

Considerazioni sui Rischi di Proliferazione Nucleare

Vincenzo Romanello

Novembre 2006

NOTA TECNICA

Indice

2 - Caratteristiche del Plutonio di Grado Militare.....	13
2-1 Introduzione.....	13
2-2 Caratteristiche Generali del Plutonio.....	14
2-3 Cenni di Metallurgia del Plutonio.....	15
2-4 Tossicità del Plutonio	16
2-5 Produzione del Plutonio.....	17
2-6 Plutonio di Grado Militare.....	18
Appendice A: considerazioni progettuali sulle ultracentrifughe per l'arricchimento dell'uranio	19
Bibliografia	21

1 - Considerazioni Storiche

1.1- I test nucleari indiani

Il 7 settembre 1972 il primo ministro indiano *Indira Gandhi* concesse l'autorizzazione agli scienziati del *BARC* (Bhabha Atomic Research Centre – fig. 1) alla costruzione del primo ordigno nucleare indiano, ufficialmente nell'ambito di ricerche nel campo delle esplosioni nucleari per applicazioni pacifiche. Tale test, effettuato il 18 maggio 1974, venne chiamato *Smiling Buddha*. Trattatasi di un ordigno del tipo 'Fat Man', seppur meno sofisticato. Il progetto impiegò più di 75 tecnici, fra cui il capo del team Raja Ramanna.



Fig. 1 - Bhabha Atomic Research Centre

Il dispositivo utilizzava un sistema di implosione con esplosivi sviluppato al DRDO (Defence Research and Development Organisation) Terminal Ballistics Research Laboratory (TBRL) di Chandigarh, e si basava sul design della bomba americana della seconda guerra mondiale. Il sistema era però più semplice e meno sofisticato. I 6 Kg di plutonio che componevano il pit venivano dal reattore CIRUS¹ (Canada India Research U.S.) del BARC. La sorgente di neutroni era costituita del tipo polonio-berillio (nome in codice 'fiore'). La bomba, una volta assemblata pesava 1400 kg.

Il test fu condotto a Pokhran, nel deserto del Thar, alle 8:05 AM. Trattavasi di un test sotterraneo condotto a -107 metri di profondità.

Il potenziale esplosivo fu di 12 kiloton secondo le fonti ufficiali, ma fonti esterne hanno parlato di un range compreso fra 2 e 20 kiloton. La stima più probabile, in base a dati sismici, parla di 8 kiloton.

¹ Trattavasi di un reattore di ricerca, fornito dal Canada nel 1954 ma che utilizzava l'acqua pesante fornita dagli U.S.A. Era uno dei più antichi ed assomigliava al reattore canadese NRX. La potenza era di 40 MWt, ed utilizzava uranio naturale quale combustibile ed acqua pesante come moderatore. Può produrre fino a 10.5 Kg all'anno di plutonio. Verrà chiuso nel 2010.

Si è riportato che il cratere lasciato dal test presentasse un diametro di 47 metri ed una profondità di 10. Foto recenti di satelliti commerciali (tipo l'Ikonos il 3 febbraio 2000) hanno mostrato crateri dal diametro apparente di 60 metri, dimostrando che il cratere ha subito delle modificazioni (fig.2).

Per una analisi dettagliata dei dati sismografici delle esplosioni indiane si veda [1].



Fig.2 – Cratere del test Smiling Buddha

Si ritiene che l'India oggi disponga del seguente arsenale:

- bombe a fissione al plutonio da 12 kt
- bombe a fissione potenziate a fusione da 15-20 kt
- bombe al plutonio a basso potenziale da 0.1 a 1 kt
- progetti per bombe termonucleari da 200-300 kt.

Si ritiene che lo stock indiano di plutonio di grado militare ammonti a circa 300 kg, sufficiente per la costruzione di 45-95 ordigni.

A questo aggiungasi le potenzialità missilistiche dell'India a corto e medio raggio (missili *Prithvi*, carico da 500 kg e range di 250 km, e *Agni-II*, carico da 1000 kg e range di 2500 km). Per ulteriori dettagli sull'arsenale indiano si veda [2].

1.2- Il programma nucleare pakistano

Il Pakistan non ha sottoscritto il *Trattato di Non Proliferazione Nucleare*. Non è noto quando questo paese abbia iniziato a sviluppare il proprio programma nucleare, ma si ritiene ciò debba essere avvenuto intorno agli anni '60. Il Pakistan ha condotto i suoi primi 5 test il 28 maggio 1998. Il fondatore del programma nucleare pakistano è considerato *Zulfikar Ali Bhutto*², che lo promosse subito dopo la perdita del Pakistan dell'Est in seguito alla guerra del 1971 con l'India. In seguito al test nucleare indiano svoltosi nel 1974 infatti (*Smiling Buddha*), Bhutto reagì duramente e dichiarò che il Pakistan doveva disporre di un proprio "deterrente nucleare"³. Fu incaricato Abdul Qadeer Khan (vedi oltre), ingegnere metallurgico che lavorava per una ditta olandese, che si impossessò dei progetti della URENCO per la costruzione delle ultracentrifughe. Lo sviluppo delle armi pakistane ha luogo a *Kahuta* e *Joharabad*. Si stima che l'impianto di Kahuta disponga di 3000 centrifughe per l'arricchimento dell'uranio. Nel 1990 il Pakistan ha iniziato a produrre anche plutonio di grado militare. Con l'aiuto della tecnologia cinese questo paese ha costruito il piccolo reattore sperimentale *Khusab*, da 40 MWt, che è divenuto operativo nel 1998. Si stima tale reattore possa produrre circa 8-10 kg di plutonio all'anno, col quale si può costruire almeno una testata nucleare. Il reattore può produrre anche il tritio (anche se le armi moderne utilizzano direttamente il Li⁶). L'utilizzo del plutonio dovrebbe rendere gli ordigni più leggeri e quindi più facilmente trasportabili per mezzo di missili balistici.

Si stima il Pakistan disponga fra 35 e 90 testate nucleari ad uranio altamente arricchito, con un valore mediano pari a 60; si pensa ad un design ad implosione con 15-20 kg di materiale per testata. Si pensa inoltre sia stato prodotto del plutonio di grado militare, sufficiente a realizzare 3-5 testate/anno (con 5 kg di plutonio a testata). Islamabad dichiara di tenere i nuclei fissili separati dagli altri componenti esplosivi non nucleari, ma che possono essere assemblati in tempi molto brevi. La Repubblica Popolare Cinese ha giocato un ruolo chiave nell'assistenza al Pakistan in merito ai suoi programmi nucleari (specialmente in seguito alle restrizioni internazionali imposte al traffico verso questo paese di materiali nucleari).

² Zulfikar Ali Bhutto fu un uomo politico pakistano, Presidente dal 1971 al 1973, e Primo Ministro dal 1973 al 1977. Il suo governo fu autoritario e discusso. Venne riconosciuto colpevole della morte di alcuni avversari politici dalla Suprema Corte e impiccato il 4 aprile 1979.

³ In merito al programma dichiarò: "Difenderemo la nostra patria con ogni mezzo necessario e svilupperemo un arsenale nucleare secondo a nessuno. Mangieremo erba per 1000 anni, se lo dovremo fare, ma ci riusciremo".

1.2.1- La figura di Abdul Qadeer Khan

Il Dr. Abdul Qadeer Khan è un ingegnere metallurgico, considerato il padre fondatore del programma nucleare pakistano. Nel febbraio 2004 ha confessato di essere coinvolto in un traffico internazionale clandestino di tecnologia nucleare verso la Libia, l'Iran e la Corea del Nord (fig. 3).



Figura 3 – Apparizione di Khan il 4 febbraio 2004 sulla televisione pakistana, in cui egli confessa il suo ruolo nel traffico internazionale di tecnologia nucleare.

Il giorno dopo fu 'perdonato' dal presidente del Pakistan, il generale Pervez Musharraf, ma da allora vive agli arresti domiciliari. Il 23 agosto 2005 Musharraf ha confermato che il Dott. Khan ha fornito le ultracentrifughe e l'esafluoruro di uranio alla Corea del Nord.

Abdul Qadeer Khan si laureò in ingegneria in Pakistan, all'Università di Karachi, ed in seguito si recò in Germania, Olanda e Belgio, dove conseguì il suo Ph.D all'*Università Cattolica di Leuven* nel 1972. Nello stesso anno Khan entrò a far parte dello staff del *Laboratorio di Ricerca di Fisica Dinamica* di Amsterdam, che lavorava a contratto per la URENCO. L'impianto adoperava la tecnologia delle centrifughe del tipo *Zippe*⁴ (i cui dettagli costruttivi sono coperti da segreto al fine di evitare la proliferazione nucleare). Khan lasciò l'Olanda nel 1975, e fu posto a capo del programma nucleare

⁴ La centrifuga di tipo Zippe fu sviluppata in Unione Sovietica da un team di 60 tecnici tedeschi detenuti in seguito alla Seconda Guerra Mondiale. Deve il suo nome a *Gernot Zippe*, ingegnere della Luftwaffe che fu detenuto fino al 1956. Dopo la liberazione i suoi appunti furono confiscati, ma egli fu in grado di ricostruire le sue centrifughe negli USA (Università della Virginia). Il governo americano cercò di assumerlo nella ricerca nucleare segreta, chiedendogli persino di cambiare cittadinanza, ma egli rifiutò e tornò in Europa. Tali centrifughe basano il loro funzionamento su elevatissime velocità di rotazione (100'000 rotazioni al minuto – contro le 15 di una normale lavatrice). Per ridurre l'attrito funzionano sotto vuoto, e poggiano su cuscinetti magnetici. Tra i suggerimenti del Dott. Zippe la sostituzione dell'alluminio per la loro realizzazione con acciaio maraging (oggi si usano anche fibre di carbonio e materiali compositi).

pakistano. In una rivelazione dell'agosto 2005, il primo ministro olandese Rudd Lubbers, dichiarò che il suo paese era a conoscenza del fatto che Khan stesse sottraendo dei segreti nucleari, ma di averlo lasciato fare in seguito alle esplicite richieste della CIA di poter continuare a seguire i suoi movimenti.

Il dott. Khan *Laboratorio di Ricerca Ingegneristica* a Kahuta, Pakistan, nel 1976, successivamente nominato *Laboratori di Ricerca Khan* dal generale Muhammad Zia-ul-Haq, figura di spicco del programma nucleare pakistano. Il centro si occupò anche dello sviluppo del missile *Ghauri*⁵. Il Pakistan mise rapidamente a punto la tecnologia di arricchimento dell'uranio (si stima a partire dal 1986). Nel 1983 fu condannato a quattro anni di reclusione in contumacia per spionaggio, ma egli respinse le accuse dichiarando di aver messo a punto tali tecnologie in maniera autonoma.

Il governo degli Stati Uniti si convinse, in seguito ad azioni di spionaggio, che il Pakistan stesse fornendo tecnologia per l'arricchimento dell'uranio alla Corea del Nord in cambio di tecnologia missilistica (i giornali riportarono la notizia di un progetto cinese di una roza ma efficace bomba all'uranio di progettazione cinese che il dott. Khan avrebbe avuto nella sua valigetta).

Nel 2003 emerse che il dott. Khan aveva cercato di vendere tecnologia nucleare all'Iran a partire dal 1989; in seguito alle ispezioni della IAEA si determinò infatti che l'Iran aveva realizzato una serie di ultracentrifughe in cascata in base ai design 'sottratti' alla URENCO, e ottenuti da un 'intermediario straniero'. In seguito alla rinuncia a perseguire i propri programmi sulle armi di distruzione di massa anche la Libia svelò di possedere impianti simili a quelli iraniani (fig.4).



Figura 4 – Ultracentrifughe per l'arricchimento dell'uranio acquistate che la Libia ha acquistato dal 'mercato nero nucleare' del dott. Khan

⁵ Il missile Ghauri è un missile balistico a medio raggio, con gittata pari a circa 1500 Km e carico pagante di 700 kg (sufficienti a trasportare bombe atomiche della potenza di 15-35 kT). Un recente libro del Presidente Musharraf svela che la tecnologia necessaria per il suo sviluppo è stata importata dalla Corea del Nord in cambio di denaro e dellecentrifughe per l'arricchimento dell'uranio.

Nel febbraio 2004 il dott. Khan dovette ammettere pubblicamente di aver fornito tecnologia nucleare all'Iran, la Libia e la Corea del Nord; fu 'perdonato' dal presidente Musharraf, ma da allora è agli arresti domiciliari. Pare che i componenti delle ultracentrifughe fossero stati realizzati in Malesia. Si è pensato che egli fosse spinto fondamentalmente da tre tipi di motivazioni: I) una sfida alle nazioni occidentali e la voglia di violare la segretezza in materia; II) il desiderio di dotare le nazioni musulmane di armi nucleari; III) il denaro.

Si è speculato inoltre sul fatto che le figlie di Khan, cittadine britanniche, posseggano documenti compromettenti che legano le sue attività col Governo del Pakistan.

1.3- Il programma nucleare israeliano

Lo stato di Israele è sospettato di aver sviluppato armi di distruzioni di massa, in particolare anche bombe nucleari a fissione e fusione. La politica del governo israeliano è quella di non negare né confermare il programma nucleare, attuando così una "politica di ambiguità deliberata" (la posizione ufficiale afferma che lo stato ebraico non vuole essere il primo ad introdurre le armi nucleari in Medio Oriente).

Il programma nucleare israeliano è stato supportato da altre nazioni. Nel 1956, dopo la crisi di Suez, la Francia accordò l'aiuto per la costruzione di un reattore nucleare (ad uranio naturale, moderato con acqua pesante) ed un impianto di riprocessamento nel sito di Dimona⁶. La produzione del plutonio iniziò nel 1964. Alcuni documenti resi pubblici dimostrerebbero che la Gran Bretagna fra il 1950 ed il 1960 avrebbe effettuato numerose spedizioni di materiali soggetti a restrizioni (quali prodotti chimici necessari per il riprocessamento, campioni di uranio 235, plutonio e litio 6). Tali indagini proverebbero anche che la stessa Gran Bretagna fra il 1959 ed il 1960 avrebbe inviato in Israele 20 tonnellate di acqua pesante con consentire la realizzazione del reattore di Dimona (pare che la transazione sia stata effettuata attraverso la norvegese *Noratom*). Nel 1961 il Primo Ministro Israeliano Ben Gurion informò quello canadese, John Diefenbaker, che nel sito di Dimona un impianto pilota per la separazione del plutonio sarebbe stato realizzato; l'intelligence britannica concluse, in base a questa ed altre informazioni in suo possesso, che Israele intendeva dotarsi di armi nucleari.

Quando un aereo spia statunitense U-2 sorvolò il sito allo scopo di esaminarne l'aria e rilevare sottoprodotti radioattivi di origine artificiale, gli USA, agli inizi degli anni '60, richiesero ad Israele di accettare le ispezioni internazionali. Israele accettò, ma a condizione che venissero utilizzati ispettori statunitensi e che inoltre fosse avvisato con anticipo delle ispezioni. Questo, secondo alcune

⁶ Città israeliano nel deserto di Negev, nel distretto meridionale di Israele (36 Km a sud della città di Beer Sheva). La città fu fondata nel 1955 da David Ben-Gurion.

rivelazioni, consentiva agli israeliani di costruire ad hoc false pareti/pannelli, celando molti dei segreti ivi contenuti. Gli ispettori conclusero che le ispezioni, a queste condizioni, erano del tutto inutili, e nel 1969 gli USA le interruppero.

La prima rivelazione pubblica dell'arsenale nucleare israeliano si ebbe sul *Sunday Times* del 5 ottobre 1986, che pubblicò le informazioni ricevute da Mordechai Vanunu, un impiegato al centro di ricerca nucleare di Negev (fig. 5-9). Vanunu dichiarò che Israele produceva 30 kg di plutonio all'anno, e che ne usava 4 per la costruzione di ogni ordigno. Vanunu svelò che Israele disponeva di circa 100-200 bombe, ed anche di ordigni termonucleari – montati su sistemi missilistici di tipo Jericho (che oggi arrivano a poter trasportare fino a 1000-1300 kg per un range di 4800 km, consentendo quindi di colpire qualunque stato Arabo, come anche l'Europa e l'Africa) .



Figura 5 – Istituto 2, sito di Dimona, fotografato da Mordechai Vanunu

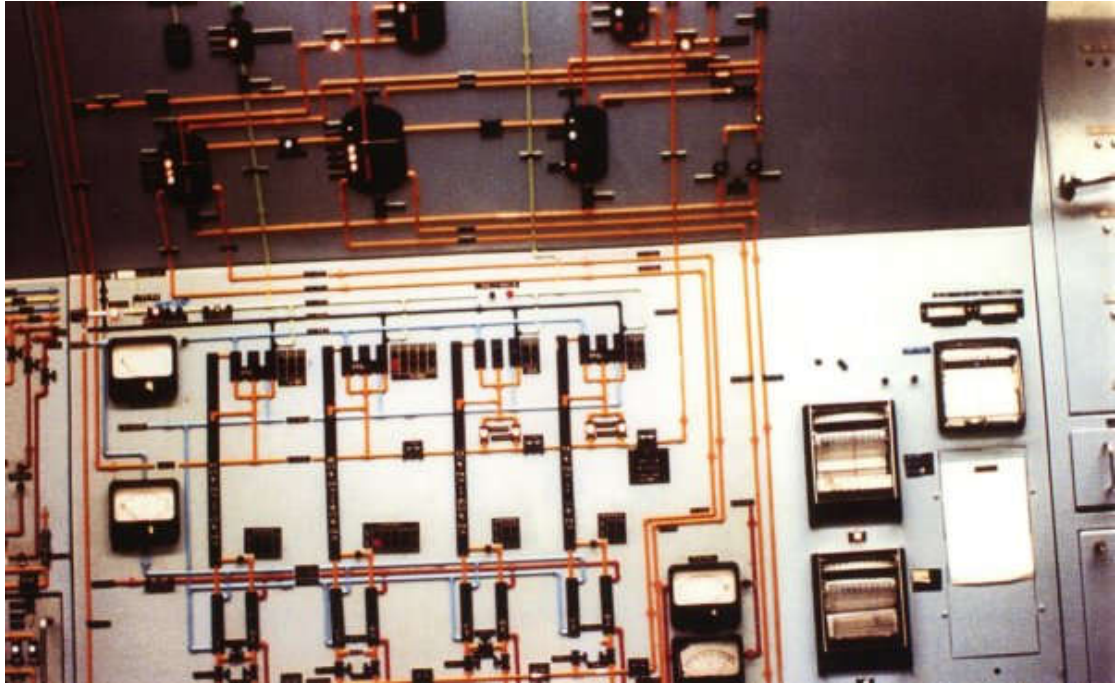


Figura 6 – pannello di controllo, sito di Dimona, fotografato da Mordechai Vanunu



Figura 7 – Modello di arma nucleare, sito di Dimona, fotografato da Mordechai Vanunu



Figura 8 –Sala di controllo dell’impianto di separazione del plutonio, sito di Dimona, fotografato da Mordechai Vanunu



Figura 9 –Glove box per la lavorazione di componenti di precisione, sito di Dimona, fotografato da Mordechai Vanunu

Dati i buoni rapporti diplomatici con l’allora primo Ministro Britannico Margaret Thatcher, il Mossad decise di non violare le leggi britanniche, così fu necessario convincere Vanunu ad abbandonare volontariamente il Regno Unito. L’integrità territoriale italiana non ricevette lo stesso rispetto:

conoscendo il debole di Vanunu per le donne, un agente del Mossad, Cheryl Bentov, sotto il nome di “Cindy”, fingendosi una turista americana, convinse Vanunu a trascorrere con lei una vacanza a Roma.

Mordechai Vanunu fu catturato da agenti del Mossad, drogato, condotto in Israele, e condannato a 18 anni di reclusione per alto tradimento e spionaggio (di cui 11 scontati in isolamento). E’ stato rilasciato nel 2004, ma soggetto a varie restrizioni di movimento e parola.

Nel 1998 il primo ministro Shimon Peres dichiarò che Israele aveva “costruito un’opzione nucleare per avere una Hiroshima bensì una Oslo⁷”.

1.3.2 - Capacità Offensive Israeliane

Lo stato di Israele possiede tre sottomarini di fabbricazione tedesca del tipo Dolphin, equipaggiati con missili americani Harpoon⁸ (fig.10) modificati per il trasporto di piccoli ordigni nucleari.



Figura 10 – Missile Harpoon

Non si è a conoscenza di test nucleari israeliani. E’ possibile che lo stato di Israele abbia ricevuto i risultati dei test atomici francesi. Negli anni ’60 si è diffusa la notizia su alcuni giornali di alcuni test di implosione a potenza zero nel deserto di Negev. Nel settembre 1979 il satellite Vela potrebbe aver assistito ad una esplosione nucleare oceanica sperimentale da 3 kiloton nei pressi del sud Africa, accompagnato da effetti acustici e ionosferici, possibile traccia di un test congiunto Isrraeliano-Sudafricano.

⁷ In riferimento agli Accordi di Oslo, firmati il 13 settembre 1993 da Yasser Arafat e Shimon Peres, secondo i quali, in breve, l’autorità palestinese riconosceva ad Israele il diritto di esistere, e quest’ultimo prevede un ritiro dalla Striscia di Gaza e la nascita di una Autonomia Nazionale Palestinese.

⁸ Missile dal peso di 628 kg, diametro di 340 mm, velocità di 850 km/h, con testata da 221 kg. Costo unitario 720 000 \$.

2 - Caratteristiche del Plutonio di Grado Militare

2-1 Introduzione

Il concetto alla base della costruzione di un ordigno nucleare è quello di rendere supercritica una massa sottocritica per mezzo di esplosivi convenzionali.

Tale operazione si prospetta più semplice per bombe all'uranio (con arricchimenti in U^{235} dell'ordine del 70-95%), in cui, dato il basso rateo di fissioni spontanee, e quindi di produzione di neutroni, è sufficiente realizzare un ordigno del tipo "a cannone" (con tecnologie industriali standard): ovvero basta sparare una massa sottocritica in un'altra più grande per portare a criticità la bomba (anche se con efficienze non elevatissime).

Per le bombe al plutonio è richiesto un design molto più sofisticato. In tal caso infatti - come fu suggerito da Emilio Segrè nel 1944 [3]- le impurezze inevitabilmente presenti nel plutonio, assieme all'alto rateo di fissioni spontanee, avrebbero portato a predetonazione della bomba. La bomba all'uranio invece creava molti meno problemi, tanto che fu sganciata sulla città giapponese di Hiroshima senza eseguire un test preventivo (gli scienziati di Los Alamos erano sicuri avrebbe funzionato).

Il principio che fu messo a punto quindi fu quello di comprimere rapidamente una sfera di plutonio fino allo stato supercritico per mezzo di lenti esplosive.

Si può stimare la massa critica di una sfera di Pu^{239} sui 10 kg (che scende a 4 kg con un riflettore di 15 cm di U^{238}).

In tabella 1 sono riportati i ratei di fissione spontanea per i vari isotopi del plutonio.

In tabella 2 la composizione isotopica dei vari tipi di plutonio di diversa provenienza.

Isotopo	Rateo di Fissione Spontanea (n/g·s)
Pu-238	3440
Pu-239	0.03
Pu-240	1600
Pu-241	0
Pu-242	1670

Tab. 1 - Rateo di emissione dei neutroni (per grammo e secondo) dai vari nuclidi del plutonio

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Super Grade	0	96	3	1	0
Weapons Grade	0	91	6	2	1
Reactor Grade	2	51	28	14	5

Tab. 2 – Composizione percentuale isotopica del plutonio di diversa provenienza

2-2 Caratteristiche Generali del Plutonio

Il plutonio (che trae il proprio nome dal pianeta Plutone, il successivo dopo Urano nel nostro sistema solare) fu scoperto da Glenn Seaborg, Edwin McMillan, Kennedy ed Arthur Wahl nel 1940 all'università di Berkley bombardando l'uranio con deutoni con un ciclotrone da 60 pollici (circa un metro e mezzo). In natura si trovano tracce infinitesimali di Pu²³⁹ (nelle miniere di uranio, per cattura neutronica da fissione spontanea) e Pu²⁴⁴ (nelle miniere di cerio, risalente ai tempi di formazione della crosta terrestre).

Il plutonio è un metallo argenteo molto pesante, lucido come il nichel appena pulito. E' fortemente elettronegativo e reattivo. Si ossida rapidamente, formando una successione di colori di interferenza dal giallo chiaro fino al nero. Se la corrosione diviene importante si forma una polvere verde olivastria di PuO₂. La corrosione di questo metallo è molto più rapida in presenza di umidità. Presenta 4 stati di valenza (III-VI). Presenta una solubilità significativa solo in soluzioni acide forti (tipo acido nitrico o perclorico). Le soluzioni concentrate sono instabili a causa del fenomeno di radiolisi, che portano a precipitazione.

Dato il non trascurabile calore di decadimento un pezzo di plutonio è caldo al tatto (se isolato termicamente può superare la temperatura di ebollizione dell'acqua).

La sua densità è pari a 19,84 g/cm³, il suo punto di fusione 641 °C (simile a quello dell'alluminio), quello di ebollizione 3232 °C.

E' un metallo con molte caratteristiche peculiari: è stato definito *“il sogno dei fisici, l'incubo degli ingegneri”*.

Presenta la più bassa conducibilità termica di ogni metallo, ed una delle più basse conducibilità elettriche (superiore solo a quella del manganese). E' il metallo liquido più viscoso che si conosca. Subisce i più estremi e bizzarri cambiamenti di densità al variare della temperatura.

Il plutonio presenta ben sei differenti fasi allotropiche, ossia più di qualunque altro elemento. Il passaggio da una fase ad un'altra in alcuni casi comporta sostanziali variazioni volume. In due di queste fasi (δ e δ') presenta l'insolita caratteristica di accorciarsi all'aumento della temperatura; in altre presenta un coefficiente di espansione termica estremamente elevato. E' un metallo che si

contrae fondendo, consentendo al plutonio indisciolti di galleggiare. Nella sua forma α è uno dei metalli più densi che si conoscano (dopo osmio, iridio, platino, renio e nettunio).

Quell'ultima è quella che si ha a temperatura ambiente, ed è fragile.

Nonostante estremamente scarso in natura ne sono stati rilasciati 5000 kg nell'atmosfera in seguito ai test nucleari (ad esempio il suolo degli USA ne contiene in media 2 mCi, pari a 28 mg, per km²).

2-3 Cenni di Metallurgia del Plutonio

La fase stabile a temperatura ambiente del plutonio è quella α (fino a 122 °C). In tale stato la maggioranza degli atomi sono legati da legami covalenti (e non metallici, come ci potrebbe aspettare), conferendogli proprietà più simili ad un materiale ceramico che ad un metallo: si presenta infatti duro, rigido, fragile, e si frattura in maniera molto direzionale. Si tratta quindi di una forma non lavorabile con le normali tecniche.

Nelle fasi δ e γ invece è molto malleabile. Nella fase δ presenta le normali caratteristiche metalliche, inclusa una eccellente duttilità. Presenta caratteristiche simili a quelle dell'alluminio, ed è quindi desiderabile dal punto di vista della lavorabilità. Nonostante presenti la insolita proprietà di accorgersi quando riscaldato, il coefficiente negativo di espansione non è grande.

È una fase solo marginalmente stabile, ma la si può stabilizzare fino a temperatura ambiente l'aggiunta di elementi trivalenti quali il gallio, l'alluminio, il cerio, l'indio e lo scandio.

Tuttavia anche quando stabilizzato nella fase δ il plutonio tende a tornare nella fase α (bastano una pressione di pochi kilobar). È importante notare che per concentrazioni molari di gallio inferiori al 4% la lega è metastabile, ossia che il cambiamento di fase indotto dalla pressione rappresenta un fenomeno irreversibile.

Per l'utilizzo in armi nucleari il plutonio viene stabilizzato nella fase δ con concentrazioni molari del 3-3.5% (pari allo 0.9-1.0% in peso): tale lega risulta stabile fra -75 e 475 °C, presenta un coefficiente di espansione lineare prossimo a zero, semplifica notevolmente le procedure di fusione (poiché l'unico passaggio di fase si ha dalla fase ϵ a quella δ), e rende molto meno suscettibile il plutonio alla corrosione.

Una percentuale del 3% fu utilizzata nelle bombe Gadget (deserto di Alamogordo, New Mexico) e Fat Man (Nagasaki). A parte tale elemento di lega il plutonio contenuto era molto puro.

L'alluminio rappresenta un buon agente alligante, ma presenta l'inconveniente delle reazioni α -n. Il cerio non conferisce le caratteristiche di resistenza alla corrosione.

Le sfere di plutonio vengono generalmente ricoperte da un deposito metallico, sia per ridurre il tasso di corrosione che il rischio radiologico. La sfera dell'ordigno Gadget fu ricoperta con nichel,

esponendola ad una atmosfera di nichel carbonile⁹. I depositi ottenuti per evaporazione dell'alluminio e per elettrodeposizione dello zinco non sortiscono buoni risultati.

Un problema potenzialmente serio nell'uso del plutonio per la costruzione di ordigni è considerato l'alto tasso di emissione spontanea di neutroni. La presenza di questi ultimi durante l'assemblaggio di una massa supercritica porta allo sviluppo di reazioni nucleari 'premature', con conseguente abbassamento dell'efficienza dell'ordigno (o al suo totale malfunzionamento). Le cause fondamentali per la presenza di tale fondo neutronico sono due: la presenza dell'isotopo 240 del plutonio (con sviluppo di neutroni dell'ordine di 10^6 n/sec·Kg), inevitabilmente presente, e le reazioni (α ,n) con gli elementi leggeri. Per minimizzare (ma non eliminare) quest'ultimo problema, bisogna ridurre a poche parti per milione la concentrazione degli elementi leggeri (in particolare Be, F, e B).

Le prime tecniche di produzione del plutonio metallico ad alto grado di purezza sono consistite nella riduzione pirochimica di alogenuri del plutonio con metalli alcalini. Tipicamente si è utilizzata la riduzione del PuF₄ con Ca ed I, tecnica utilizzata negli USA fino al 1970. Purezze maggiori si sono potute ottenere con la raffinazione elettrolitica del metallo ottenuto col precedente processo. Tecniche più recenti contemplano l'uso di ossido di plutonio (che fra i vantaggi annoverano una minore produzione di rifiuti).

La manipolazione e l'utilizzo del plutonio fuso si avvale di attrezzi costruiti con tantalio debolmente ossidato. I gusci di fusione possono essere costruiti anche con grafite, acciaio dolce o ghisa se ricoperti da fluoruro di calcio oppure ossidi di zirconio o ittrio. Si possono utilizzare persino gusci di alluminio; in tal caso il raffreddamento è talmente rapido che le fasi intermedie, che si formano lentamente, sono quasi interamente bypassate.

2-4 Tossicità del Plutonio

Nonostante il plutonio presenti una tossicità chimica del tutto simile a quella di qualsiasi metallo pesante, quest'ultima è molto piccola (quasi inosservabile) rispetto alla sua radiotossicità. Questa deriva essenzialmente dalla sua attività quale alfa emettitore, che lo rende pericoloso solo in caso di ingestione/inalazione: il rateo di emissione di raggi gamma e neutroni infatti è troppo basso per costituire un pericolo. In tale ottica quindi assume importanza la composizione isotopica cui si fa riferimento. Si assuma dunque di analizzare il plutonio di grado militare, libero dall'americio, con attività specifica pari a 0,071 Ci/g.

Le particelle alfa colpiscono solo i tessuti che contengono plutonio e che ne sono direttamente a contatto. Gli effetti possono essere di tipo acuto o cronico. Se il tasso di esposizione è alto gli effetti

⁹ Liquido di formula chimica Ni(CO)₄, velenoso, incolore, infiammabile, che bolle a 43°C; solubile in alcol ed insolubile in acqua, utilizzato per i depositi di nichel.

possono manifestarsi come acuti, con effetti rapidi. Per basse esposizioni si ha un effetto cancerogeno cumulativo.

Viene assorbito scarsamente nel tratto gastro-intestinale, anche se ingerito come sale solubile. Data la sua tendenza a precipitare nelle soluzioni acquose, ed a formare complessi insolubili con altri materiali, la contaminazione dell'acqua tende ad essere un fenomeno autolimitante.

L'ingestione di 500 mg (7 Ci) di plutonio finemente suddiviso, o sottoforma di sale solubile, porta alla morte per esposizione acuta da pochi giorni ad una settimana. L'inalazione di 100 mg (1,4 Ci) sotto forma di particelle di dimensioni ottimali per la ritenzione polmonare conduce al decesso per edema da 1 a 10 giorni. L'inalazione di 20 mg (0,28 Ci) causano la morte per fibrosi entro un mese: dosi inferiori diventano importanti gli effetti cancerogeni cronici.

Per esercitare i suoi effetti cronici il plutonio deve essere continuamente presente nel corpo. Particelle delle apposite dimensioni (1-3 micron) inalate saranno depositate permanentemente nei polmoni (una detonazione con alti esplosivi possono convertire il 20-50% del plutonio in questa forma).

Il plutonio presente nei sistemi biologici normalmente presenta stato di ossidazione +4, simile al Fe^{3+} . Se assorbito nel sistema circolatorio presenta alta probabilità di concentrarsi nei tessuti che contengono ferro: midollo osseo (particolarmente sensibile alle radiazioni), fegato e milza. Il plutonio presenta periodo di dimezzamento biologico di 80-100 anni quando depositato nel sistema osseo, circa 40 anni nel fegato. Agenti chelanti possono aiutare alla sua rimozione. Il deposito di 1,4 μg (0,1 μCi) nel tessuto osseo di un adulto porta a malfunzionamento del sistema immunitario, e risulta probabile lo sviluppo di un tumore osseo entro alcuni anni.

L'ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) specifica l'ALI (*Annual Limit of Intake*) di 20 nCi/anno (280 nanogrammi).

2-5 Produzione del Plutonio

L'isotopo principale del plutonio per la fabbricazione degli ordigni è il 239. Si forma per bombardamento dell' U^{238} con neutroni lenti. Ciò avviene automaticamente in tutti i reattori nucleari del mondo. I tipici burnup dei reattori plutonigeni dedicati allo scopo è dell'ordine di 1'000 MWd/T. Il plutonio di grado militare prodotto a Hanford si ottiene con irraggiamenti dell'ordine di 600 MWd/T; composizione analoga si ottiene con le pile atomiche ad acqua pesante di Savannah River con irraggiamenti dell'ordine di 1'000 MWd/T (probabilmente grazie all'assorbimento neutronico legato alla produzione del tritio). Durante la seconda guerra mondiale il reattore di Hanford produsse plutonio militare con irraggiamenti dell'ordine di 100 MWd/T data l'urgenza della situazione, producendo quindi un plutonio militare *super-grade* (circa 1% Pu^{240} , quantità trascurabili degli altri isotopi).

2-6 Plutonio di Grado Militare

Negli U.S.A si intende con questo termine quella composizione isotopica con un valore dell'isotopo 240 inferiore al 7%. Si riportano di seguito le tipiche composizioni isotopiche dei reattori di Hanford e Savannah River (Tab.3).

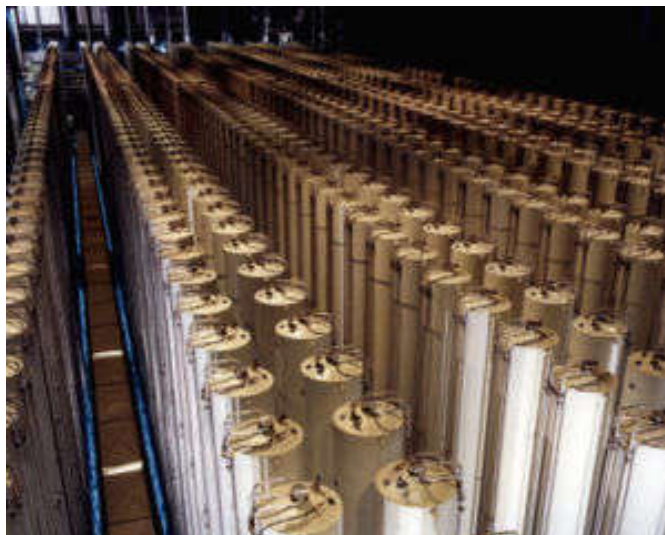
	Hanford	Savannah River
Pu-238	<0,05 %	<0,05 %
Pu-239	93,17 %	92,99 %
Pu-240	6,28 %	6,13 %
Pu-241	0,54 %	0,86 %
Pu-242	<0,05 %	<0,05 %

Tabella 3 – Composizione isotopica del plutonio prodotto a Hanford e Savannah River

Gli U.S.A hanno prodotto anche plutonio con contenuti dell'isotopo 240 dell'ordine del 3 % e del 1,5 % per impieghi in design speciali.

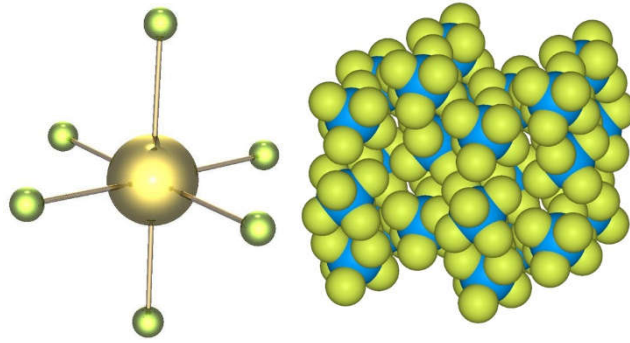
Appendice A: considerazioni progettuali sulle ultracentrifughe per l'arricchimento dell'uranio

Per l'arricchimento dell'uranio si può sfruttare la differenza di densità degli isotopi 235 e 238: questo è il principio dell'*ultracentrifugazione*. Tuttavia la differenza di densità è pari solo all' 1,26%, e ciò richiede velocità di rotazione dell'ordine di 1500 rotazioni al secondo (ovvero 90'000 rivoluzioni per minuto). Si consideri che una normale lavatrice domestica compie appena 15 rivoluzioni per secondo. Per ridurre l'attrito il rotore gira a pressioni ridotte, e viene sostenuto da cuscinetti magnetici. Il prototipo di ultracentrifuga del tipo *Zippe* è difficile da costruire, e richiede tolleranze molto strette (ad altissima velocità di rotazione infatti la minima imperfezione porta ad inopportuni carichi rotanti). Tali impianti presentano anche un certo grado di pericolosità data la possibilità di esplosioni.



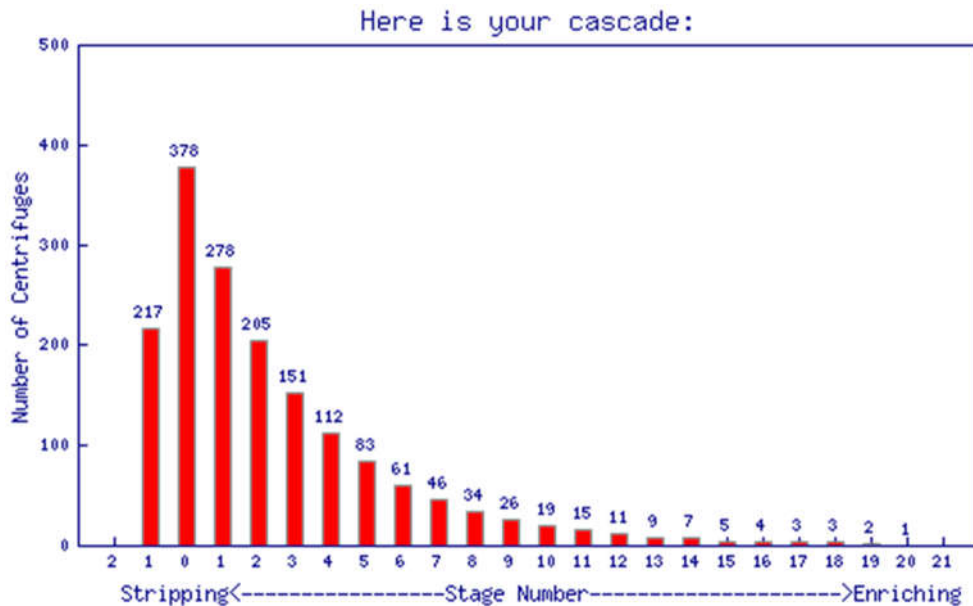
Batteria di ultracentrifughe negli USA

Il fluido utilizzato per l'arricchimento è l'esafluoruro d'uranio (UF_6), solido incolore che presenta il proprio punto triplo a $64^\circ C$. essendo un materiale fortemente aggressivo, tutte le parti a contatto con esso devono essere realizzate con materiali resistenti alla corrosione. Tale materiale viene adoperato anche per il processo di *diffusione gassosa*, che però è circa 60 volte energeticamente più dispendiosa dell'ultracentrifugazione.



Molecola dell'UF₆ e sua struttura cristallina

Di seguito si riporta il calcolo del numero di centrifughe necessarie per arricchire 50 kg/anno di uranio all'80% (alimentando con uranio naturale ed accettando scarti con arricchimento dell'ordine dello 0,35 %) [4].



Numero di Centrifughe di Stripping: 217

Numero di Centrifughe di Arricchimento: 1453

Numero totale di centrifughe: 1670

Ultracentrifughe tipo controcorrente, lunghezza 250 cm, raggio delle centrifughe 25 cm, velocità periferiche 600 m/s, temperatura media 320 K

Bibliografia

- [1] <http://nuclearweaponarchive.org/India/IndiaRealYields.html>
- [2] <http://nuclearweaponarchive.org/India/IndiaArsenal.html>
- [3] LANL – Los Alamos National Laboratory -
<http://www.lanl.gov/history/atomicbomb/littleboyandfatman.shtml>
- [4] FAS – Federation of American Scientists - <http://www.fas.org/lib/form1.html>