

Caratterizzazione dell'Uranio Impoverito e pericolosità per Inalazione

Revisione 2
29 gennaio 2001

Massimo Zucchetti
DENER - Politecnico, corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino
Tel/Fax 011.564.4464/4499. E-mail: zucchetti@polito.it

1. Introduzione

Questa nota tecnica assume che il lettore abbia a conoscenza gli argomenti scientifici principali contenuti in un articolo precedente (di cui alla referenza¹). La nota va a completarne l'analisi per quanto riguarda un aspetto specifico (la caratterizzazione del DU e la presenza di Plutonio).

In questa nota si darà quindi per noto che:

- L'uranio impoverito (DU) è una miscela di nuclidi (U238, U235, U234) con certe percentuali note (si veda piu' avanti il dettaglio in un documento citato)
- Vi sono stati nel mese di gennaio 2001 molti timori e notizie contraddittorie sulla maggior pericolosità del DU a causa della presenza di Plutonio (Pu).
- Se il DU proviene dagli scarti della preparazione del combustibile nucleare (processo di arricchimento), non si trova al suo interno né U236 né Pu239, purché venga utilizzato in questo processo, 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 che proviene 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, ovviamente, voler intendere con ciò che il DU pulito non sia un materiale pericoloso.
- La notizia che il DU usato per i proiettili nei Balcani sia, almeno in parte, "sporco" ha trovato conferma nelle rilevazioni dell'UNEP (United Nations Environment Programme) che ha verificato² la presenza di U236 nel DU.

Il punto di partenza necessario è una informazione corretta sulla composizione del DU. Al di là della miscela di nuclidi principali (i tre isotopi dell'uranio sopra citati), occorrerebbe conoscere, nel caso di DU "sporco", 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, occorrerebbe conoscere quale mix di questi due è stato utilizzato per produrre il munizionamento.

Verrà fatto riferimento al documento del WISE Uranium Project - Fact Sheet (in breve, documento WISE)³, che ha svolto dei calcoli sulla base dei dati diffusi dal DOE (Dept. Of Energy USA), verificati dall'autore come esatti.

Daremo perciò credito a queste notizie:

¹ M. Cristaldi, A. Di Fazio, C. Pona, A. Tarozzi, M. Zucchetti, "Alcune tesi e fatti sull'uranio impoverito (DU), sul suo uso nei Balcani, sulle conseguenze sulla salute di militari e popolazione", in corso di pubblicazione su "Giano" n.36. Vedi anche il sito: <http://www.scienzaepace.it> del comitato "Scienziati e scienziati contro la guerra".

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

³ <http://www.peacelink.it/tematiche/disarmo/u238/documenti/durepe.pdf>

- Il DU "sporco" usato per scopi militari proviene dall'impianto di arricchimento di Paducah (notizia del DOE).
- Le composizioni del DU pulito e del DU sporco sono quelle riportate nel documento citato, a parte la presenza di alcuni prodotti di decadimento non citati, come vedremo in seguito, e sui quali si faranno alcuni ragionamenti.
- La presenza di altri prodotti di fissione nel DU sporco (p.es. Cs137, Sr90 et similia) sebbene non da escludersi a priori, non è tuttavia inclusa in questi calcoli, vista la facilità con la quale queste specie chimiche sono separabili dai transuranici.

Discutere queste assunzioni è ovviamente sempre possibile, ma faremo riferimento ad esse per semplicità, e per illustrare il metodo con il quale caratterizziamo il DU e la sua pericolosità.

Confronteremo perciò la pericolosità radiologica del DU pulito e del DU sporco sulla base di queste assunzioni.

2. Prodotti di decadimento dell'Uranio: il problema dei "figli mancanti".

Ogni nuclide radioattivo decade in un altro nuclide, che può essere radioattivo a sua volta, o 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 (si veda sotto per il proseguimento di questa catena).
- 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, il quale decade in Rn219. Ma il Radon 219, essendo un gas nobile, si libera dalla sostanza solida, si disperde nell'aria, e la catena nel DU "solido" si ferma qui.
- Il U234, poi, porta il suo prodotto Th230, il quale decade in Ra226, il quale decade in Rn222, che essendo gassoso va via dal solido e la catena si ferma qui.

Quindi, nel DU "pulito", oltre al U238, U235 e U234, occorre tener conto della presenza di tutta la catena radioattiva "non gassosa" di questi tre, cioè di: Th234, Pa234m, Th231, Pa231, Ac227, Th227, Ra223, Th230, Ra226.

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.

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

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

Se ora vediamo la tabella per il DU pulito nel 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, dal quale si origina una catena radioattiva non rilevante ai nostri scopi, come chiariremo in seguito
- Il Np237 decade in Pa233, il quale decade in U233, il quale dà origine ad un'altra catena non rilevante.
- 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), o che stanno, nella catena, a valle rispetto ad un nuclide siffatto. I nuclidi con lunghe vite medie necessitano di tempi paragonabili alla loro vita media per raggiungere le concentrazioni di equilibrio⁴.

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 (anche se l'efficienza del processo di separazione potrebbe non essere tale da garantire la totale assenza di una concentrazione residua di alcuni isotopi). L'Uranio ridiventerebbe, in sostanza, "nuovo", come appena creato, ripartendo quindi *ex novo* a generare tutti i figli radioattivi della sua catena. Quelli a vita media lunga (come p.es. Th230), se questo è il caso, 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 dovrebbe essere molto piccola, e può essere trascurata.

Altri prodotti ancora, come tutti i "figli" a lunga vita media di U236, Np237 e Pu239 (p.es. il Th232 e il U233), sono figli di un nuclide "nuovo" (formatosi durante l'uso dell'uranio nei reattori), e quindi è certo che la presenza loro e di tutti i loro "discendenti" sia trascurabile nel DU "sporco" al momento dell'utilizzo militare.

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, ma fisiche dei vari isotopi dell'uranio, in particolare sulla maggior leggerezza del U235 rispetto al U238. Allora, al limite, un isotopo come il Th230 si ritroverebbe nella parte arricchita e non in quella impoverita del materiale.
- Il DU, una volta "in situ" dopo l'uso (p.es., nelle matrici ambientali dei Balcani, ovvero nel corpo di chi l'ha respirato o ingerito), comincia a generare gli isotopi radioattivi figli a lunga vita media. Tuttavia essi iniziano ad avere concentrazioni apprezzabili in tempi dell'ordine delle decine di migliaia di anni o anche più. 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 da noi svolti riguarderanno l'impegno di dose a 50 anni a causa della prima ora di inalazione del DU: anche in questo caso, questi nuclidi si possono trascurare.
- A lunghissimo termine (si ribadisce, almeno decine di migliaia di anni), la presenza di questi "figli a lungo termine" potrebbe divenire rilevante nel DU ambientale, ma si tratta di problemi che esulano dallo scopo di questi calcoli.

Per riassumere, e per chiarire la questione della caratterizzazione del DU, dovremo allora far riferimento alle tabelle 1a e 1b, 2a e 2b.

⁴ La concentrazione e l'attività delle famiglie radioattive è data da un sistema di equazioni differenziali del primo ordine, in ognuna delle quali, avente come incognita la concentrazione di uno dei "membri" della famiglia, c'è un termine di "aggiunta" (il decadimento del nuclide padre) e un termine di sottrazione (il decadimento del nuclide figlio in un altro nuclide nipote). Quest'ultimo termine, ma non il primo, dipende dalla concentrazione del nuclide figlio. Man mano che quest'ultimo inizia a formarsi a partire dal nuclide padre, inizia anche ad aumentare la quantità che nel frattempo decade per trasformarsi nel nipote. Alla lunga, il termine di sottrazione eguaglia quello di aggiunta e si raggiunge appunto "l'equilibrio", nel quale la concentrazione del nuclide figlio non cambia più (tanto se ne forma dal padre, tanto ne decade in nipote). Se a questo punto ("all'equilibrio") calcoliamo quanto è l'attività del nuclide figlio, si verifica essere pari a quella del nuclide padre. Il tempo per raggiungere questo equilibrio dipende dalla velocità di decadimento del nuclide "figlio": in un tempo piccolo rispetto alla vita media del nuclide "figlio", la quantità che se ne forma, in termini di attività, è lontana dal valore massimo "di equilibrio", ed è quindi trascurabile. Allora: se il nuclide figlio ha vita media di pochi minuti, ore, o giorni, va subito "al massimo" cioè raggiunge velocemente la attività massima (pari a quella del nuclide padre), se il nuclide figlio ha vita media di mille anni o più, ci vuole un tempo di quell'ordine prima che la sua attività diventi apprezzabile. In dieci o vent'anni, se ne forma troppo poco per avere una attività apprezzabile.

Le tabelle 1a e 1b caratterizzano un DU "vecchio", nelle due versioni "pulito" e "sporco", entrambe all'equilibrio cioè con tutti i loro prodotti di decadimento non gassosi, inclusi quelli a vita media lunga, purché generati da nuclidi primordiali (U238,U235,U234). Non verranno utilizzate queste composizioni, sebbene alcuni calcoli con il DU "vecchio" saranno riportati per confronto.

Le tabelle 2a e 2b caratterizzano invece il DU "nuovo", nelle due versioni "pulito" e "sporco", entrambi all'equilibrio cioè soltanto con i prodotti di decadimento non gassosi e a vita breve; saranno quelle che verranno assunte come riferimento.

Chi volesse verificare le catene di decadimento radioattivo, può farlo ad esempio al sito:

<http://www.dne.bnl.gov/CoN/index.html>

Tabella 1a - Caratterizzazione del DU pulito - Bq di attività per g di materiale. Concentrazione iniziale di nuclidi padri: U238 (99.8%), U235 (0.2%), U234 (0.000821%). Tutti i nuclidi non gassosi hanno raggiunto l'equilibrio (Uranio "vecchio"), tranne per U234 in qualità di figlio del U238, per l'attività del quale si assume il dato del documento WISE.

Nuclide	Attività specifica	Note
U238	1.243e+4	Nuclide padre
Th234	1.243e+4	In equilibrio con U238
Pa234m	1.243e+4	In equilibrio con U238
U235	1.6e+2	Nuclide padre
Th231	1.6e+2	In equilibrio con U235
Pa231	1.6e+2	In equilibrio con U235
Ac227	1.6e+2	In equilibrio con U235
Th227	1.6e+2	In equilibrio con U235
Ra223	1.6e+2	In equilibrio con U235
U234	1.9e+3	Nuclide padre
Th230	1.9e+3	In equilibrio con U234
Ra226	1.9e+3	In equilibrio con U234
(TOTALE)	4.4e+4	Non è un numero realmente significativo, perché somma attività di nuclidi con caratteristiche diverse

Si legga: 1.243e+4 = 1.243 10⁴

Tabella 1b - Caratterizzazione del DU sporco - Bq di attività per g di materiale. Concentrazione iniziale di nuclidi padri: U238 (99.57%), U235 (0.2%), U234 (0.001939%), U236 (0.22%), Pu239 (4.401e-07 %), Np237 (2.469e-05 %).

Tutti i nuclidi non gassosi, figli del U238, U235 e U234 hanno raggiunto l'equilibrio (Uranio "vecchio"), tranne per U234 in qualità di figlio del U238, per l'attività del quale si assume il dato del documento WISE.

Nuclide	Attività specifica	Note
U238	1.240e+4	Nuclide padre
Th234	1.240e+4	In equilibrio con U238
Pa234m	1.240e+4	In equilibrio con U238
U235	1.6e+2	Nuclide padre
Th231	1.6e+2	In equilibrio con U235
Pa231	1.6e+2	In equilibrio con U235
Ac227	1.6e+2	In equilibrio con U235
Th227	1.6e+2	In equilibrio con U235
Ra223	1.6e+2	In equilibrio con U235
U234	4.48e+3	Nuclide padre
Th230	4.48e+3	In equilibrio con U234
Ra226	4.48e+3	In equilibrio con U234
U236	5.43e+3	Nuclide padre
Np237	6.44e+0	Nuclide padre
Pu239	1.01e+1	Nuclide padre
(TOTALE)	5.7e+4	Non è un numero realmente significativo, perché somma attività di nuclidi con caratteristiche diverse

Si legga: 1.240e+4 = 1.243 10⁴

Tabella 2a - Caratterizzazione del DU pulito - Bq di attività per g di materiale. Concentrazione iniziale di nuclidi padri: U238 (99.8%), U235 (0.2%), U234 (0.000821%). Solo i nuclidi non gassosi e a vita media breve hanno raggiunto l'equilibrio.

Nuclide	Attività specifica	Note
U238	1.243e+4	Nuclide padre
Th234	1.243e+4	In equilibrio con U238
Pa234m	1.243e+4	In equilibrio con U238
U235	1.6e+2	Nuclide padre
Th231	1.6e+2	In equilibrio con U235
U234	1.9e+3	Nuclide padre
(TOTALE)	3.95E+4	Non è un numero realmente significativo, perché somma attività di nuclidi con caratteristiche diverse

Si legga: 1.243e+4 = 1.243 10⁴

Tabella 2b - Caratterizzazione del DU sporco - Bq di attività per g di materiale. Concentrazione iniziale di nuclidi padri: U238 (99.57%), U235 (0.2%), U234 (0.001939%), U236 (0.22%), Pu239 (4.401e-07 %), Np237 (2.469e-05 %).

Solo i nuclidi non gassosi e a vita media breve hanno raggiunto l'equilibrio.

Nuclide	Attività specifica	Note
U238	1.240e+4	Nuclide padre
Th234	1.240e+4	In equilibrio con U238
Pa234m	1.240e+4	In equilibrio con U238
U235	1.6e+2	Nuclide padre
Th231	1.6e+2	In equilibrio con U235
U234	4.48e+3	Nuclide padre
U236	5.43e+3	Nuclide padre
Np237	6.44e+0	Nuclide padre
Pa233	6.44e+0	In equilibrio con Np237
Pu239	1.01e+1	Nuclide padre
(TOTALE)	4.74e+4	Non è un numero realmente significativo, perché somma attività di nuclidi con caratteristiche diverse

Si legga: 1.240e+4 = 1.240 10⁴

3. Reale composizione del DU sporco

Per quanto riguarda il DU sporco, vi è poi 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. Questo è una notevole sovrastima del reale contenuto di Pu e Np.

Verificheremo tuttavia che non è questo il vero problema: la reale maggior pericolosità del DU sporco non deriva dal Pu o Np, ma dalla maggiore quantità di U234 e dalla presenza di U236.

Se anche ammettiamo che Pu e Np siano eliminati (avendo specie chimica diversa dal U), non è possibile pensare invece che siano eliminati U234 e U236, che sono indistinguibili chimicamente dal U238.

Allora, assumeremo per semplicità che Pu e Np ci siano totalmente, salvo poi verificare (si veda in seguito) che il loro contributo alla dose, e quindi alla pericolosità, è trascurabile (meno del 1%). La loro presenza o meno, in sostanza, non ha grossa rilevanza, tranne che in un caso (si veda più avanti).

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 effetti ritardati), invece, non ha (al contrario di quella chimica) 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.

4. Calcoli di dose

Per calcolare la pericolosità di un nuclide, occorre stimare la dose all'uomo (in realtà l'equivalente di dose efficace o EDE) supponendo certi scenari di esposizione.

Rifacendoci alle assunzioni nel documento sul DU degli Scienziati contro la guerra (ref.1) nel punto 1, calcoleremo la pericolosità per questo scenario-tipo:

- Via di esposizione: Inalazione per un'ora (+ Irraggiamento esterno, che risulterà trascurabile)
- Rilascio di 1 grammo di materiale ad altezza suolo.
- Calcoli di dispersione atmosferica con modello di Pasquill (non con dispersione omogenea, quindi) e settore sfavorevole (individui più esposti).
- Distanza: 1 km dal rilascio.
- Modello a compartimenti del corpo umano, secondo raccomandazioni ICRP.

Per calcolare i risultati per un missile Cruise (p.es., 20 kg di DU) o per un attacco ad un carro armato (proiettili per 10 kg di DU), basta moltiplicare i risultati ottenuti proporzionalmente.

A noi, qui, interessa confrontare il DU pulito e quello sporco.

Trascuriamo l'ingestione attraverso la catena alimentare e la contaminazione delle varie matrici ambientali, etc. etc.

All'uopo, verrà utilizzato il codice di dose alla popolazione GENII. Si tratta di un codice elaborato da un laboratorio statunitense, riconosciuto ed utilizzato a livello internazionale. Si veda la referenza: B.A. Napier et al. (1990), GENII - *The Hanford Environmental Radiation Dosimetry Software System*, PNL-6584, Pacific Northwest Laboratories (USA).

5. Risultati, analisi e conclusioni

Il risultato principale è riportato qui sotto:

- **DU sporco: $1.1e-07$ Sv/g**
- **DU pulito: $6.9e-08$ Sv/g**

I numeri sono la EDE impegnata ("dose") in tutta la vita in seguito ad una ora di inalazione, stando a distanza di un chilometro. Ovviamente, variando la distanza alla quale ci si trova, i numeri si modificano.

La dose impegnata massima si ha ovviamente nel primo anno dopo l'inalazione:

- DU sporco: $2.3e-08$ Sv/g
- DU pulito: $1.4e-08$ Sv/g

Si può verificare come l'irraggiamento esterno, pur incluso nel modello per completezza, è trascurabile rispetto all'inalazione: questo è noto, essendo questi nuclidi principalmente degli emettitori di particelle alfa.

Vogliamo però rispondere ad altri due quesiti importanti:

- Quali nuclidi contribuiscono maggiormente alla dose?
- Quali sono gli organi più esposti?

Alla prima domanda troviamo risposta nelle Tabelle 3.1 e 3.2, che considera il contributo per singolo nuclide. Più interessante è la Tabella 3.3, che raggruppa il contributo alla dose per "famiglia", cioè per "nuclide padre più tutti i discendenti".

Alla seconda domanda troviamo risposta nella Tabella 4.

Tabella 3.1 - Nuclidi responsabili della dose (EDE) per DU pulito. Sv per g rilasciato.

Nuclide	DU pulito	Note
U238	5.8e-8 (84%)	Nuclide padre
U234	1.0e-8 (15%)	Nuclide padre
U235	8.3e-10 (1.2%)	Nuclide padre
Th234	1.7e-11	Figlio del U238
Pa234	1.0e-12	Figlio del U238
Altri	Trascurabili	
Totale	6.9e-8	

Tabella 3.2 - Nuclidi responsabili della dose (EDE) per DU sporco. Sv per g rilasciato.

Nuclide	DU sporco	Note
U238	5.7e-8 (52%)	Nuclide padre
U236	2.8e-8 (25%)	Nuclide padre
U234	2.5e-8 (23%)	Nuclide padre
U235	8.3e-10	Nuclide padre
Np237	1.7e-10	Nuclide padre
Pu239	1.2e-10	Nuclide padre
Th234	1.7e-11	Figlio del U238
Pa234	1.0e-12	Figlio del U238
Altri	Trascurabili	
Totale	1.1e-7	

Tabella 3.3 - Nuclidi maggiormente responsabili della dose, raggruppati per famiglia (nuclide-padre + tutti i discendenti). DU pulito e DU sporco. Sv per g rilasciato

Nuclide padre + famiglia	DU pulito	DU sporco
U238 e figli	5.8e-8 (84%)	5.7e-8 (51%)
U235 e figli	8.3e-10 (1.2%)	8.3e-10 (0.8%)
U234 e figli	1.0e-8 (15%)	2.5e-8 (23%)
U236 e figli	-----	2.8e-8 (25%)
Np237 e figli	-----	1.7e-10 (0.2%)
Pu239 e figli	-----	1.2e-10 (0.1%)
TOTALE	6.9e-8	1.1e-7

Tabella 4. - Dose ai singoli organi, ovvero, organi più esposti. DU pulito e DU sporco, Sv per g rilasciato.

Organo	DU pulito	DU sporco	DU (sporco)/(pulito)
Polmoni	5.7e-7	9.3e-7	1.6 (160%)
Reni	1.1e-10	1.8e-10	1.6 (160%)
Superficie delle Ossa	3.7e-11	5.1e-9	140
Midollo Osseo Rosso	3.7e-12	4.1e-10	11
Gonadi	8,7e-13	4.6e-11	53
Intestino	1.3e-10	3.4e-10	2.6
Altri organi	---	---	
Totale *	6.9e-8	1.1e-7	1.6 (160%)

* Per ottenere la dose totale (EDE), occorre moltiplicare la dose ad ogni organo per il suo opportuno fattore di peso.

L'analisi dei risultati ci porta a queste conclusioni:

- La pericolosità da inalazione del DU sporco è fra una volta e mezza e il doppio di quello pulito. L'incremento della cifra totale (160%) è dovuto totalmente all'aumento della dose da inalazione sui polmoni. Resta da determinare quanto DU pulito e quanto sporco sono stati utilizzati in realtà dalla NATO per produrre i munizionamenti.

DU pulito

- Per il DU pulito, il 84% della dose totale deriva dal U238 e dai suoi figli.
- Nel DU pulito, circa il 15% della dose totale deriva dalla famiglia del U234, che quindi non è da trascurare.

DU sporco

- Per il DU sporco, la maggior parte della maggior dose rispetto al DU pulito deriva dal maggior contenuto di U234 e dal U236 (48% del totale)
- In questo caso, solo più il 51% della dose deriva dal U238 e figli.
- Il contributo del Pu239 alla dose totale è trascurabile (0.1%). Non ha importanza quindi, ai fini della dose totale, se esso sia stato o meno eliminato dal DU in fase di riprocessamento. Quello che conta è la presenza del U236 e del U234. Ciò trova una eccezione parziale nel caso della dose midollare (Tab.4, si veda più avanti la spiegazione), per la quale il contributo del Pu239 non è trascurabile.
- Il contributo del Np237 e figli alla dose totale è piccolo (0.2%). Stesso discorso del Pu239, a livello di dose totale. Il suo contributo alla dose midollare è però predominante (si veda più avanti).

Organi più colpiti

- Gli organi più colpiti dalla inalazione di DU sono di gran lunga i polmoni, e questo pare del tutto naturale, viste anche le assunzioni fatte (un'ora di inalazione).
- Esposti risultano anche reni ed intestino, e questo traccia la via dell'uranio "eliminato" attraverso l'escrezione a breve termine.
- Vi sono però molti altri organi esposti, fra i quali, in particolare, la superficie delle ossa ed il Midollo Osseo Rosso (che è il produttore degli elementi figurati del sangue ed il cui malfunzionamento causa appunto la leucemia).
- Il valore relativamente piccolo delle dosi a questi organi non deve stupire né rassicurare: una piccola parte del DU viene ritenuto nelle ossa e riesce ad irraggiare il midollo osseo rosso.
- Se poi si confrontano i valori di dose fra DU sporco e pulito, si notano grandissimi incrementi del valore di dose a certi organi, in particolare le ossa ed il midollo osseo rosso, oltre alle gonadi (importanti per determinare il carico genetico).
- In particolare, per quanto riguarda il midollo osseo rosso, si vede che il maggior contributo alla dose midollare nel DU sporco è dovuto al Np237 (73%), che ha quindi importanza in questo particolare aspetto. Un restante 24% è poi dovuto al Pu239 che quindi, per questo aspetto, non è trascurabile.
- Questi risultati (dosi non trascurabili al midollo osseo rosso) pongono fine al preteso non-collegamento fra inalazione del DU e leucemia, in linea generale.
- Restano da chiarire molti altri aspetti, sui quali l'autore si dichiara non competente, che consentano di legare in modo più o meno certo i casi di leucemia osservati fra i militari italiani in queste settimane e l'esposizione al DU.

6. Calcoli con DU "vecchio" (con prodotti di decadimento all'equilibrio)

Vista l'incertezza riguardante - in alcuni casi - l'effettivo grado di efficienza nel processo di separazione per le diverse specie e relativi isotopi, sono stati effettuati anche dei calcoli utilizzando le composizioni delle Tabelle 1a e 1b, cioè assumendo l'Uranio "vecchio", in equilibrio con tutti i suoi prodotti di decadimento non gassosi, inclusi quelli a vita media lunga, purché originati da nuclidi primordiali (U234, U235, U238).

La differenza, in sostanza, sta principalmente nel contributo del Th230, che ora viene preso in considerazione.

I risultati sono visibili in tabella 5, per quanto riguarda la dose totale. Nella seconda colonna sono riportati i valori già calcolati per il caso di riferimento (Uranio "nuovo")

Tabella 5 - Dose totale (EDE) da un'ora di inalazione, 1000 m di distanza, Sv per rilascio di 1 g

	Uranio "nuovo" (Riferimento. Comp. Tab 2a,b)	Uranio "vecchio" (Comp. Tab 1a,b)
DU pulito	6.9e-8	1.0e-7
DU sporco	1.1e-7	1.7e-7

Si vede come i valori di pericolosità aumentino di circa il 45% nel caso del DU pulito (dall'arricchimento) e del 70% nel caso del DU sporco (dal riprocessamento).

Ringraziamento: L'autore ringrazia Luca Boschetti, laureando in Ingegneria Energetica al Politecnico di Torino, per l'aiuto nei calcoli di dose.