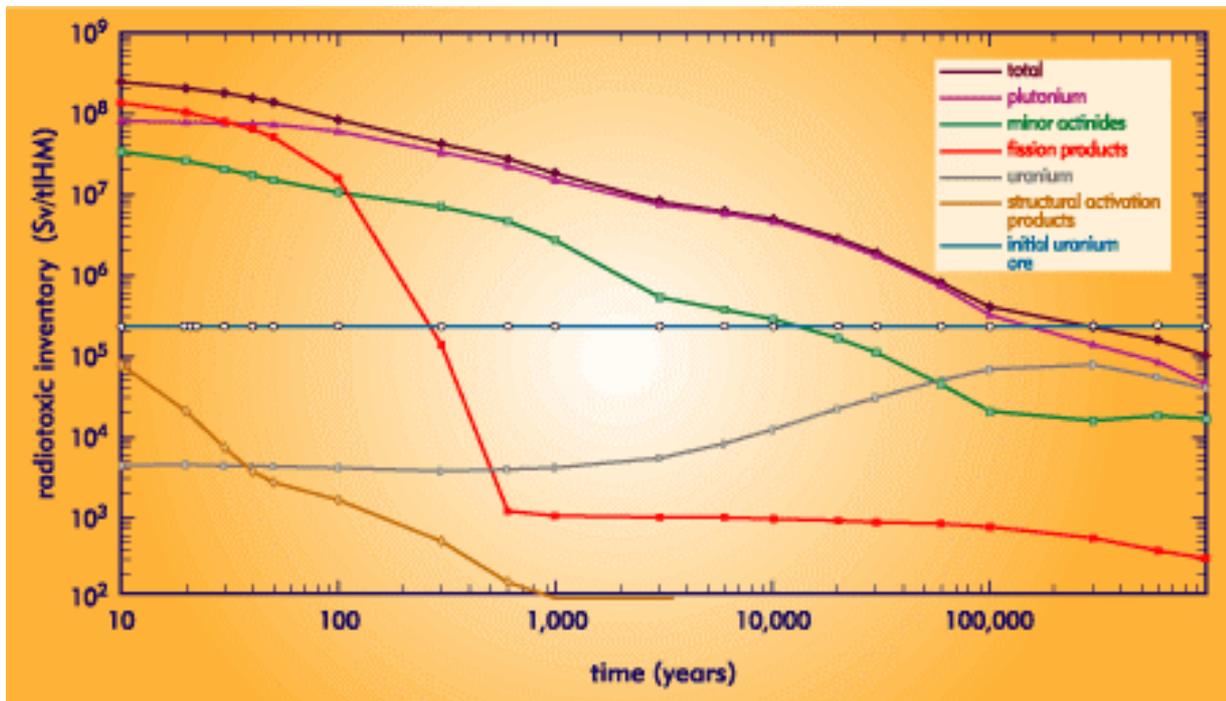


Figura 5.7 - Evoluzione temporale dell'inventario radiotossico per i materiali di interesse nella tecnologia dei reattori LWR [4.2]

Nei successivi paragrafi sono illustrate le caratteristiche degli attinidi di interesse nella tecnologia dei reattori HTR.

5.3 - Il torio

Il torio è un metallo radioattivo presente in piccole concentrazioni sulla crosta terrestre (circa 10 parti per milione). E' circa tre volte più abbondante dell'uranio, ovvero come il piombo o il molibdeno. Nella sua forma metallica appare bianco argenteo (fig. 5.8) di densità pari circa a quella del piombo. In natura praticamente tutto il torio è rappresentato dall'isotopo 232 (tab. 5.1). E' soffice, duttile, e piroforico se in polvere.



Figura 5.8 - Pasticca di torio

Dei 26 isotopi conosciuti solo 12 hanno periodo di dimezzamento superiore al secondo, e di questi solo 3 sono di interesse tecnologico.

Radioactive Properties of Key Thorium Isotopes and Associated Radionuclides							
Isotope	Half-Life	Natural Abundance (%)	Specific Activity (Ci/g)	Decay Mode	Radiation Energy (MeV)		
					Alpha (α)	Beta (β)	Gamma (γ)
Th-232	14 billion yr	>99	0.00000011	α	4.0	0.012	0.0013
Th-230	77,000 yr	<<1	0.020	α	4.7	0.015	0.0016
Th-229	7,300 yr	<<1	0.22	α	4.9	0.12	0.096
Ra-225	15 days		40,000	β	-	0.11	0.014
Ac-225	10 days		59,000	α	5.8	0.022	0.018
Fr-221	4.8 min		180 million	α	6.3	0.010	0.031
At-217	0.032 sec		1.6 trillion	α	7.1	<	<
Bi-213	46 min		20 million	α, β	0.13	0.44	0.13
Po-213 (98%)	0.0000042 sec		13,000 trillion	α	8.4	-	-
Tl-209 (2%)	2.2 min		410 million	β	-	0.69	2.0
Pb-209	3.3 hr		4.7 million	β	-	0.20	-

Ci = curie, g = gram, and MeV = million electron volts; a dash means the entry is not applicable, and a "<" means the radiation energy is less than 0.001 MeV. (See the companion fact sheet on Radioactive Properties, Internal Distribution, and Risk Coefficients for explanation of terms and interpretation of radiation energies.) Bismuth-213 decays by both emitting an alpha particle (2%) and a beta particle (98%). Certain properties of additional radionuclides are included here because they accompany the thorium decays. Values are given to two significant figures.

Tabella 5.1 - Elementi presenti nei minerali di torio e loro proprietà [5.2]

Gli isotopi del torio 232 e 230 sono presenti nel suolo e nelle miniere in equilibrio secolare, rispettivamente, con il radio 228 e 226.

Il torio si trova distribuito un po' ovunque, ma i minerali di maggiore interesse commerciale sono le sabbie di *monazite* (fig. 5.9) diffuse negli USA, in Brasile, in India, in



Figura 5.9 - Cristallo di monazite

Australia ed in Sud Africa. La concentrazione dell'ossido di torio nella *monazite* varia fra il 3 ed il 10%. Si trova anche nella *torite* e nella *torianite*.

Il suo uso principale si ha nel mantello di Welsbach nelle lanterne portatili a gas. Questi mantelli contengono ossido di torio con all'incirca l'1% di ossido di cerio, e brillano quando scaldati dalla fiamma. Il torio è un importante elemento legante per il magnesio e viene usato per rivestire i fili di tungsteno nelle attrezzature elettroniche. E' usato per ceramiche e vetri quale additivo, nonché nelle saldature.

Nel 1997 il prezzo base dell'ossido di torio era fissato a 65.55 \$/Kg; tale prezzo saliva a 82.50 \$/Kg per ossido con purezza pari al 99.9%, 107.25 \$/Kg per quello al 99.99%.

In natura il torio si trova come ossido, fosfato o silicato. Aderisce strettamente alle particelle del suolo ed è poco mobile nei suoli argillosi. La concentrazione nelle piante è circa lo 0.42% di quella nel suolo. Non ci sono indicazioni di presenza nelle catene alimentari. Data la sua bassa solubilità non viene generalmente considerato un contaminante delle acque.

Può essere assorbito dal corpo sia attraverso l'alimentazione, l'acqua o l'aria. Buona parte del torio inspirato o ingerito viene escreto in pochi giorni; solo un piccolo quantitativo entra nel circolo sanguigno. L'assorbimento gastrointestinale rappresenta la principale via di assorbimento da parte della popolazione. Tra lo 0.02 e lo 0.05 % del quantitativo ingerito finisce nel circolo sanguigno attraverso l'intestino. Di questo il 70% si deposita nelle ossa con periodo di dimezzamento biologico di 22 anni, il 4% nel fegato con periodo di dimezzamento di 700 giorni, il 16% nel resto dei tessuti con lo stesso periodo di dimezzamento, mentre il restante 10% viene escreto.

Rappresenta un pericolo solo se incorporato. L'esposizione gamma esterna non costituisce un pericolo. Viene assorbito più facilmente se inalato. Il pericolo maggiore è costituito dal tumore alle ossa.

5.4 - Il plutonio

Il plutonio allo stato puro è un metallo molto pesante (circa il doppio del piombo), di colore argenteo, radioattivo. Rappresenta per certi aspetti il sogno dei fisici e l'incubo degli ingegneri. Cambia facilmente densità del 25%. Può essere fragile come il vetro o malleabile come l'alluminio. Quando solidifica si espande, più dell'acqua. Esistono sei stati allotropici (fasi) del plutonio; a temperatura ambiente si trova nella fase α ed è fragile. E' piroforico, si incendia a 500°C. Ne esistono diversi isotopi (tab. 5.2), tutti prodotti dalle attività umane degli ultimi 60 anni. Tutti gli isotopi decadono alfa, eccetto il Pu^{241} che decade beta, formando l'isotopo 241 dell'americio (assai più radiotossico del precursore), con periodo di dimezzamento di 430 anni.

Radioactive Properties of Key Plutonium Isotopes						
Isotope	Half-Life (yr)	Specific Activity (Ci/g)	Decay Mode	Radiation Energy (MeV)		
				Alpha (α)	Beta (β)	Gamma (γ)
Pu-238	88	17	α	5.5	0.011	0.0018
Pu-239	24,000	0.063	α	5.1	0.0067	<
Pu-240	6,500	0.23	α	5.2	0.011	0.0017
Pu-241	14	100	β	<	0.0052	<
Pu-242	380,000	0.0040	α	4.9	0.0087	0.0014
Pu-244	83,000,000	0.000018	α	4.6	0.0071	0.0012

Ci = curie, g = gram, and MeV = million electron volts; "<" means the radiation energy is less than 0.001 MeV. (See the companion fact sheet on Radioactive Properties, Internal Distribution, and Risk Coefficients for an explanation of terms and interpretation of radiation energies.) Values are given to two significant figures.

Tabella 5.2 - Isotopi del plutonio e loro proprietà [5.2]

La massima attività del Am^{241} equivale al 3% di quella del Pu^{241} , e si ha dopo 73 anni. Piccole percentuali degli isotopi del plutonio decadono per fissione spontanea.

Notevoli quantità di plutonio sono state prodotte, con il reattore di Hanford, a partire dagli anni '40 nel quadro del progetto Manhattan per la costruzione della prima bomba atomica. La produzione è continuata durante la guerra fredda. All'epoca, per motivi di segretezza, il plutonio veniva indicato come *elemento 49*, 4 dal numero atomico 94 e 9 dall'ultima cifra del numero di massa dell'isotopo fissile 239.

Si noti che la fissione del plutonio fornisce almeno un terzo dell'energia prodotta nei reattori nucleari caricati con solo uranio.

L'isotopo 238 del plutonio (intenso emettitore alfa) viene utilizzato quale sorgente di energia (fig. 5.10) nelle missioni spaziali interplanetarie (con una potenza iniziale di 0.558 W/g).



Figura 5.10 - Pu^{238} usato come sorgente di energia

Gli Stati Uniti hanno recuperato dal riprocessamento o acquisito fra il 1944 ed il 1994 circa 110000 Kg di plutonio. Di questa quantità l'80% è di grado militare, ovvero principalmente Pu^{239} . Questo è stato prodotto nei siti di Hanford (fig. 5.11, 5.12 e 5.13) e Savannah River, mentre i componenti delle bombe sono stati assemblati nell'impianto di Rocky Flats. Il plutonio in eccesso viene conservato nell'impianto *Pantex* (Amarillo, Texas).

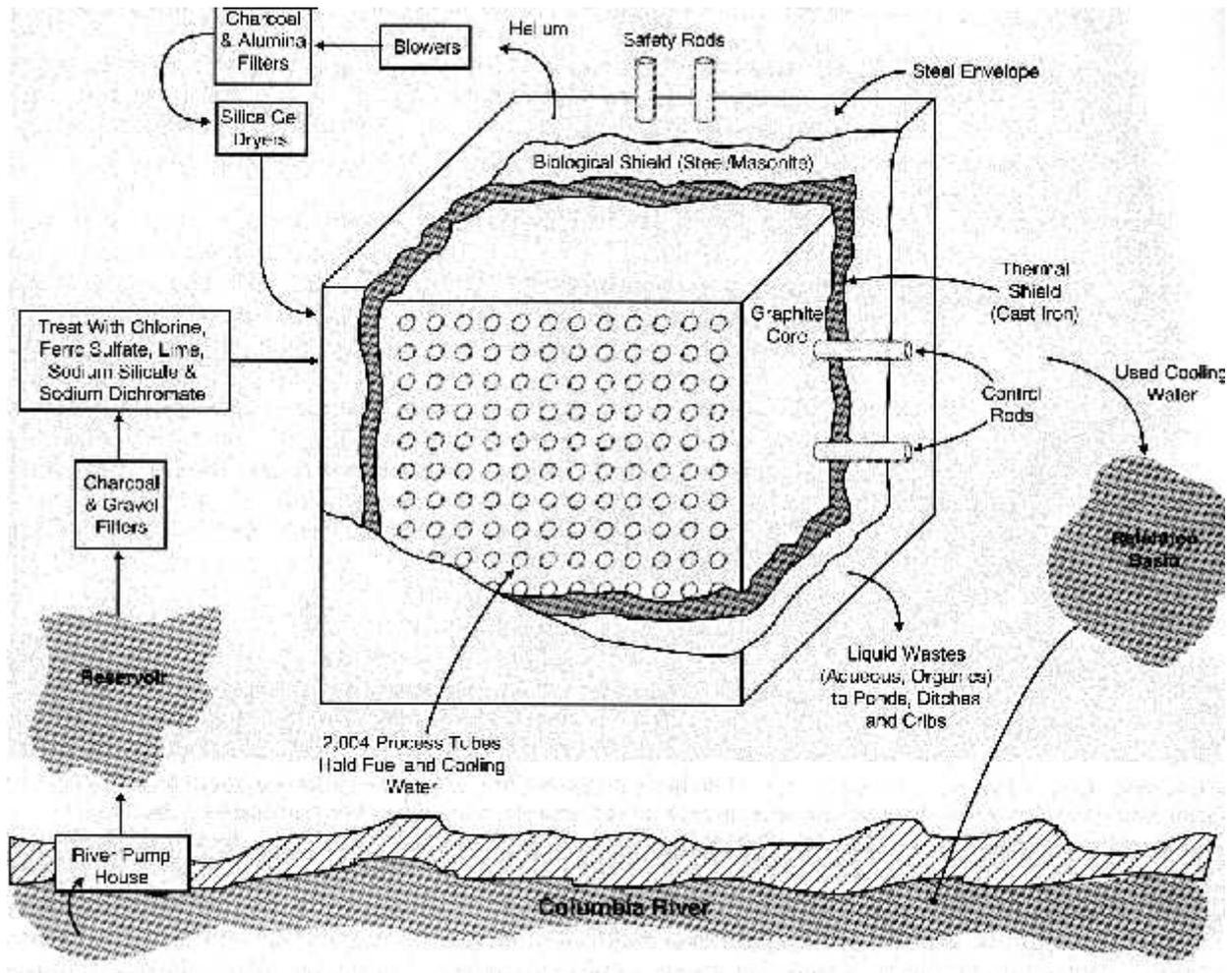


Figura 5.11 - Schema del reattore di Hanford

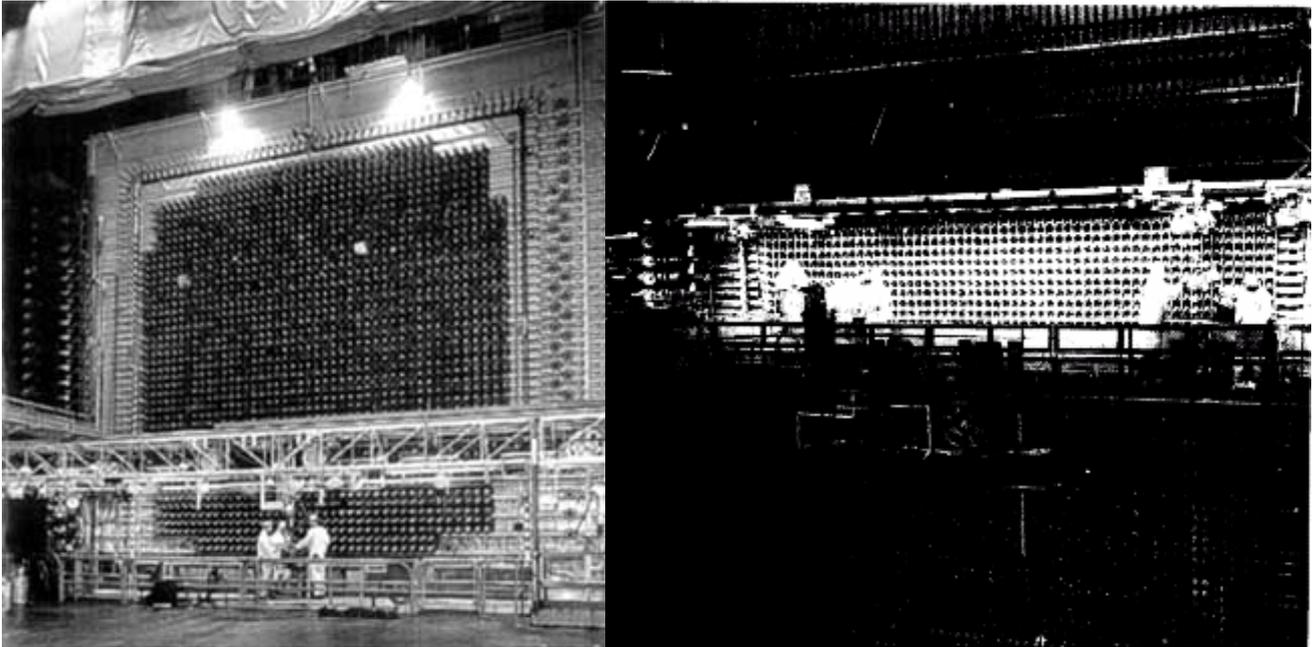


Figura 5.12 - Viste del reattore di Hanford



Figura 5.13 - Sala controllo del reattore di Hanford

Nel settembre 1998 i prezzi pubblicati dalla *Divisione Isotopi del ORNL* erano: 8.25 \$/mg per il Pu^{238} (puro al 97%), 4.65 \$/mg per il Pu^{239} (99,99%), 5.45 \$/mg per il Pu^{240} (95%), 14.70 \$/mg per il Pu^{241} (>93%), 19.75 \$/mg per il Pu^{242} .

I test nucleari hanno generato la massima parte del plutonio presente nell'ambiente. Durante tali test ne sono stati rilasciati circa 10000 Kg (e circa 100 Kg di americio). I livelli medi di contaminazione da plutonio sulla superficie del suolo si aggirano fra 0.01 e 0.1 pCi/g.

Al presente l'ingestione di Pu 239 e 240 da parte dell'italiano medio è di 0.04-0.07 Bq/anno (1-2 pCi/anno).

La forma più diffusa nell'ambiente è l'ossido di plutonio PuO_2 (fig. 5.14). Il plutonio è decisamente insolubile; il suo ossido è meno solubile in acqua della sabbia ordinaria (quarzo). Aderisce alle particelle del suolo dove tende a rimanere nei primi centimetri allo stato di ossido.



Figura 5.14 - Polvere di PuO_2

Nei sistemi acquatici tende ad aderire fortemente ai sedimenti. Tipicamente rimane in soluzione nell'acqua interstiziale una concentrazione di plutonio 2000 volte minore di quella presente nei sedimenti o nel suolo. Una parte potrebbe anche divenire solubile attraverso processi chimici o biologici. Nonostante possa concentrarsi nei sistemi acquatici, dai dati non risulta possa entrare nella catena alimentare. Il fitoplancton sospeso in acqua, gli animali che si nutrono filtrandola e quelli bentonici presentano accumulo di Pu.

Quando il plutonio viene inalato, a seconda della sua forma, una frazione significativa può muoversi dai polmoni, attraverso il sangue, verso gli altri organi. Poco ne viene assorbito attraverso il tratto gastrointestinale (circa lo 0.05%) in seguito ad ingestione, e poco anche attraverso la cute. La quota parte che entra nel circolo sanguigno si distribuisce in parti uguali nel fegato e nello scheletro, con periodi di dimezzamento biologici, rispettivamente, di 20 e 50 anni. Il quantitativo di plutonio assorbito dipende in generale dall'età del soggetto. Il plutonio nello scheletro si distribuisce sulle superfici corticali e trabecolari delle ossa e lentamente si ridistribuisce nel volume di quest'ultime.

Il plutonio costituisce un pericolo solo per contaminazione (fig. 5.15), ma non per irraggiamento. Tutti gli isotopi, infatti, sono α emettitori (eccetto l'isotopo 241 che emette radiazioni β di bassa energia). Una radiazione gamma minima è associata con tutti questi decadimenti. La preoccupazione principale riguarda l'assorbimento aereo del plutonio. Studi sulle cavie da laboratorio hanno dimostrato che gli organi bersaglio sono i polmoni con i linfonodi associati, il fegato, i reni e lo scheletro; mancano però studi epidemiologici sugli esseri umani. Il 4% delle disintegrazioni emettono raggi X da processi di conversione interna, con energie comprese fra 13 e 20 KeV rilevabili in ferite cutanee e polmoni contaminati.



Plutonium metal. Plutonium isotopes are primarily alpha-emitters so they pose little risk outside the body. Here the plastic bag, gloves, and outer (dead) layer of skin would each alone stop the emitted alpha particles from getting into the body.

Figura 5.15 - Plutonio in forma metallica

Appena 1 μg di plutonio da origine a 2000 decadimenti al secondo. La dose ammissibile nella vita di un uomo ammonta a 0.65 μg . Da notare inoltre che la convinzione diffusa del fatto che il

plutonio sia la “sostanza più tossica che si conosca” rappresenta un mito che non ha riscontri scientifici. Il plutonio infatti pone dei rischi per la salute ma non immediati come altri agenti; è considerato meno tossico delle tossine dei batteri del botulino, dei batteri del tetano e dell’antrace.

Negli USA sono fondamentalmente tre gli istituti che studiano il plutonio delle armi nucleari (ed in particolare il suo invecchiamento): Sandia, Lawrence Livermore e Los Alamos.

La sua instabilità può essere controllata con aggiunte di gallio (fig. 5.17 e 5.18) o alluminio. Rilevante è il *radiation damage* dovuto al decadimento radioattivo (fig. 5.16) e l’accumulo interstiziale di elio (in un Kg di Pu^{239} se ne accumulano quasi 0.2 litri in 50 anni). Presenta elevati problemi di criticità, per cui il suo maneggio deve essere sottoposto ad accurati controlli.

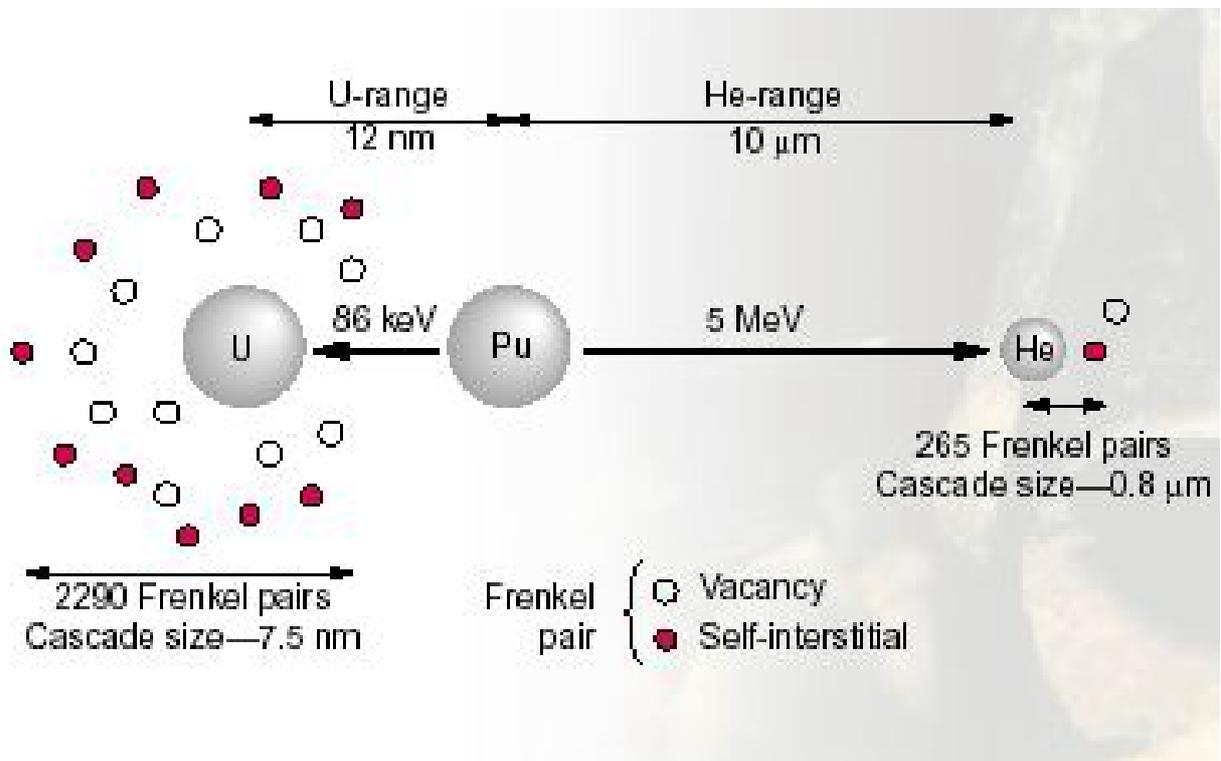


Figura 5.16 - Formazione dei difetti in seguito al decadimento del plutonio [5.3]

Un chilogrammo di Pu^{239} fissionato sviluppa un' energia pari a 8.5×10^{13} J (2.36×10^7 KWh, o 984 MWd).

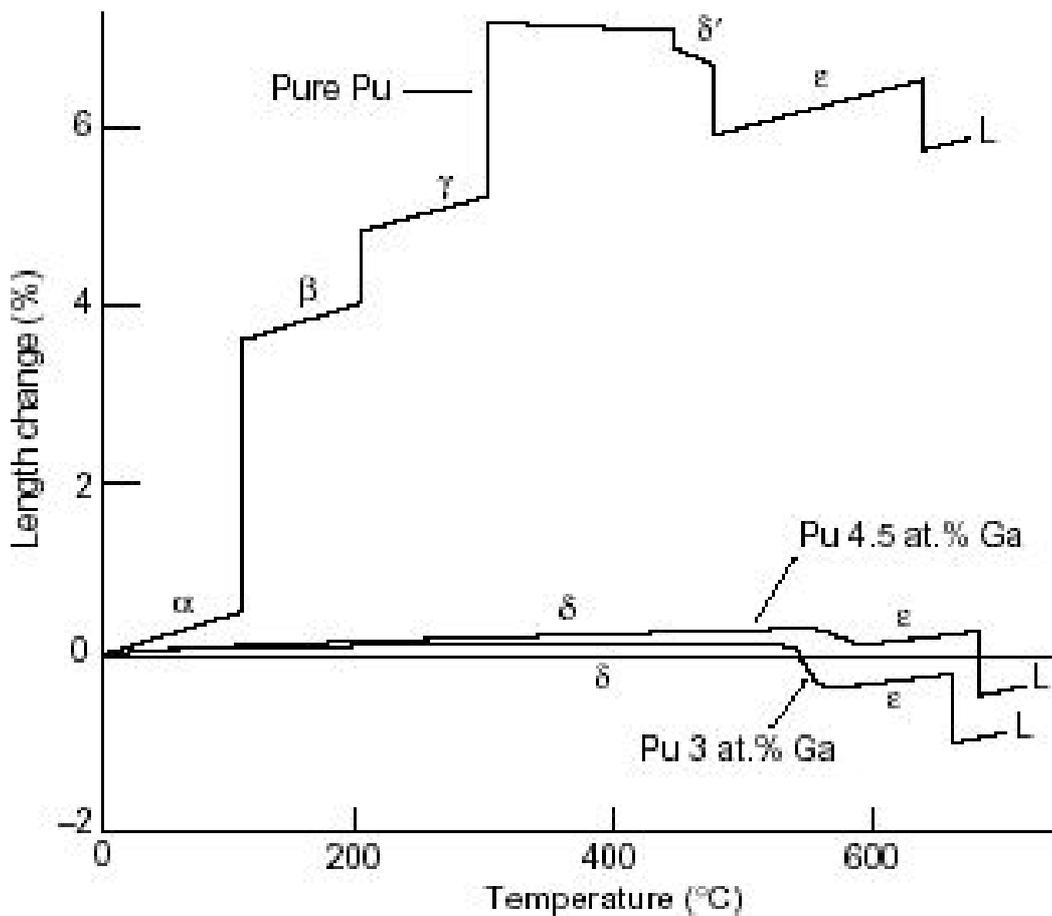
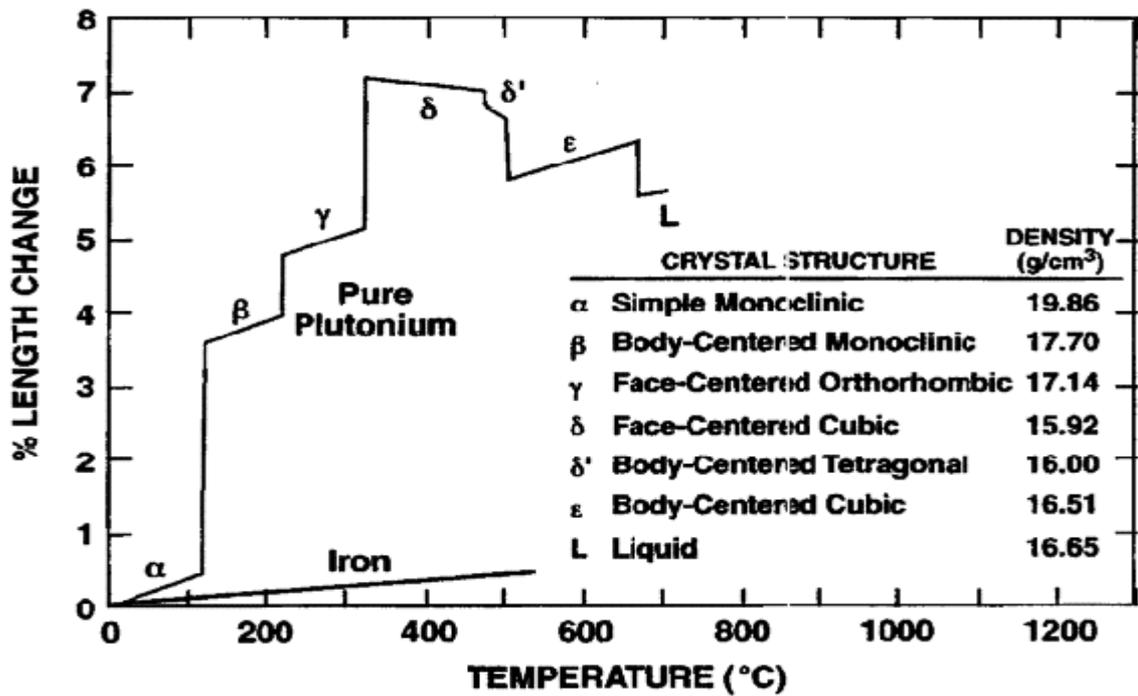


Figura 5.17 - Benefici ottenuti grazie all'aggiunta di piccole percentuali di gallio [5.3]



Figura 5.18 - Plutonio grezzo (in alto) e lingotto lavorato additivato con gallio (in basso) [5.3]

5.5 - L'americio

L'americio è un metallo bianco argenteo, malleabile che si ossida lentamente se esposto all'aria secca a temperatura ambiente. Non esiste in natura, bensì viene creato artificialmente per catture neutroniche successive da parte degli isotopi del plutonio. Sono conosciuti 16 isotopi dell'americio, tutti radioattivi. L'isotopo 241 fu il primo ad essere prodotto nel 1944 all'Università di Chicago.

Radioactive Properties of Key Americium Isotopes and Associated Radionuclides						
Isotope	Half-Life	Specific Activity (Ci/g)	Decay Mode	Radiation Energy (MeV)		
				Alpha (α)	Beta (β)	Gamma (γ)
Am-241	430 yr	3.5	α	5.5	0.052	0.033
Am-242m	150 yr	9.8	IT	0.025	0.044	0.0051
<i>Am-242</i>	<i>16 hr</i>	<i>820,000</i>	<i>β, EC</i>	-	<i>0.18</i>	<i>0.018</i>
Am-243	7,400 yr	0.20	α	5.3	0.022	0.055
<i>Np-239</i>	<i>2.4 days</i>	<i>230,000</i>	<i>β</i>	-	<i>0.26</i>	<i>0.17</i>

IT = isomeric transition, EC = electron capture, Ci = curie, g = gram, and MeV = million electron volts; a dash means that the entry is not applicable. (See the companion fact sheet on Radioactive Properties, Internal Distribution, and Risk Coefficients for an explanation of terms and interpretation of radiation energies.) Americium-242 decays by two means: emitting a beta particle (83%) and electron capture (17%). Certain properties of americium-242 and neptunium-239 are included here because these radionuclides accompany the americium decays. Values are given to two significant figures.

Tabella 5.3 - Proprietà dell'americio e di alcuni prodotti presenti nella sua catena di decadimento [5.2]

Solo 3 hanno periodi di dimezzamento sufficientemente lunghi da essere ritenuti di interesse tecnologico: il 241, il 242-m, ed il 243 (da 150 a 7400 anni, mentre gli altri sono inferiori al giorno). L'isotopo più comune è il 241, quale prodotto di decadimento del plutonio 241. Quest'ultimo viene formato infatti dalla cattura da parte del plutonio 239 di due neutroni con successivo decadimento con periodo di dimezzamento di 14 anni.

Il suo uso più comune si aveva nei rivelatori di fumo (fig. 5.19). Tali rivelatori basano il loro funzionamento sulla proprietà delle particelle alfa di ionizzare l'aria contenuta fra due elettrodi consentendo il passaggio di una corrente elettrica. Quando le particelle del fumo penetrano all'interno del rivelatore interrompono il flusso di corrente, facendo scattare l'allarme.



Figura 5.19 - Rivelatore di fumo

Viene usato anche come sorgente per radiografie gamma, o anche come materiale bersaglio per la formazione di nuclidi più pesanti. Una sorgente di neutroni, costituita da Am^{241} e berillio (reazione α -n) viene usata per analisi non distruttive (radiografia neutronica).

Nel settembre del 1998 la *Divisione Isotopi del ORNL* ha fissato il prezzo di un grammo di Am^{241} a 728 \$, e 180.25 \$ per un milligrammo di Am^{243} .

L'ossido è la forma più diffusa nell'ambiente. Il livello medio di americio nel suolo è dell'ordine di 0.01 picocurie per grammo (pCi/g). L'americio è tipicamente insolubile, anche se può diventarlo grazie a processi chimici o biologici. L'americio può venire incorporato sia mangiando cibi contaminati, sia bevendo l'acqua contaminata, sia respirandolo con l'aria. L'assorbimento gastrointestinale è la via più probabile di contaminazione per la popolazione. In seguito ad ingestione o inalazione tutto l'americio viene escreto entro pochi giorni senza entrare nel circolo sanguigno; solo lo 0.05% finisce nel sangue. Di questo parti uguali si distribuiscono nel fegato e nello scheletro, con periodi di dimezzamento biologici, rispettivamente, di 20 e 50 anni. Il quantitativo depositato dipende dall'età del soggetto e cresce con quest'ultima. L'americio, come il plutonio, si distribuisce sulle superfici corticale e trabecolare delle ossa, ridistribuendosi nel volume successivamente in maniera lenta.

Generalmente l'americio costituisce un rischio solo se presente all'interno del corpo, anche se c'è un piccolo rischio associato alle emissioni di raggi gamma da parte del Np^{239} , prodotto di decadimento dell' Am^{243} . Le principali vie di esposizione riguardano il consumo di cibi (o acqua) e l'inalazione di polveri contaminati. Le preoccupazioni principali riguardano la possibile insorgenza di tumori del fegato o delle ossa.

5.6 – Il curio

Il curio è un metallo duro, fragile, argenteo che si ossida lentamente se esposto all'aria secca a temperatura ambiente. Non esiste in natura, ma viene creato nei reattori nucleari per catture neutroniche successive da parte degli isotopi del plutonio e dell'americio. Se ne conoscono 16 isotopi, tutti radioattivi. Fu creato per la prima volta nel 1944 bombardando il Pu^{239} con particelle alfa col ciclotrone dell'Università della California, a Berkeley. Fu isolato in quantitativo visibile per la prima volta come idrossido nel 1947, e fu chiamato così in onore di Pierre e Marie Curie, pionieri nello studio della radioattività (fig. 5.20). Otto dei sedici isotopi conosciuti hanno periodi di dimezzamento superiori ad un mese. Il curio generalmente decade in plutonio attraverso l'emissione di una particella alfa; la radiazione gamma è associata con alcuni di questi decadimenti (tab. 5.4).



Figura 5.20 - I coniugi Curie

Radioactive Properties of Key Curium Isotopes and Associated Radionuclides						
Isotope	Half-Life	Specific Activity (Ci/g)	Decay Mode	Radiation Energy (MeV)		
				Alpha (α)	Beta (β)	Gamma (γ)
Cm-242	160 days	3,400	α	6.1	0.010	0.0018
Cm-243	29 yr	52	α	5.8	0.14	0.13
Cm-244	18 yr	82	α	5.8	0.086	0.0017
Cm-245	8,500 yr	0.17	α	5.4	0.065	0.096
Cm-246	4,700 yr	0.31	α	5.4	0.0080	0.0015
Cm-247	16 million yr	0.000094	α	4.9	0.021	0.32
Cm-248	340,000 yr	0.0043	α	4.7	0.0060	0.0012
Cm-250	6,900 yr	0.21	α, β	1.3	0.0016	-
<i>Pu-246 (25%)</i>	<i>11 days</i>	<i>49,000</i>	β	-	<i>0.13</i>	<i>0.14</i>
<i>Bk-250 (14%)</i>	<i>3.2 hr</i>	<i>3.9 million</i>	β	-	<i>0.29</i>	<i>0.89</i>
<i>Am-246 (25%)</i>	<i>39 min</i>	<i>20 million</i>	β	-	<i>0.66</i>	<i>0.70</i>

Ci = curie, g = gram, and MeV = million electron volts; a dash indicates the entry is not applicable. (See the companion fact sheet on Radioactive Properties, Internal Distribution, and Risk Coefficients for an explanation of terms and interpretation of radiation energies.) About 8% of the decays of curium-248 are by spontaneous fission (SF), with alpha-particle decay occurring 92% of the time. 61% of the curium-250 decays are by SF, with alpha-particle emission (25%) and beta-particle emission (14%) accounting for the remainder. Certain properties of plutonium-246, berkelium-250, and americium-246 are included here because these radionuclides accompany the curium-250 decays. Values are given to two significant figures.

Tabella 5.4 - Proprietà del curio e di alcuni prodotti presenti nella sua catena di decadimento [5.2]

Nonostante non sia mai stata rilevata la presenza del curio in natura piccolissime quantità possono esistere in alcuni giacimenti di uranio.

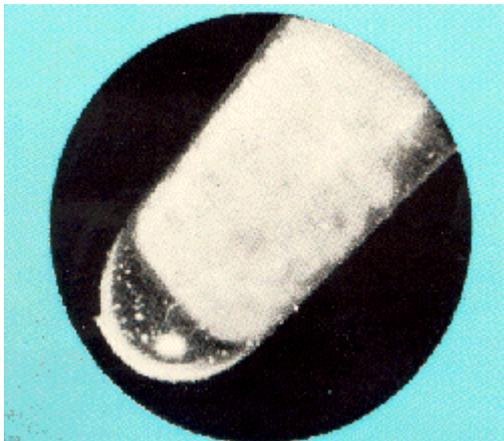


Figura 5.21 - Idrossido di curio

Il curio ha scarsi usi al di fuori delle attività di ricerca: è disponibile solo in scarsissime quantità (fig. 5.21). Gli isotopi del curio possono venire utilizzati senza pesanti schermature per l'alimentazione di pile termoelettriche delle missioni spaziali. Il Cm^{242} è stato usato in generatori di energia isotopici dal momento che fornisce circa 3 W/g (viene venduto a circa 100 \$/mg). E' stato usato anche nelle missioni lunari per bombardare il suolo con particelle alfa per la determinazione dei materiali che lo

compongono. Le strumentazioni hanno analizzato le traiettorie delle particelle deviate dalla superficie del suolo lunare, determinando che la composizione di quest'ultimo è simile al basalto, una roccia vulcanica comune sulla Terra. L'alta attività specifica del Cm^{242} assieme al basso rischio esterno hanno reso tale isotopo ideale per questo tipo di applicazione.

I test nucleari nell'atmosfera hanno generato le maggiori quantità di curio presenti nell'ambiente. L'ossido è la forma più diffusa. E' tipicamente assai insolubile ed aderisce alle particelle del suolo. Il curio può essere incorporato sia consumando cibi o acqua contaminati sia respirando l'aria. L'assorbimento gastrointestinale è la via più probabile di contaminazione per la popolazione. In seguito all'ingestione la maggior parte viene escreta in pochi giorni senza entrare nel circolo sanguigno; solo lo 0.05% entra nel sangue. Di questo il 45% si deposita nel fegato con periodo di dimezzamento biologico di 20 anni, ed il 45% si deposita sulle ossa con periodo di dimezzamento di 50 anni.

Il curio rappresenta un rischio solo se incorporato all'interno del corpo; tuttavia c'è un piccolo rischio esterno associato agli isotopi dispari (243, 245 e 247). Le principali vie di esposizione riguardano l'ingestione di cibo (o acqua) o l'inalazione di aria contaminata. La maggiore preoccupazione sanitaria concerne l'insorgenza di tumori alle ossa originati dalle radiazioni ionizzanti emesse dagli isotopi del curio depositati sulla superficie di quest'ultime.