

ALLEGATO 1 – DATI SULL’URANIO IMPOVERITO

1.1 – Caratteristiche dell’uranio impoverito

L’uranio occupa la posizione numero 92 nella tavola degli elementi e il suo peso atomico è 238,03. Esso ha la stessa età della terra, ma è stato scoperto nel 1789, ai tempi della Rivoluzione Francese e, pochi anni dopo l’osservazione del pianeta Urano (1781), è stato subito riconosciuto come altamente tossico.

L’uranio è un metallo di colore bianco argenteo, duttile e malleabile, l’uranio metallico si ossida facilmente, per cui non è stabile come i suoi ossidi e fluoruri.

In natura l’uranio si trova essenzialmente sotto la forma dei minerali di uraninite o pechblenda e carnotite o ortovanadato di uranile e potassio, i principali giacimenti di pechblenda si trovano in Congo, Russia e Canada; la carnotite si trova principalmente in Russia, Australia, Colorado e Utah.

L’Uranio naturale è una miscela di tre isotopi: U238 (99,275%), U235 (0,720%), e U234 (0,005%). Il metallo ha una delle maggiori densità riscontrate tra gli elementi (19.07 g/cm³ a 25 °C) e, al di sotto del punto di fusione (1132 °C), è caratterizzato da tre modificazioni cristalline e può formare vari composti intermetallici (es.:U₆Mn, U₆Ni, USn₃). Tutti gli isotopi dell’uranio sono radioattivi, e decadono emettendo una particella α in altri isotopi, ancora radioattivi.

A causa della sua lunghissima vita media (4,468· miliardi di anni), l’ U238 ha una attività molto bassa.

1.2 – Fabbricazione dell’uranio impoverito

La scarsa abbondanza relativa degli isotopi fissili (principalmente del U235) pone alcuni problemi per l’utilizzo dell’Uranio naturale negli impianti nucleari. Qualora si faccia ricorso all’acqua pesante come refrigerante per i suddetti impianti, è ancora possibile utilizzare combustibile nucleare composto da uranio naturale. Sono questi gli impianti nucleari di tipo “CANDU”, principalmente utilizzati in Canada. La maggior parte degli impianti nucleari esistenti nel mondo, tuttavia, utilizza come refrigerante la normale H₂O (acqua “leggera”), sia essa in pressione (impianti PWR) o bollente (impianti BWR). Per il combustibile dei reattori nucleari ad acqua leggera, (così come per le bombe nucleari a fissione), è necessario aumentare la concentrazione degli isotopi fissili. Il materiale che ne deriva è noto come *uranio arricchito*, e la concentrazione di U235 varia fra il 2-3% (per gli impianti nucleari) ed il 90% (per usi militari). Il materiale di scarto di questo processo è noto invece come *uranio impoverito* (DU, depleted uranium).

Per un ulteriore chiarimento, si ritiene utile un breve cenno al ciclo del combustibile per i reattori nucleari, almeno per la parte che riguarda più direttamente il DU.

Il ciclo del combustibile è composto da varie fasi che vanno dal reperimento dei materiali nucleari fino all’immagazzinamento finale dei prodotti di fissione (scorie nucleari), con possibilità di ricicli interni.

La parte “fredda” del ciclo è quella che precede l’ingresso del combustibile nel reattore, così detta per distinguerla da quella “calda” che riguarda il riprocessamento e lo smaltimento delle scorie radioattive, cioè del combustibile esaurito.

Una prima fase del ciclo freddo comprende l'estrazione del minerale e la sua concentrazione sotto forma di uranato ammonico ("yellow cake"); successivamente si passa alla purificazione dello "yellow cake" e alla conversione a UF_6 (esafluoruro di uranio, composto gassoso dell'uranio, necessario per la successiva fase di arricchimento).

Nell'arricchimento, oltre all'esafluoruro di uranio arricchito in U^{235} , si ottiene UF_6 impoverito (0.20-0.30 % in U^{235}), che viene ridotto a forma metallica e quindi scaricato ed immagazzinato. Attualmente l'uranio impoverito viene impiegato, dato le sue proprietà, in campo "non nucleare" sia civile che militare. Le stime sulle disponibilità di DU nei paesi industrializzati ammontano ad alcune centinaia di migliaia di tonnellate.

Nel futuro, l'uranio impoverito potrebbe essere utilizzato come materiale fertile per i cosiddetti reattori nucleari "veloci" o "autofertilizzanti", il cui modello dimostrativo, tuttavia, (Reattore francese Superphenix) ha evidenziato molte problematiche, tanto da consigliarne la chiusura anticipata e una revisione sugli scenari di sviluppo ed utilizzo di questo tipo di reattori.

Nelle successive fasi del ciclo del combustibile nucleare, si passa, alla fase di fabbricazione dell'elemento di combustibile, che comprende la conversione dell' UF_6 arricchito a UO_2 , la pastigliatura di questo ultimo, la fabbricazione della barretta di combustibile e il suo assemblaggio finale. Il combustibile, dopo essere stato utilizzato nel reattore, viene scaricato e immagazzinato in piscine per il suo raffreddamento.

Subisce, quindi, un trattamento per scomporlo nei suoi diversi componenti ; si ottengono così:

- rifiuti radioattivi, che passano alla fase di trattamento e confinamento;
- plutonio, che può essere riciclato nei reattori come materiale combustibile fissile, oppure utilizzato per scopi militari;
- uranio ancora lievemente arricchito, che può essere anch'esso riciclato per recuperarne la quota di U^{235} .

Si potrebbe anche ipotizzare un ciclo che termina direttamente con il confinamento degli elementi di combustibile esauriti, eliminando la fase di trattamento e rinunciando ad utilizzare l'uranio residuo e il plutonio prodotto.

Il ciclo del combustibile rappresenta un aspetto fondamentale per lo sviluppo dell'energia nucleare, la cui importanza è stata sempre più evidenziata nel corso degli ultimi anni.

Il DU rappresenta quindi un sottoprodotto del ciclo del combustibile nucleare, ineliminabile qualora vi sia, come è uso attuale, il processo di arricchimento.

1.3 – Composizione dell'uranio impoverito

Ai fini della determinazione della sua pericolosità di tipo radiologico, è essenziale conoscere quali nuclidi radioattivi sono presenti all'interno del DU.

Questa determinazione non ha un'unica risposta, poiché dipende dal processo di arricchimento che ha portato alla produzione, come scarto del DU.

E' possibile infatti, semplificando l'approccio, avere 2 diverse composizioni del DU, a seconda che, durante il processo di arricchimento del combustibile, venga o meno utilizzato del materiale proveniente dal riciclo del combustibile nucleare esaurito (riprocessamento).

Verrà fatto riferimento, per ulteriormente chiarificare questo punto essenziale, al documento del WISE (World Information Service on Energy) Uranium Project – Fact Sheet, in breve documento WISE¹.

Nel caso in cui il DU provenga dagli scarti della preparazione del combustibile nucleare (processo di arricchimento), non si troverà al suo interno né U236 né Pu239, purché in questo processo venga utilizzato come materia prima dell'uranio "fresco", proveniente soltanto dal processo di estrazione e lavorazione dell'uranio naturale.

Se invece il DU è lo scarto di un processo di arricchimento che utilizza come materia prima anche dell'Uranio proveniente dal riprocessamento (riciclaggio del combustibile esaurito degli impianti nucleari), allora questi nuclidi possono essere presenti nel DU.

Chiameremo il primo "DU pulito", il secondo "DU sporco", senza voler intendere con ciò che il DU pulito non sia un materiale pericoloso. In sostanza, il DU pulito è frutto di un ciclo del combustibile nucleare nel quale non vi è possibilità che, a causa di riciclo interno, i prodotti di fissione ed i nuclidi transuranici (quali Np e Pu) generati durante l'uso del combustibile nei reattori siano presenti nel DU. Quando invece questo riciclo viene effettuato, allora la parte "calda" e contaminata del ciclo del combustibile (dopo l'uso del combustibile nel reattore) ha effetti di retroazione e di contaminazione anche sulla parte "fredda" del ciclo.

La notizia che il DU usato per scopi militari (munizioni) nei Balcani sia almeno in parte "sporco" ha trovato conferma nelle rilevazioni Unep che hanno verificato la presenza di U236 nel DU². Si tratta di un nuclide artificiale la cui presenza indica in modo inequivocabile che la materia prima usata per i munizionamenti proviene almeno in parte da impianti nucleari.

Per avere una informazione corretta sulla composizione del DU sporco, al di là della miscela di nuclidi principali (i tre isotopi dell'uranio sopra citati), occorrerebbe conoscere le filiere (tipo di impianto nucleare) di provenienza dell'uranio "da riprocessare", ma soprattutto l'impianto di riprocessamento e le sue caratteristiche.

Infine, anche conoscendo la composizione originaria del DU pulito e del DU sporco, sarebbe utile conoscere quale miscela di questi due è stato utilizzato per produrre il munizionamento.

Nelle seguenti tabelle vedremo nel dettaglio le composizioni del DU pulito e del DU sporco secondo il documento WISE.

Tabella 1.1 – Composizione DU pulito. Bq di attività per g di materiale. Solo i nuclidi non gassosi e a vita media breve hanno raggiunto l'equilibrio.

Nuclide	Attività specifica [Bq / g]	Concentrazione [wt_%]	Attività specifiche [Bq / g]	Note
U-238	1,245E+04	9,980E+01	1,243E+04	Nuclide padre
Th-234			1,243E+04	In equilibrio con U238
Pa-234m			1,243E+04	In equilibrio con U238
U-235	8,001E+04	2,000E-01	1,600E+02	Nuclide padre
Th-231			1,600E+02	In equilibrio con U235
U-234	2,313E+08	8,210E-04	1,899E+03	Nuclide padre

¹ <http://www.peacelink.it/tematiche/disarmo/u238/documenti/durepe.pdf>

² <http://balkans.unep.ch/press/press010116.html>

TOTALE		1,000E+02	3,950E+04	
---------------	--	-----------	------------------	--

Tabella 1.2 – Composizione DU sporco. Bq di attività per g di materiale. Solo i nuclidi non gassosi e a vita breve hanno raggiunto l'equilibrio.

Nuclide	Attività specifica [Bq / g]	Concentrazione [wt_%]	Attività specifiche [Bq / g]	Note
U-238	1,245E+04	9,957E+01	1,240E+04	Nuclide padre
Th-234			1,240E+04	In equilibrio con U238
Pa-234m			1,240E+04	In equilibrio con U238
U-236	2,396E+06	2,266E-01	5,429E+03	Nuclide padre
U-235	8,001E+04	2,000E-01	1,600E+02	Nuclide padre
Th-231			1,600E+02	In equilibrio con U235
U-234	2,313E+08	1,939E-03	4,485E+03	Nuclide padre
Pu-239	2,295E+09	4,401E-07	1,010E+01	Nuclide padre
Np-237	2,610E+07	2,469E-05	6,444E+00	Nuclide padre
Pa-233			6,444E+00	In equilibrio con Np237
TOTALE		1,000E+02	4,745E+04	

Facendo riferimento alle tabelle sopra riportate, è possibile spiegare il loro contenuto facendo riferimento alle leggi che regolano le concentrazioni dei prodotti di decadimento¹.

Ogni nuclide radioattivo decade in un altro nuclide, che può essere radioattivo a sua volta, oppure stabile. Questi prodotti di decadimento, qualora siano radioattivi, contribuiscono con la loro presenza alla radioattività totale del materiale nel quale si trovano i nuclidi "padri".

- Così, l'Uranio 238 (U238) porta con sé il suo prodotto di decadimento Th234, il quale decade a sua volta e porta il suo prodotto Pa234m, il quale porta il suo prodotto U234.

- Analogamente, U235 porta il suo prodotto Th231, il quale porta il suo prodotto Pa231, il quale porta il suo prodotto Ac227, il quale porta il suo prodotto Th227, il quale porta il suo prodotto Ra223. Ma il Radon 223, essendo un gas nobile, si libera dalla sostanza solida, si disperde nell'aria, e la catena del DU "solido" si ferma qui.

- Il U234, poi, porta il suo prodotto Th230, il quale decade in Ra226 che, essendo gassoso, e fa sì che la catena si fermi qui.

Quindi, nel DU "pulito", oltre al U238, U235 e U234, occorre tener conto della presenza di tutta la figliolanza di questi tre, cioè di: Th234, Pa234m, Th231, Pa231, Ac227, Th227, Th230.

Ci si potrà chiedere quale sia la concentrazione di questi nuclidi figli e nipoti. Fortunatamente, vi è una facile risposta: all'equilibrio, la radioattività del nuclide-figlio risulta pari a quella del nuclide-padre.

¹ Le catene di decadimento radioattivo possono essere verificate al sito:
<http://www.dne.bnl.gov/CoN/index.html>

Ad esempio, allora: 1000 Bq/g di U238 (si è usata una attività specifica, decadimenti radioattivi al secondo - Bequerel - per grammo di sostanza) comportano anche 1000 Bq/g di Th234, 1000 Bq/g di Pa234m e 1000 Bq/g di U234. E così via per gli altri "nuclidi-padre".

Esistendo l'Uranio in natura da sempre (da miliardi di anni), tutti i nuclidi figli hanno fatto in tempo a raggiungere la concentrazione di equilibrio.

Se ora osserviamo la tabella per il DU pulito del documento WISE, vediamo che mancano alcuni nuclidi fra quelli citati.

Per quanto riguarda il DU sporco, assumiamo per buona la tabella del documento WISE, alla quale però dobbiamo aggiungere che:

- Il U236 decade in Th232, il quale decade in Ra228 che si libera come gas e termina la catena.

- Il Np237 decade in Pa233, il quale decade in U233, il quale decade in Th229, il quale decade in Ra225 e qui ci fermiamo come al solito.

- Il Pu239 decade in U235 e qui rientriamo in una catena già nota!

Se ora vediamo la tabella per il DU sporco nel documento WISE, notiamo che anche qui mancano alcuni nuclidi fra quelli citati.

D'altra parte i nuclidi mancanti sono quelli a lunga vita media (più di 1000 anni) che necessitano di tempi paragonabili alla loro vita media per raggiungere le concentrazioni di equilibrio.

Durante la fase di arricchimento (e impoverimento) dell'Uranio, esso viene teoricamente separato da tutte le altre specie chimiche e quindi anche dai suoi figli radioattivi. L'Uranio ridiventa, in sostanza, "nuovo", come appena creato, e deve ripartire a generare tutti i figli radioattivi della sua catena. Quelli a vita media lunga (come p.es. Th230) non fanno a tempo a formarsi nelle poche decine di anni al massimo, di "età" di questo nuovo uranio, e quindi la loro concentrazione di radioattività al momento dell'utilizzo è molto piccola e può essere trascurata.

Dall'altro lato, occorre anche tenere conto che:

- La chimica di alcuni attinidi come il Torio è assai simile a quella dell'Uranio, quindi non si può assicurare che il Th sia assolutamente assente dall'Uranio "nuovo". Tuttavia il processo di arricchimento dell'Uranio non si basa su proprietà chimiche, bensì su caratteristiche fisiche dei vari isotopi dell'uranio, in particolare sulla maggior leggerezza del U235 rispetto al U238. Allora, al limite, un isotopo come Th230 si ritroverebbe nella parte arricchita e non in quella impoverita del materiale.
- Il DU, una volta "usato" (per esempio, nelle matrici ambientali dei Balcani, ovvero nelle ossa di chi l'ha respirato o ingerito), comincia a generare gli isotopi radioattivi figli a lunga vita media. Tuttavia, gli isotopi Th230 e Th232, che sono i due più importanti fra questi, iniziano ad avere concentrazioni apprezzabili in tempi dell'ordine delle decine di migliaia di anni per il Th230 e di miliardi di anni per il Th232. Allora è evidente che questi tempi non costituiscono un problema nel caso di nuclidi presenti in un corpo umano. Nel caso dell'ambiente, poi, i calcoli svolti riguarderanno l'impegno di dose a 50 anni a causa della prima ora di inalazione del DU: anche in questo caso, il Th si può trascurare.
- A lunghissimo termine (almeno decine di migliaia di anni), la presenza del Th230 potrebbe essere rilevante nel DU, ma si tratta di un problema che esula dallo scopo di questi calcoli.

Le tabelle 1.1 e 1.2 riportano la composizione del DU nelle due versioni "pulito" e "sporco", entrambi all'equilibrio soltanto con i prodotti di decadimento non gassosi e a vita breve; saranno quelle che verranno assunte come riferimento per i calcoli.

1.4 – Pericolosità del Plutonio

La presenza di Plutonio nel DU sporco è stata la più importante causa di preoccupazione da parte dell'opinione pubblica.

Innanzitutto, facendo riferimento alla tabella 1.2, vi è da tenere in conto, come fa notare il documento WISE, che la composizione assunta prevede che tutto il Pu239 e Np237 si ritrovino nel DU e non vengano purificati. Questa è una notevole sovrastima del reale contenuto di Pu e Np. Questi nuclidi si trovano nel DU sporco perché sono quelli dovuti all'uso di Uranio proveniente dal riprocessamento, per produrre nuovo uranio arricchito e impoverito. Noi assumiamo che tutto il Pu e Np che l'uranio "riprocessato" si porta, vada a finire nel DU. Ciò è senz'altro una sovrastima: è probabile che durante l'arricchimento parte del Pu e Np che si trovano nel processo di arricchimento a causa della presenza di Uranio proveniente dal riprocessamento vengano separati.

Assumeremo tuttavia, per semplicità, che Pu e Np ci siano totalmente, salvo poi verificare (si veda in seguito) che il loro contributo alla pericolosità radiologica del DU sia trascurabile (meno del 1%). La loro presenza o meno, in sostanza, non ha grossa rilevanza. Avrà rilevanza invece, come verificheremo, la diversa composizione – in isotopi dell'uranio – fra DU pulito e sporco.

Il Pu può destare forti timori non soltanto per la sua tossicità radiologica, ma anche per la sua tossicità chimica.

Se tuttavia diamo per buone le concentrazioni di Pu calcolate nel documento WISE (che abbiamo visto essere probabilmente sovrastimanti) possiamo calcolare che la presenza di Pu nel DU "sporco" assomma a circa il 4.4e-07% in peso, il che significa 4.4 mg (milligrammi) ogni 1000 kg di DU sporco.

Se partiamo dalle ammissioni della NATO sul numero totale di proiettili al DU sparati nei Balcani, abbiamo che la quantità totale di DU sparato in tutte le campagne dei Balcani corrisponde a circa 15 tonnellate.

Anche raddoppiando prudenzialmente questa cifra, otteniamo una quantità di Pu totale di circa 100 mg; data l'elevata chemiotossicità del Pu, questa non è in assoluto una quantità piccola, ma, sparsa su un territorio vastissimo, dà luogo a concentrazioni ambientali infime. L'autore dubita che, anche considerando impatti localizzati e situazioni particolarmente sfavorevoli, si possa arrivare a concentrazioni ambientali di Pu tali da causare ingestioni o inalazioni rilevanti dal punto di vista della tossicità chimica. La radiotossicità per via di effetti ritardati invece al contrario di quella chimica, non ha soglia: quindi occorre calcolarne il rischio dovuto alla maggior assunzione di dose da radiazioni e successivamente valutare la rilevanza o la trascurabilità di questo rischio.

1.5 – L'uranio e l'ambiente

La concentrazione naturale di Uranio nelle rocce argillose arriva fino a 5 kBq/kg con un rapporto tra i due isotopi di 0.0072. Nel suolo, invece, varia fra 5 e 125 Bq/kg (0,4 – 10 mg/kg) di U238 e tra 0,2 e 5 Bq/kg di

U235 (5 kBq/kg nelle rocce argillose), caratteristica questa che rende la ricerca di DU nell'ambiente particolarmente problematica.

Questa caratteristica è probabilmente quella che consente agli utilizzatori di "farla franca" nei riguardi della ricerca di contaminazione da DU nei suoli. Infatti, nei suoli già correntemente analizzati a fini di monitoraggio, il rapporto tra i due isotopi dell'uranio non è quasi mai quello che si riscontra nelle rocce, ma è più alto per diversi fattori, compresa una diversa mobilità.

L'aggiunta di DU in un suolo nel quale non si conosca il rapporto precedente, non fa altro che portare nuove difficoltà: si può dire che la certezza che un sito sia stato effettivamente bombardato con DU si ha, se non si possono effettuare misurazioni in vicinanza del sito subito dopo il bombardamento, solo mediante con il ritrovamento di bossoli o pezzi di proiettile, anche perché i normali contatori Geiger non sono in grado di accorgersi della presenza di DU. Altrimenti, è necessario fare ricorso a bioindicatori o bioaccumulatori, ovvero a particolari piante o animali che, grazie al loro metabolismo, fungano da punto di accumulo della contaminazione da Uranio.

Si citano a proposito i muschi e licheni, i quali, a causa della loro affinità chimico-biologica verso l'Uranio, possono dare indicazione che un sito è stato bombardato con DU anche a distanza di anni.

Si deve considerare poi che l'area direttamente interessata dal bombardamento, sulla quale è possibile ritrovare i bossoli, è limitata a poche centinaia di metri quadrati.

I valori di concentrazione naturali nelle acque riportati dalla UNSCEAR sono i seguenti: per le acque superficiali: tra 1 e 90 mBq/l (0,1-8 µg/l); per le acque sotterranee tra 1 e 500 mBq/l (0,05-40 µg/l) e per l'acqua di mare circa 40,5 mBq/l (3,3 µg/l).

Sempre l'UNSCEAR¹, nella stessa fonte citata, stima una concentrazione media di uranio in aria di 1 µBq/m³ (60 pg/m³), con valori compresi fra 20 pg/m³ e 76 pg/m³. I valori raccomandati dalla National Institute for Occupational Safety² (USA) sono di 200 µg/m³ per uranio insolubile e 5 µg/m³ per uranio solubile nel caso di esposizione cronica professionale, ed un limite di 600 µg/m³ per esposizione acuta.

1.6 – Metabolismo dell'uranio

Il DU è classificato nella fascia più bassa di rischio fra gli isotopi radioattivi. I rischi legati all'utilizzo di DU sono però anche di tipo chimico^{3,4}. Come tutti i metalli pesanti, l'uranio è tossico, e gli organi maggiormente interessati sono i reni. I potenziali effetti nocivi del DU sono sia tossici, che radioattivi, sono legati alla sua incorporazione all'interno dell'organismo, che può avvenire generalmente in 2 modi: per ingestione o per inalazione.

L'ingestione o inalazione è resa possibile dalla ossidazione dell'uranio metallico, che genera composti volatili: diossido (UO₂), triossido (UO₃) e principalmente ottaossido (U₃O₈) di uranio.

¹ UNSCEAR: *Exposures from natural radiation sources*. 48th UNSCEAR session, Vienna, 1999

² NIOSH: *Pocket Guide to Chemical Hazards*. US Dept. of Health and Human Services, 1994

³ H.H. Harley et Al.: *Depleted Uranium. A Review of the Scientific Literature as it Pertains to Gulf War Illness*. National Defense Research Institute, RAND report, vol.7, 1999

⁴ M. Durante: *Uranio Impoverito nelle armi utilizzate nella guerra del Kosovo: esiste un rischio di contaminazione radioattiva?*. Boll. SIRR, 2 (1999) 6.

L'uranio ingerito o inalato può essere solubilizzato dall'organismo e può depositarsi in diversi organi: si osserva come esso sia normalmente distribuito in tutti i tessuti, sia pure a livelli sensibilmente diversificati.

La quantità totale di uranio riscontrabile in un soggetto normale è sempre inferiore ai 100 µg.

L'uranio inalato, soprattutto le particelle di dimensioni inferiori a 10 µm, si deposita nei bronchi, ed in particolare negli alveoli. L'80% dell'uranio depositato viene però rimosso dai meccanismi mucociliari dei bronchi, e quindi ingoiato, passando nel tratto gastrointestinale, da dove viene rapidamente escreto. Una frazione pari a qualche punto percentuale dell'uranio inalato finisce nel sistema sanguigno, entrandovi dai polmoni, dai linfonodi, o dall'intestino. Per quanto riguarda l'uranio ingerito (ad esempio per deglutizione degli aerosol), una frazione compresa fra 0 e 2.5% viene assorbita dall'intestino, mentre il rimanente viene escreto.

Complessivamente circa il 90% dell'uranio in forma solubile, inalato o ingerito, viene escreto con le urine nel giro di alcuni giorni. Il tempo di dimezzamento effettivo, ovvero il tempo necessario affinché la metà della quantità di radionuclide venga eliminato dall'organo, è quindi completamente dominato dal tempo di dimezzamento biologico, ed è dell'ordine di alcuni giorni.

A causa di questa efficiente eliminazione, l'analisi della concentrazione di uranio nelle urine costituisce una misura sensibile dell'esposizione al metallo, ovviamente soltanto nei primi tempi dopo un'esposizione acuta.

In condizioni normali, ogni individuo elimina dai 50 ai 500 ng di uranio al giorno con le urine.

Nel caso di ossidi con DU, ed è il caso che ci interessa più da vicino, recenti misure mostrano che il tempo di dimezzamento biologico è più lungo di quanto stimato in precedenza, con tempi di dimezzamento compresi fra 1 e 6 settimane a seconda della quantità di materiale inalato e del metabolismo del soggetto¹.

L'uranio che non viene escreto si distribuisce in tutti gli altri organi, principalmente nelle ossa, nei reni, nel fegato, nei polmoni, nel grasso e nei muscoli.

1.7 – Tossicità chimica

Il principale organo interessato per la tossicità dell'uranio è il rene.

Secondo la Health Physics Society, le dosi soglie di inalazione sono di 8 mg per effetti transienti sul rene e 40 mg per danni permanenti. Questi limiti sono basati principalmente su studi eseguiti sui lavoratori delle miniere di uranio o su animali, in cui però si utilizzavano composti solubili dell'uranio.

Per quanto riguarda i reduci della Guerra del Golfo, in nessun caso sono stati riscontrati segnali di disfunzioni renali, né acuti (durante la guerra), né cronici (dal follow-up dei reduci che continua ancora ora). Le analisi delle urine danno oggi valori nella norma (come è ovvio, vista la velocità di escrezione dell'uranio), con l'eccezione dei reduci con frammenti di proiettile all'interno del corpo.

Poiché il rene è l'organo più sensibile all'uranio, la mancanza di patologie renali suggerisce che i livelli di esposizione caratteristici nel caso militare siano talmente bassi da non risultare tossici.

D'altra parte è molto improbabile che l'esplosione di munizioni al DU possano aver provocato concentrazioni di uranio nell'ordine di mg/m³, anche per brevi periodi. All'esterno dei veicoli colpiti il vento ed il successivo fall-out al suolo disperdono molto rapidamente i fumi di qualsiasi materiale. I vapori possono

¹ D.C. Barg e H.L. Grewing: *Inhalation Class for Depleted Uranium at a Major Uranium Applications Facility*. Health Physics, 70 (1996) 85a

essere trasportati anche a chilometri di distanza prima di depositarsi sul terreno dove il metallo potrebbe entrare nella catena alimentare o inquinare la falda acquifera. In questo caso potrebbe esservi un pericolo di contaminazione per la popolazione residente in Iraq.

1.8 – Irradiazione esterna

il DU avrebbe un effetto biologico lieve o nullo se il contatto fosse esterno e poco durevole: infatti la radioattività alfa emessa dal DU non riesce a penetrare nella materia dall'esterno e basta un foglio di carta o lo strato morto della pelle ad attenuarla notevolmente; nel nostro caso, il problema è relativo all'inalazione o ingestione di DU che, contaminando le varie matrici ambientali o biologiche (aria, acqua, terreno, piante, animali, alimenti, etc.), può essere incorporato dall'uomo. In seguito ai bombardamenti con armi al DU, infatti, questo prende fuoco, brucia ad alta temperatura (5000°), si nebulizza, passa nell'ambiente e di qui all'uomo.

Una volta inalato o ingerito, il DU provoca morte cellulare e danni cromosomici; se inalato è soggetto a complesse reazioni chimico-biologiche nel corpo umano. La radiazione alfa che esso emette viene arrestata da uno o due millimetri di pelle morta, il che ne motiva la trascurabilità come sorgente esterna. E' invece sorgente di elevata morte cellulare e danno cromosomico se emessa all'interno del corpo.

1.9 – Irradiazione interna

Il rischio legato all'inalazione di radionuclidi è quello del cancro.

L'uranio insolubile, depositato nei bronchi, emette particelle alfa che colpiscono le cellule basali.

Come per tutti i casi di contaminazione interna la dose equivalente, legata all'inalazione di uranio, è proporzionale alla sua attività, nonché all'energia ed al fattore di qualità delle particelle emesse. Per costituire un rischio radiologico, le quantità di uranio inalate dovrebbero essere talmente elevate da provocare danni acuti al rene (e tale effetto non è mai stato osservato).

Peraltro appare improbabile che nello scenario bellico si siano sviluppati fumi con concentrazioni di uranio dell'ordine dei mg/m^3 , e va tenuto presente che anche $10\text{mg}/\text{m}^3$ di DU corrispondono a circa $150\text{Bq}/\text{m}^3$, un'attività comune in molte abitazioni in Italia a causa del radon, e comunque inferiore alla soglia di attenzione di $200\text{Bq}/\text{m}^3$.

Inoltre l'uranio lasciato sul campo di battaglia viene lentamente trasportato dal vento e respirato, ed il fall-out può contaminare le falde acquifere ed entrare nella catena alimentare.

L'esposizione della popolazione, inclusi i bambini, è sicuramente diversa da quella dei lavoratori delle centrali nucleari, dei minatori e degli stessi soldati.

Sotto questo punto di vista, gli effetti genetici sono quelli che destano maggiore preoccupazione.

La dose esterna prodotta dal DU è stata accuratamente misurata nei carri armati Abrams M1 impiegati nella Guerra del Golfo. Questi carri hanno una corazza in DU e trasportano proiettili di DU. Essi rappresentano, quindi, il punto di massima esposizione a radiazione esterna da DU per i soldati durante la guerra.

Il pericolo maggiore per l'irradiazione esterna è però quello di contaminazione ambientale, vale a dire per le popolazioni residenti dell'Iraq o, adesso, dei Balcani. Fonti irachene hanno denunciato un'elevata incidenza di leucemia nei bambini, malformazioni genetiche ed anemie nella popolazione di Bassora. Tali effetti sono stati

attribuiti proprio al DU lasciato in Iraq. La prima informazione necessaria è quella della quantità di DU che è attualmente depositata in Iraq. Un rapporto riservato dell' Agenzia Atomica Inglese - resa nota da fonti giornalistiche - parla di 14.000 proiettili utilizzati durante la Guerra del 1991. Secondo fonti irachene, sarebbero stati invece sparati circa 940.000 proiettili al DU.

Assumendo questa ipotesi più pessimistica, e considerando che ogni proiettile pesa circa 300 grammi, nell'area bellica compresa tra il Kuwait, l'Arabia Saudita e l'Iraq meridionale vi sarebbero ora 300 tonnellate di DU.

La situazione reale è quella di un grosso numero di proiettili di 300 grammi, disseminati in un'area enorme, per lo più desertica.

Purtroppo notizie precise sulla situazione nell'Iraq meridionale non sono disponibili.

1.10 – Frammenti interni

I frammenti interni di DU, così come le ferite contaminate con polveri di DU, rappresentano un problema del tutto nuovo rispetto a quello della inalazione/ingestione di uranio, ampiamente studiato in letteratura.

Soprattutto dal punto di vista del rischio da radiazione, il caso dei frammenti interni è molto diverso da quello precedente e si avvicina, in qualche modo, alla brachiterapia.

In questo caso il rischio è legato alle particelle alfa ma, contrariamente a quanto avviene nel caso dell'inalazione o dell'ingestione, le masse sono considerevoli e il DU non viene rapidamente espulso dall'organismo. Poiché le particelle alfa emesse hanno un range di soli 28mm in tessuto, solo una piccolissima porzione di tessuto attorno al frammento viene esposta.

Gli unici studi disponibili sono quelli relativi ai reduci della Guerra del Golfo e, in particolare, ai soldati coinvolti in incidenti di "fuoco amico", ovvero erroneamente colpiti dai loro stessi commilitoni.

Durante l'Operazione Desert Storm, 13 soldati sono rimasti uccisi a causa del "fuoco amico" e molti di più feriti. Il numero esatto non è noto, ma in almeno 22 casi sono stati registrati radiograficamente dei frammenti di DU all'interno del corpo dopo l'incidente.

Gli effetti biologici e fisiologici di questi frammenti non sono chiari.

Uno studio congiunto dell'AFRRI (Armed Forces Radiobiology Research Institute), dell' TTRI (Inhalation Toxicology Research Institute) e dell'Università del New Mexico è stato finanziato dal Governo Federale per studiare questo nuovo fenomeno. La ricerca è attualmente in corso.

Risultati preliminari sono stati ottenuti in seguito a studi su ratti nei quali sono stati impiantati frammenti di DU di peso e posizione differente.

Si è osservato un aumento della concentrazione di uranio nel rene, nelle urine e nelle ossa, ma non è stata riportata nefrotossicità.

Sorprendentemente un'elevata concentrazione di uranio è stata misurata anche nell'ippocampo, benché non sia stata osservata neurotossicità.

I partecipanti al programma del Baltimore Medical Center hanno diversi problemi di salute, la maggior parte dei quali legata alle ferite riportate durante la guerra. Tuttavia non sono stati riscontrati né sintomi legati all'esposizione a radiazione ionizzante, né alterazioni nelle funzioni renali. I test psicologici previsti dal

programma riguardano l'attenzione, la memoria e la capacità di risolvere i problemi. Nel suo insieme, il gruppo di reduci ha riportato risultati normali in questi test psicologici. Confrontando questo dato con quelli ottenuti nei ratti all'AFRRI si ha un'indicazione per un potenziale effetto dell'uranio a livello neurocognitivo che rimane da investigare.