

Una pesante eredità della guerra fredda: le enormi scorte di materiali fissili con potenzialità militari

Alessandro Pascolini*

1. Il problema

La folle corsa alle armi nucleari che ha caratterizzato il confronto militare nella guerra fredda ha portato non solo alla produzione di un numero esorbitante di ordigni di vario tipo e potenza (70.000 americani, 55.000 russi, 1.200 inglesi, 1.260 francesi e 750 cinesi¹) e di una panoplia di sistemi per il loro impiego in ogni contesto militare possibile (o solo ipotizzabile), ma anche alla creazione di articolati complessi per la ricerca, lo sviluppo e la produzione di tali armamenti, in grado di fornire anche le enormi quantità di esplosivi nucleari (uranio arricchito e plutonio) richieste dai programmi militari.

Questi materiali costituiscono, come vedremo, uno dei più gravi problemi attuali per la sicurezza mondiale e la loro eliminazione e messa in sicurezza dovrebbe avere la massima priorità nell'agenda internazionale e dei singoli Paesi.

Le armi nucleari si distinguono in due classi, a seconda del processo fisico principale fonte di energia:

– armi a fissione (bombe atomiche o bombe A), basate sulla scissione in due parti di nuclei atomici pesanti (essenzialmente uranio o plutonio) prodotta a seguito dell'assorbimento di un neutrone;

– armi a fusione (bombe all'idrogeno o bombe H) caratterizzate dal processo opposto, la fusione di nuclei leggeri (isotopi dell'idrogeno) in nuclei più pesanti².

Anche questi ultimi ordigni utilizzano un primario a fissione per generare l'energia e la pressione necessarie all'ignizione del secondario a fusione; pertanto tutte le armi nucleari impiegano esplosivi fissili, plutonio o uranio di qualità militare (*weapon grade plutonium* - WGP o *weapon grade uranium* - WGU)³.

Se le armi nucleari a uranio usano essenzialmente WGU, esplosioni nucleari poco efficienti sono già possibili con uranio conte-

* Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova e Sezione di Padova dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare; Docente di Scienze per la Pace nel Corso di Laurea Magistrale in Istituzioni e Politiche dei Diritti Umani e della Pace, Università di Padova.

¹ R.S. Norris, H.M. Kristensen, *Nuclear Pursuits*, in «Bull. Atom. Sci.», 59, 2003, pp. 71-72.

² Informazioni essenziali sulle armi nucleari si trovano, ad esempio, in G. Charpak, R.L. Garwin, V. Journé, *De Tchernobyl en Tchernobyls*, Odile Jacob, Paris, 2005.

³ Altri materiali fissili prodotti artificialmente in reattori nucleari sono stati provati come esplosivi: uranio-233 (massa critica 16 kg), nettunio-237 (massa critica 73 kg), americio-241 (massa critica 60 kg). Non risulta però siano stati utilizzati per armi nucleari effettive. La notazione usata per i vari nuclei atomici (ad esempio uranio-233) serve a distinguere gli isotopi degli elementi chimici, precisando il numero totale di protoni e neutroni che formano la sostanza in questione (233 nel caso ad esempio).

nente almeno il 20% dell'isotopo 235 (*highly enriched uranium* - HEU); tutto l'HEU è quindi potenzialmente pericoloso. HEU viene utilizzato, con vari tassi di arricchimento, oltre che per bombe, per i motori delle navi atomiche, in particolare dei sommergibili nucleari, e per attività civili: essenzialmente in reattori di ricerca e per produrre isotopi radioattivi a scopi medici.

Altro materiale fissile potenzialmente utilizzabile per armi è costituito dal plutonio che viene continuamente prodotto nei reattori nucleari civili e rimane nel combustibile esausto (*reactor grade plutonium* - RGP): può finire nelle scorie nucleari o venir estratto per essere utilizzato in altre centrali atomiche.

La produzione di materiali fissili con tali caratteristiche è fra le tecnologie più complesse e costose mai affrontate: il plutonio è una specie chimica non esistente in natura e il WGU è costituito per oltre il 90% dalla componente rara uranio-235, presente nell'uranio naturale solo per lo 0,7%. Nonostante questi costi e difficoltà, negli ultimi sessanta anni sono state prodotte enormi quantità di tali materiali fissili, oltre 2.500 tonnellate di HEU e più di 500 tonnellate di plutonio separato dal combustibile nucleare esausto, sufficienti per oltre 160.000 armi nucleari.

Circa 2.400 ordigni nucleari sono stati distrutti dal 1945 in poi nelle esplosioni di prova, nell'atmosfera o sotto terra⁴, per una potenza equivalente a quella di oltre 550 milioni di tonnellate di tritolo (550 Mt)⁵, eliminando così qualche decina di tonnellate di materiali fissili militari.

La fine della guerra fredda ha portato a una significativa diminuzione delle armi nucleari operative, ma la situazione attuale vede comunque schierate e pronte all'uso oltre 10.100 testate complessive, con ulteriori 15.100 ordigni mantenuti in riserva o in fase di radiazione, avendo incluso nel computo anche le armi dei nuovi Paesi nucleari, Israele, India, Pakistan e Corea del Nord⁶.

Va osservato che nel processo di smantellamento degli ordigni nucleari, e nella disattivazione dei reattori navali e dei reattori di ricerca, i materiali fissili non si degradano naturalmente a elementi non fissili, ma conservano le loro potenzialità distruttive. Solo una piccolissima frazione si trasforma per processi radioattivi spontanei in altre specie nucleari⁷; tali decadimenti sono infatti lentissimi: per la trasformazione di metà dei materiali (tempo di dimezzamento) passano oltre 700 milioni di anni per l'uranio-235 e 24.400 anni per il plutonio; quindi in quaran-

⁴ Gli USA hanno eseguito 1.125 esplosioni nucleari per 179 Mt, la Russia 969 per 281 Mt, il Regno Unito 45 per 9 Mt, la Francia 210 per 14 Mt e la Cina 45 per 23,4 Mt (R.S. Norris, H.M. Kristensen, *Nuclear Pursuits*, cit.).

⁵ Coerentemente con l'uso militare, la potenza delle armi nucleari viene misurata esprimendo l'energia generata in termini di migliaia di tonnellate (kiloton o kt) di tritolo (TNT) necessarie per produrre esplodendo la stessa energia, ovvero di milioni di tonnellate di TNT (megaton o Mt); 1 kt corrisponde all'energia della fissione di 56 g di uranio-235 ($1,45 \times 10^{23}$ nuclei), che vale, nelle varie unità, 12^2 kcalorie, $4,2 \times 10^{12}$ Joule, $1,15 \times 10^6$ kWh (kilowattora) o $3,97 \times 10^{23}$ Btu (British thermal unit).

⁶ S.N. Kile, V. Fedchenko, H.M. Kristensen, *World Nuclear Forces*, in *SIPRI Yearbook 2008: Armaments, Disarmament and International Security*, Oxford University Press, Oxford, 2008.

⁷ La radioattività naturale è il processo in cui alcuni nuclei atomici si trasformano spontaneamente emettendo radiazioni energetiche; il decadimento radioattivo avviene in modo casuale con una probabilità fissa caratteristica. Il tempo di dimezzamento misura il tempo necessario affinché decada il 50% dei nuclei radioattivi: ad esempio, dopo 10 tempi di dimezzamento rimane meno di un millesimo della quantità iniziale; i tempi di decadimento variano enormemente a seconda delle specie nucleari, da milionesimi di secondo a miliardi di anni.

t'anni una tonnellata di plutonio perde solo 1,15 kg e una di uranio militare meno di 40 mg.

Tutto questo materiale dalle terribili potenzialità belliche incombe oggi sull'umanità, e può restare per tempi geologici; il suo controllo è critico per il disarmo nucleare, il blocco della proliferazione e la prevenzione del terrorismo nucleare; pone inoltre rischi per l'ambiente e la salute pubblica se non è conservato in strette condizioni di sicurezza. La presente complessità delle relazioni internazionali, i rischi crescenti che nuovi Paesi acquisiscano armi nucleari e la minaccia del terrorismo rendono sempre più urgente trovare soluzioni scientifiche e politiche per l'eliminazione dei materiali fissili sensibili, la loro conversione in forme che ne garantiscano la distruzione o comunque la trasformazione in modo da non poter servire per nuove armi.

Va d'altronde osservato che la produzione di HEU e WGP ha richiesto l'impiego di ingenti risorse e che in essi è concentrata una enorme quantità di energia, che sembra assurdo sprecare in un mondo disperatamente alla caccia di nuove fonti. Tuttavia l'utilizzo di questo potenziale economico ed energetico deve venire attentamente controbilanciato dalla considerazione dei gravi rischi di creazione di nuovi ordigni nucleari.

Anche a seguito dei richiami preoccupati da parte della comunità scientifica e di iniziative dell'Agenzia atomica internazionale di Vienna (IAEA), il problema delle enormi quantità di plutonio e di HEU esistenti e dei rischi per la sicurezza mondiale è stato recepito, e importanti iniziative sono state intraprese, essenzialmente per l'HEU. Tuttavia manca un'adeguata priorità dell'agenda politica internazionale, anche perché non sostenuta dalla necessaria attenzione e pressione da parte dell'opinione pubblica. In questo lavoro, precisate le caratteristiche dei materiali fissili di qualità militare e le tecniche di produzione, si farà il punto sulla loro entità e collocazione attuale e sui rischi che comportano per la sicurezza mondiale, per poi esaminare i metodi e le prospettive per la loro eliminazione.

2. Il processo di fissione nucleare

L'energia emessa in una singola fissione nucleare è minima a livello macroscopico, ma se una massa significativa di materiale fissile subisce fissione contemporaneamente l'energia liberata è

enorme: in 1 kg di uranio-235 ci sono $2,58 \times 10^{24}$ nuclei e nella loro fissione simultanea si produce un'energia di circa 20 GWh (gigawattora) equivalente a circa 18 kton; nella produzione di energia in modo controllato, una centrale elettronucleare mantiene la potenza di 1 GWe (gigawattelettrico) «bruciando» circa 47 mg di uranio-235 al secondo, per un totale di 1,3 t all'anno. La fissione dell'uranio e del plutonio è un processo indotto da neutroni e quindi la produzione effettiva di energia richiede un numero adeguato di neutroni, superiore a quello dei nuclei da fissionare, dato che solo una parte dei neutroni genera una fissione; non esiste la possibilità di fornire un tale impulso di neutroni dall'esterno, ma è la fissione stessa che produce nuovi neutroni che possono indurre via via nuove fissioni in un processo di moltiplicazione geometrica (reazione a catena).

Nell'uranio-238 i neutroni sono prevalentemente assorbiti senza produrre fissione, per cui tale isotopo non è in grado di sostenere una reazione a catena; invece per l'uranio-235 e il plutonio-239 la fissione è circa 4 volte più frequente della cattura neutronica. Per questi isotopi la probabilità di fissione aumenta notevolmente (quasi 300 volte per l'uranio-235 e quasi 400 volte per il plutonio-239) se i neutroni prodotti nella fissione vengono rallentati alla velocità di agitazione termica: devono così passare da una velocità iniziale di circa 20.000 km/s (neutroni veloci, energia di 2 MeV) a una inferiore a 2 km/s (neutroni termici, energia di 0,025 eV). I neutroni possono perdere gradualmente la loro energia in una serie di urti con i nuclei di elementi leggeri, acqua, acqua pesante o grafite, impiegando qualche microsecondo; tali elementi vengono detti moderatori⁸.

I reattori elettronucleari correnti si basano su un drastico rallentamento dei neutroni per poter avere reazioni a catena anche con uranio naturale, usando come moderatore acqua pesante o grafite, o con un ridotto arricchimento (fra il 2,5 e il 5%, di uranio-235, *low-enriched uranium* - LEU) in moderatori ad acqua: la reazione viene mantenuta in condizione critica o leggermente sottocritica con opportuni sistemi di controllo⁹.

Per produrre un'esplosione mediante una bomba nucleare occorre che, a differenza dei reattori, la reazione si mantenga supercritica fino alla fissione simultanea di una massa significativa, vincendo l'espansione del materiale via via che si riscalda: tutto deve avvenire in circa 0,5 μ s, un tempo molto più breve di

⁸ L'uranio-238 non può venire utilizzato come moderatore poiché, quando l'energia dei neutroni scende sotto i 0,2 MeV (e quindi ben prima di rallentare a velocità termica) la probabilità che esso li assorba senza produrre fissione diviene altissima rispetto a ogni altro processo.

⁹ Informazioni essenziali sui reattori nucleari si trovano, ad esempio, in A. Pascolini, *Il disastro di Chernobyl e le iniziative internazionali per la sicurezza nucleare. Parte prima: l'incidente*, in «Pace e diritti umani», III, 2, 2006, pp. 9-45.

quello richiesto per il rallentamento dei neutroni della prima generazione. Pertanto, in una bomba occorre utilizzare i neutroni veloci come sono emessi e, per compensare la bassa frequenza di fissioni prodotte dai neutroni veloci, bisogna usare o uranio estremamente arricchito nell'isotopo 235 o plutonio-239.

Per evitare che la reazione si spenga a causa della perdita di neutroni attraverso la superficie del materiale fissile occorre una quantità di materiale superiore a un certo valore minimo (massa critica). La massa critica dipende dalla purezza del materiale fissile, dal tasso di arricchimento, nel caso di uranio, e dalla sua struttura fisico-chimica. La massa critica può venire molto ridotta circondando l'esplosivo con del materiale che rifletta indietro i neutroni che fuoriescono e ritardi l'espansione del materiale attivo. Per esempio, uno spesso strato di uranio naturale attorno al nucleo di una bomba riduce la massa critica di una sfera di uranio-235 puro da 52 a 15 kg e di plutonio-239 da 10 a 4 kg. La massa critica di una sfera di uranio arricchito al 20% con un riflettore di 5 cm di berillio è di 400 kg, mentre tassi di arricchimento inferiori richiedono quantità proibitive e non permettono in pratica la produzione di un'arma.

3. L'uranio arricchito

L'uranio naturale e il LEU delle centrali elettronucleari non comportano rischi di proliferazione militare o di terrorismo nucleare, mentre la soglia di attenzione è stata suggerita dalla IAEA e accettata universalmente per uranio arricchito al 20%, appunto l'HEU. Da qui la particolare rilevanza degli impianti di arricchimento isotopico.

Il processo di arricchimento dell'uranio nell'isotopo 235, necessario sia per il LEU che per l'HEU, è estremamente difficile e delicato. I due isotopi, uranio-235 e uranio-238, hanno lo stesso comportamento chimico e solo metodi fisici basati sulla differenza di massa possono essere efficaci; tale differenza è minima, 3 parti su 238, e quindi si richiedono necessariamente tecniche estremamente accurate. Un impianto di arricchimento viene alimentato con uranio naturale e produce da una parte uranio arricchito e dall'altra uranio impoverito, che contiene fra 0,2 e 0,3% di uranio-235.

Molti metodi sono stati studiati e utilizzati, tutti enormemente

¹⁰ L'arricchimento per diffusione gassosa è basato sul fatto che in un gas le molecole più leggere si muovono con velocità media maggiore di quelle più pesanti. Si fa diffondere l'esafuoruro di uranio sotto forma di gas compresso attraverso un diaframma poroso, con pori del diametro di qualche centesimo di micron: le molecole di uranio-235 più veloci hanno maggiore probabilità di passare attraverso i pori del diaframma. Il gas che fuoriesce, arricchito leggermente (tipicamente un fattore 1,003) viene nuovamente compresso e il processo si ripete. Per ottenere uranio militare sono necessari 4.000 stadi accoppiati in un modo particolarmente complesso. Vedi R. Kokoski, *Technology and the Proliferation of Nuclear Weapons*, SIPRI, Stockholm, 1995.

¹¹ Le centrifughe per la separazione dell'uranio sono composte di un lungo rotore in un contenitore cilindrico in cui viene fatto il vuoto per ridurre al minimo gli attriti; un motore elettrico fa ruotare la centrifuga a velocità fra 300 m/s e 800 m/s, in modo da generare una forza centrifuga centinaia di migliaia di volte la gravità; le molecole di esafuoruro di uranio si separano a seconda della loro massa, e quelle con l'isotopo 238 vengono spinte all'esterno; un gradiente termico induce una circolazione assiale del gas che muove le molecole leggere verso l'alto, aumentando la separazione delle due componenti e incrementando l'efficienza della centrifuga. L'arricchimento prodotto da una singola centrifuga può raggiungere un fattore fra 1,2 e 1,5, e il processo viene ripetuto a più stadi in una cascata di migliaia di centrifughe. Le centrifughe più avanzate usano materiali speciali e i rotori sono tenuti sospesi nel vuoto da campi magnetici. Vedi R. Kokoski, *Technology and the Proliferation of Nuclear Weapons*, cit.

¹² International Panel on Fissile Material, *Global Fissile Material Report 2008: Scope and Verification of a Fissile Material (Cutoff) Treaty*, Princeton University, Princeton, 2008.

lenti e dispendiosi, sia per la costruzione dell'impianto che per i consumi energetici; attualmente due sono le tecniche in uso: la diffusione gassosa e la centrifugazione. Entrambi i processi utilizzano un composto gassoso dell'uranio, l'esafuoruro di uranio, in quanto il fluoro possiede un unico isotopo e pertanto le differenze di massa del composto sono dovute unicamente all'uranio; alla fine del processo l'esafuoruro di uranio arricchito viene convertito in forma metallica. Per il combustibile di alcuni reattori veloci russi l'HEU viene prodotto nella forma di biossido di uranio.

La diffusione ha dominato la scena dalla fine della seconda guerra mondiale agli anni Ottanta, con alcuni impianti ancora attivi in USA e in Francia¹⁰. La tecnica oggi dominante è la centrifugazione, che richiede impianti più compatti e consuma quaranta volte meno energia della diffusione, a parità di resa¹¹. Gli impianti a centrifugazione richiedono la massima attenzione per prevenire la proliferazione nucleare, dato che uno stesso impianto può produrre in un anno, a partire da 150 t di uranio naturale, o 20 t di LEU al 4% (il consumo annuo di un reattore da 1 GWe) o 550 kg di HEU al 93%, sufficiente per 26 bombe; nel primo caso la centrifugazione procede in una cascata a 10 stadi, nel secondo a 32 stadi.

Nel mondo vi sono 22 impianti di arricchimento, in funzione o in costruzione: in Brasile, Cina, Francia, Germania, Giappone, India, Iran, Olanda, Pakistan, Russia, Regno Unito e USA; quelli in India e Pakistan sono sotto il controllo militare, tutti gli altri per applicazioni civili. Cina, Francia, Russia, Regno Unito e USA hanno sospeso da quasi 20 anni la produzione di HEU; solo il Pakistan si ritiene produca HEU per armi nucleari e l'India per reattori navali.

Una stima dell'HEU attualmente esistente negli arsenali militari o in attesa di venire diluito supera le 1.600 t, sufficienti per oltre 65.000 armi nucleari¹².

Oltre che per le armi, significative quantità di HEU sono state prodotte e impiegate per la propulsione navale. Le caratteristiche dei reattori navali sono ancora mantenute segrete; comunque si sa che sommergibili e portaerei americane usano HEU fino al 97,3%, come pure i sommergibili inglesi, mentre la Russia impiega HEU dal 21% al 45% per i sommergibili e per gli incrociatori missilistici Kirov, e fino al 90% per la flotta dei rompighiaccio (attualmente ridotto al 40%) e la nave trasporto

¹³ *Highly Enriched Uranium: Striking a Balance. A Historical Report on the United States Highly Enriched Uranium Production, Acquisition, and Utilization Activities from 1945 through September 30, 1996*, Draft, Rev. 1, U.S. Department of Energy, January 2001, Washington (reso pubblico nel 2006).

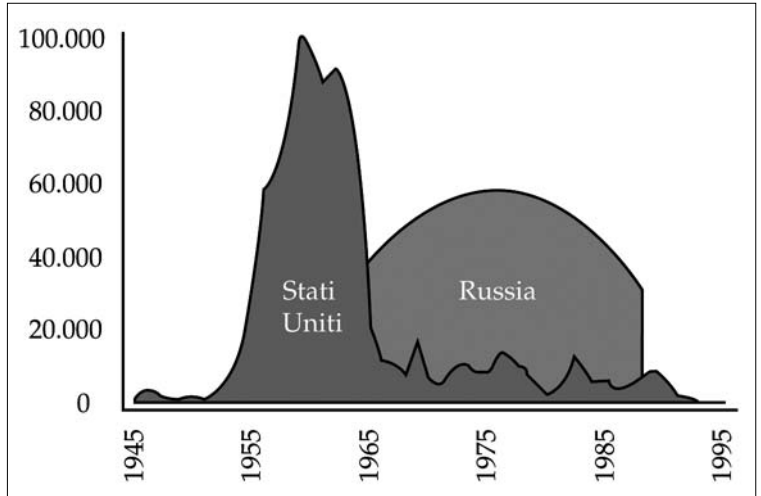
¹⁴ O. Bukharin, *Analysis of the Size and Quality of Uranium Inventories in Russia*, in «Science & Global Security», 6, 1996, pp. 59-77.

¹⁵ C. Ma, F.N. von Hippel, *Ending the Production of Highly Enriched Uranium for Naval Reactors*, in «The Nonproliferation Review», 8, 2001, pp. 86-101.

¹⁶ L'accordo bilaterale START (*Treaty on the Reduction and Limitations of Strategic Offensive Arms*), firmato nel 1991 ed entrato in vigore nel 1994, impone limiti ai sistemi di vettori di testate nucleari a disposizione di Russia e USA e cesserà nel 2009. Lo START II (*Treaty on Further Reduction and Limitations of Strategic Offensive Arms*) prevedeva un tetto di 3.000-3.500 testate strategiche operative per ciascuno dei due Paesi; firmato nel 1993 e ratificato, non è mai entrato in vigore non essendo stati scambiati i protocolli di ratifica; nel 2002 la Russia ha dichiarato di non sentirsi vincolata dal trattato a seguito del ritiro americano dal trattato antimissile balistico. Vedi D. Lockwood, *Nuclear Arms Control, in SIPRI Yearbook 1993: Armaments, Disarmament and International Security*, Oxford University Press, Oxford, 1993.

¹⁷ Il *Treaty on Strategic Offensive Reductions (SORT)*, firmato nel 2002 ed entrato in vigore fra Russia e USA nel 2003, prevede che al 31 dicembre 2012 ciascun Paese non disponga di più di 2.200 testate strategiche. Non sono previste specifiche forme di controllo, né è definito un percorso preciso per le necessarie riduzioni, lasciate completamente libere. Vedi S.N. Kile, *Nuclear Arms Control, Non-Proliferation and Ballistic Missile Defence*, in *SIPRI Yearbook 2003: Armaments, Disarmament and International Security*, Oxford University Press, Oxford, 2003.

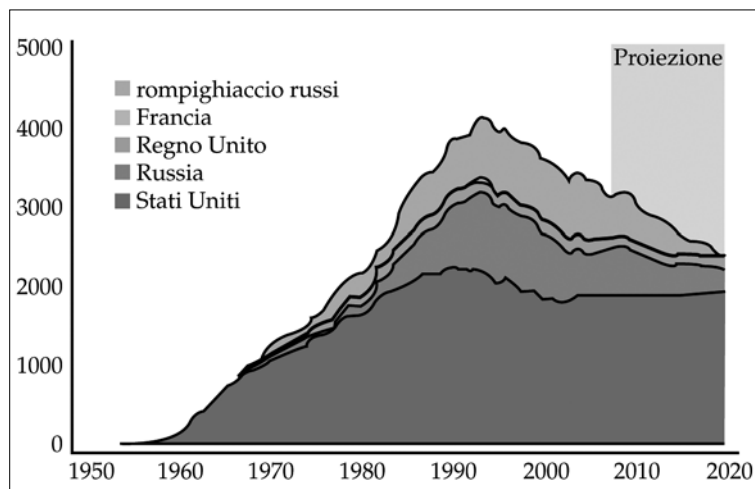
Figura 1. Evoluzione storica della produzione di HEU in Russia e negli Stati Uniti, in kilogrammi; i dati relativi agli USA si basano sulla dichiarazione del governo americano¹³, quelli russi sono desunti da stime sulla capacità produttiva¹⁴



artica e l'India usa HEU dal 30 al 45% per il sommergibile in allestimento e per altri due pianificati; la Francia sta convertendo i reattori dei sommergibili da HEU al 90% a reattori ad acqua con LEU; i sommergibili cinesi usano LEU e così pure il sommergibile brasiliano in costruzione¹⁵.

Verso la fine della guerra fredda URSS e USA usavano annualmente circa 2 t di HEU ciascuno per le flotte nucleari: attualmente la Russia ha circa dimezzato il consumo, concentrato soprattutto per i rompighiaccio, avendo ridotto il numero dei suoi sommergibili nucleari da 245 a una quarantina, mentre gli USA continuano al livello precedente, pur avendo ridotto il numero dei sommergibili da 139 a una settantina, e stanno anche considerando l'introduzione di incrociatori a propulsione nucleare. Alla quantità di HEU delle 180 navi oggi in servizio va aggiunta quella contenuta nei reattori delle navi in disarmo e le scorte di combustibile; si stima che tale HEU superi globalmente le 380 t¹². Va osservato che al procedere della riduzione delle armi nucleari, come previsto dai trattati START¹⁶ e SORT¹⁷, la quantità di HEU per la propulsione navale supererà quella nelle armi e le scorte mantenute a disposizione resteranno una possibile opzione aperta per un rapido riarmo delle potenze nucleari.

Figura 2. Stime del consumo annuale di HEU dei vari Paesi per la propulsione navale¹⁸, in kilogrammi



Il gran numero di sommergibili russi in disarmo e da smantellare pone seri problemi per la lentezza dello smaltimento e della messa in sicurezza del combustibile nucleare e del materiale combusto, dato che i due impianti di trattamento esistenti riescono a lavorare meno di 10 navi all'anno¹⁹. È inoltre preoccupante il loro impatto ambientale sull'intero Artico: nel 1996 la IAEA ha costituito un gruppo di contatto di esperti (CEG) per aiutare la Russia a sviluppare un piano di smaltimento, e il 21 maggio 2003 è stato firmato un accordo di collaborazione internazionale (*Multilateral Nuclear Environmental Programme in the Russian Federation* - MNEPR) e creato uno speciale fondo (*Northern Dimensions Environmental Partnership* - NDEP); altri fondi ai progetti di smantellamento sono messi a disposizione nell'ambito del *G8 Global Partnership Programme against the Spread of Weapons and Materials of Mass Destruction*, lanciato nel Summit 2002 del G8 a Kananaskis; alcuni programmi sono in corso, mentre il piano globale presenta vari aspetti problematici²⁰.

Un altro impiego militare di reattori a HEU è la produzione di trizio per armi a fusione, attività cessata in Russia e USA dal 1989, ma forse attiva nei nuovi Paesi nucleari. I due reattori di grande potenza russi a WGU di Mayak negli Urali per la produzione di trizio utilizzavano 800 kg di HEU l'anno; ora forniscono radioisotopi a scopo medico e industriale e l'uso di HEU non è più indispensabile.

¹⁸ O. Reistad, S. Hustveit, *HEU Fuel Cycle Inventories and Progress on Global Minimization*, in «Nonproliferation Review», 15, 2, July 2008.

¹⁹ J. Tatko, T. Robinson, *Russia: Decommissioning and Dismantlement*, James Martin Center for Nonproliferation Studies, Monterey, 5 March 2003.

²⁰ C. Hansell Chuen, *Russian Nuclear-Powered Submarine Dismantlement and Related Activities: A Critique*, James Martin Center for Nonproliferation Studies, Monterey, 24 May 2007.

Piccoli reattori con GWU sono stati utilizzati in passato per fornire energia a radar di satelliti spia; durante l'amministrazione Reagan sono stati studiati reattori nucleari da installare su satellite per produrre fasci di particelle da impiegare in funzione anti-missile balistico.

Vi sono inoltre nel mondo 19 reattori pulsati a HEU, 2/3 dei quali in Russia, per l'80% in laboratori militari utilizzati essenzialmente per verificare gli effetti di esplosioni nucleari su equipaggiamenti militari e testate nucleari esposti all'esplosione e per analisi dell'efficienza delle armi; in tutto impiegano circa 2 t di HEU. Il più grande reattore pulsato al mondo è il BGR russo di Sarov che contiene 833 kg di HEU al 90%. Questi reattori consumano pochissimo per cui non sono previste ricariche di combustibile nel corso delle operazioni.

L'HEU viene anche impiegato per usi civili²¹:

– piastri-bersaglio per la produzione di isotopi radio-farmaceutici, in particolare tecnezio-99m; altri isotopi medici prodotti con HEU sono iodio-131 e xeno-133;

– combustibile per il reattore veloce autofertilizzante²² russo BN-600, che consuma annualmente 4 t di HEU e continuerà a funzionare fino al 2015; la Russia non prevede nuovi reattori veloci a HEU;

– propulsione navale, attualmente ridotta ai rompighiaccio e al trasporto artico russi, dopo l'abbandono dei programmi giapponese e tedesco per motivi economici e tecnici, che ha portato al disarmo delle loro uniche navi nucleari, la Mutsu e l'Otto Hahn, rispettivamente;

– assemblaggi critici quali prototipi di reattori, per esperimenti o calibrazione di codici neutronici;

– combustibile per reattori di ricerca.

Il tecnezio-99m è il principale marcatore utilizzato in diagnostica medica: circa l'80% di tutte le analisi in medicina nucleare lo impiegano, per 20-25 milioni di procedure diagnostiche all'anno²³; è uno stato eccitato del tecnezio-99 che decade emettendo un raggio gamma rivelabile con precisione per studiare il comportamento dei vari organi. Il suo breve tempo di dimezzamento (6 ore) e la mancanza di radiazioni beta associate riducono la dose di radiazione al minimo necessario. Il tecnezio-99m viene prodotto per decadimento radioattivo dal molibdeno-99, a sua volta generato nel 6% delle fissioni dell'uranio-235: in pratica un bersaglio di HEU (usualmente WGU) viene inserito all'in-

²¹ IAEA, *Management of High Enriched Uranium for Peaceful Purposes: Status and Trends*, IAEA-tecdoc-1452, Vienna, 2005.

²² Un reattore autofertilizzante è progettato in modo da consumare meno combustibile nel suo nucleo di quanto non ne produca in un mantello di materiale «fertile», tipicamente uranio-238 o torio. Sono stati studiati e costruiti vari tipi di prototipi, per lo più funzionanti con neutroni veloci e raffreddamento a sodio liquido, ma tali reattori non sono ancora entrati in produzione per la loro complessità, gli alti costi e problemi di affidabilità e sicurezza.

²³ B. Williams, T.A. Ruff, *Getting Nuclear-Bomb Fuel out of Radiopharmaceuticals*, in «The Lancet», 371, March 2008, pp. 795-797.

terno o in prossimità del nucleo di un reattore che fornisce il flusso di neutroni per la fissione nel bersaglio. Il consumo mondiale annuale di HEU è di circa 85 kg; solo il 5% dell'HEU nelle piastrine viene consumato e il rimanente 95% dell'HEU si accumula presso i reattori, dato che per lo più non viene riciclato²⁴.

Ci sono al mondo circa 50 assemblaggi critici a HEU, la metà in Russia. Alcuni sono modelli di reattori per missioni spaziali e contengono da alcune decine a più di un centinaio di kg di WGU; il loro consumo è minimo e non sono previste ricariche di combustibile nel corso delle operazioni. Una decina di modelli di reattori navali contengono più di 100 kg di HEU nel loro nucleo. Altri assemblaggi critici sono stati predisposti, come i prototipi di reattori elettronucleari veloci, nonostante i progetti attuali di tali reattori prevedano quale combustibile il plutonio o altri elementi transuranici; contengono tonnellate di WGU, data la larga disponibilità, e, per simulare gli arricchimenti inferiori previsti per i reattori veloci, si inseriscono fra il WGU strati di uranio impoverito²⁵. Ad esempio, l'assemblaggio critico russo a Obninsk contiene 8,7 t di HEU, parte arricchito al 36% e parte WGU, e 0,8 t di plutonio ed è utilizzato quale modello per grandi reattori veloci autofertilizzanti; secondo una recente analisi, si potrebbe convertire tutto l'HEU al più sicuro livello del 36% senza compromettere il programma di ricerca e le simulazioni²⁶.

I reattori di ricerca non sono utilizzati per la produzione di energia, operano a basse potenze e vengono impiegati per studi e sviluppi di scienza e tecnologia nucleari, ma soprattutto per produrre fasci intensi di neutroni dedicati a impieghi terapeutici e alla produzione di radioisotopi per applicazioni mediche, a studi di materiali, per prove di componenti industriali, analisi elementari, controllo dell'inquinamento.

Questi reattori vennero prodotti in gran numero dalle potenze nucleari e altri furono esportati da URSS e USA in quaranta Paesi nell'ambito dei programmi «Atomi per la pace» lanciati a metà degli anni Cinquanta; nel corso degli anni Settanta, per aumentare il flusso di neutroni e prolungare la vita del combustibile, gran parte di questi reattori vennero convertiti a HEU o WGU (gli USA fornirono oltre 3 t di HEU). In tutto sono stati costruiti 672 reattori di ricerca, 284 sono ancora attivi in 56 Paesi e 16 nuovi impianti sono in costruzione o progetto; molti di questi si trovano presso sedi universitarie e istituzioni di ri-

²⁴ F.N. von Hippel, L.H. Kahn, *Feasibility of Eliminating the Use of Highly Enriched Uranium in the Production of Medical Radioisotopes*, in «Science & Global Security», 14, 2006, pp. 151-162.

²⁵ F.N. von Hippel, *HEU in Critical Assemblies, Pulsed Reactors and Propulsion Systems*, Technical Workshop on HEU Elimination, Oslo, 17-18 June 2006.

²⁶ A. Glaser, F.N. von Hippel, *Global Cleanout: Reducing the Threat of HEU-Fueled Nuclear Terrorism*, in «Arms Control Today», January/February 2006.

Figura 3. Stime del consumo annuale di HEU nei reattori di ricerca¹⁸, in kilogrammi

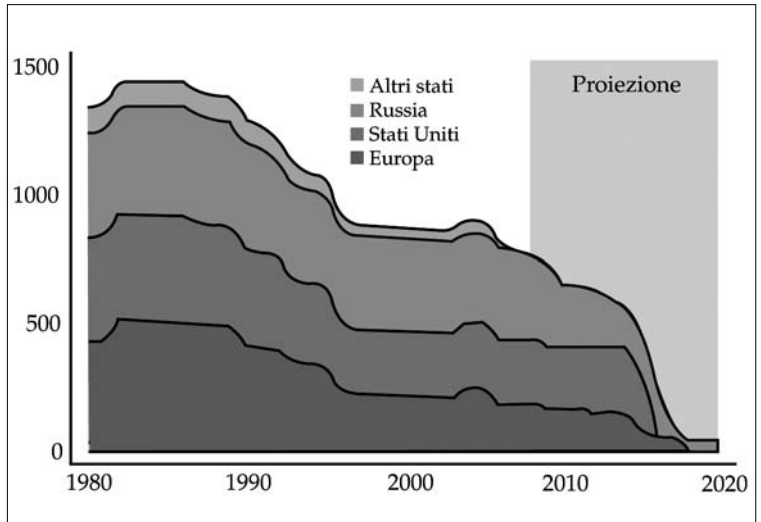


Tabella 1. Stima dell'International Panel on Fissile Material (IPFM) della quantità di HEU in tonnellate

paese\tipo	armi	propulsione navale	usi civili	dichiarata in eccesso
Cina	20 ± 4			
Francia	30 ± 6		6,4	
India	0,6 ± 0,1			
Israele	0,1			
Pakistan	2 ± 0,3			
Russia	590 ± 300	150	30	163
UK	16,4	4,5	1,5	
USA	250	228	30	137
Altri			10	
Totale	909,1 ± 310,8	382,5	77,9	300

cerca al di fuori del controllo di un'autorità nazionale indipendente e spesso con ridotte forme di sicurezza e protezione. Alla fine degli anni Settanta sono partite iniziative, da parte di IAEA, Russia e Stati Uniti, per la conversione dei reattori di ricerca da HEU a LEU e per il recupero del combustibile esausto; il consumo annuale di HEU si è ridotto da 1.400 kg nei primi anni Ottanta a 800 kg attualmente¹⁹. Precisato che non esiste un elenco completo dei reattori di ricerca attivi, l'International Panel on Fissile Material (IPFM) stima che esistano 140 reattori con combustibile HEU in quaranta Paesi, inclusi gli

assemblaggi critici, 111 civili e 29 militari, con oltre 75 t di uranio fortemente arricchito²⁷.

La tabella 1 presenta la distribuzione per tipo e Paese delle attuali riserve di HEU¹², mentre la figura 3 mostra l'andamento temporale dei consumi di HEU per i reattori di ricerca.

4. Il plutonio separato

Un'alternativa alla complessa e costosa tecnologia dell'arricchimento dell'uranio è fornita dall'impiego nelle bombe del plutonio-239, un materiale fissile artificiale di numero atomico 94, più efficiente dell'uranio-235, che viene generato a partire dall'uranio-238. Irraggiando con neutroni l'uranio-238, tipicamente all'interno di un reattore, si produce uranio-239 che si trasforma rapidamente per radioattività in nettunio-239 (un elemento che non esiste in natura) con tempo di dimezzamento di 23 minuti; il nettunio successivamente decade in plutonio-239 con un tempo di dimezzamento di 2,36 giorni. Il plutonio è radioattivo, ma, come abbiamo visto, con un tempo di dimezzamento estremamente lungo (24.400 anni) per cui è praticamente stabile su tempi umani e quindi utilizzabile e manipolabile con ragionevoli protezioni, una volta separato dalle barre di combustibile esausto dei reattori. Nelle bombe il plutonio viene usato in forma metallica e la sua lavorazione è particolarmente delicata per le sue complesse proprietà chimiche e fisiche. La sua radioattività comporta nel tempo modifiche strutturali non ancora sufficientemente conosciute, creando problemi per il controllo dell'efficienza delle testate al plutonio in deposito²⁸.

Più a lungo il plutonio-239 rimane nel reattore, maggiore è la probabilità che assorba un altro neutrone e subisca fissione o divenga plutonio-240; tipicamente il plutonio RGP prodotto nei reattori è una miscela di vari isotopi con numeri di massa fra 239 e 242: 50-60% di plutonio-239 e 25% di plutonio-240²⁹. Per le armi nucleari si preferisce WGP di alta purezza (oltre il 90%) dell'isotopo 239 in quanto meno radioattivo e meno soggetto a fissione spontanea. Per questo motivo gli impianti elettronucleari ove il combustibile rimane fino al suo massimo utilizzo non sono ideali per la produzione di plutonio militare. I reattori dedicati alla produzione di WGP sono di bassa potenza, usano uranio naturale, e quindi sono moderati ad acqua pesante

²⁷ Dei reattori e assemblaggi critici attivi con HEU 71 sono in Russia, 19 negli Stati Uniti, 18 in Europa, 4 in Cina e 28 negli altri Paesi (dati dell'IPFM).

²⁸ Una rassegna accurata delle proprietà del plutonio si trova in *Challenges in Plutonium Science*, vol. I e vol. II, «Los Alamos Science», 26, 2000.

²⁹ Nei reattori civili moderati ad acqua circa 2/3 del plutonio-239 prodotto subisce fissione contribuendo alla resa del reattore, per cui la produzione netta è inferiore a 0,1 g di plutonio per megawatt-giorno, ossia circa 250 kg annualmente per un impianto da 1 GWe. I reattori commerciali CANDU ad acqua pesante producono, a parità di potenza, una quantità doppia di plutonio-239 con solo un 25% di isotopi più pesanti dato che le barre esauste vengono cambiate continuamente e non solo una volta ogni uno o due anni, come per i reattori ad acqua.

Tabella 2. Impianti di riprocessamento per l'estrazione di plutonio, con indicazione della capacità operativa espressa in tonnellate di combustibile esausto trattabile in un anno

paese\impianti	numero	capacità	applicazione	stato
Corea del Nord	1	50-200	militare	in chiusura
Francia	2	2.000	civile	operativi
Giappone	2	1.010	civile	operativi
India	3	250	militare	operativi
Israele	1	40-100	militare	operativo
Pakistan	1	10-20	militare	operativo
Russia	3	9.900	civile	operativi
UK	2	2.400	civile	in chiusura
USA	1	15	civile	operativo

o a grafite; le barre di combustibile vengono estratte frequentemente in modo che solo 1/7 dell'uranio-235 subisca fissione: in questo modo la produzione di plutonio-239 raggiunge i 0,3 g per MW-giorno e si riduce la presenza di isotopi di peso maggiore³⁰.

Poiché il materiale esausto prodotto da un reattore è altamente radioattivo, l'estrazione del plutonio avviene con manipolazione a distanza e pesanti protezioni in tutte le fasi dell'operazione³¹. Attualmente per il riprocessamento del combustibile esausto e l'estrazione del plutonio operano nel mondo 16 impianti in 9 Paesi, alcuni in fase di chiusura, e nuovi impianti stanno sorgendo in Cina e Pakistan (tabella 2); di questi solo 6 sono soggetti alle procedure di salvaguardia della IAEA.

Francia, Regno Unito e USA hanno formalmente dichiarato di aver interrotto la produzione di plutonio a fini militari e la Cina ha dato analoghe indicazioni anche se non ufficialmente. La Russia continua a produrre circa 0,4 t di WGP all'anno come sottoprodotto non voluto dell'operazione di un reattore di produzione mantenuto attivo quale unica risorsa di energia e calore per la popolazione di Zheleznogorsk (già Krasnoyarsk-26); si prevede lo spegnimento del reattore entro il 2010, quando sarà completato un impianto sostitutivo a carbone, analogamente a quanto fatto a Seversk (già Tomsk-7), ove due simili reattori sono stati spenti nel giugno 2008. Non è chiaro se Israele continui nel centro di Dimona la produzione di WGP o di trizio, mentre è certo che India e Pakistan stanno costruendo nuovi reattori dedicati e nuovi impianti di riprocessamento per aumentare significativamente la produzione di WGP nel prossimo decennio. Procedono faticosamente le azioni internazionali

³⁰ Ad esempio il reattore indiano CIRUS di 10 MWe ad acqua pesante, funzionando al 70%, produce in un anno 10,2 t di combustibile esausto che contiene circa 9,3 kg di plutonio di qualità militare.

³¹ Nella tecnica attuale di riprocessamento (PUREX) il materiale esausto viene tagliato in piccoli pezzi e poi dissolto in acido nitrico; il plutonio viene estratto in un solvente organico mescolato all'acido nitrico usando colonne miscelatrici a flusso pulsato e quindi separato con centrifugazione. Il plutonio estratto può venire infine lavorato senza schermature protettive, data la sua bassa radioattività; è solo pericoloso se inalato o ingerito.

per la chiusura definitiva del reattore di ricerca e l'impianto di riprocessamento della Corea del Nord, nell'ambito delle correnti iniziative per il disarmo nucleare di quel Paese.

Globalmente, il plutonio di qualità militare esistente è stimato raggiungere le 300 t, incluse 100 t dichiarate eccedenti le presenti necessità per le armi (tabella 3), una quantità sufficiente per oltre 37.000 bombe.

Accanto al WGP separato per la produzione di armi, una quantità crescente di plutonio viene dal riprocessamento a scopi civili per la preparazione di nuovo combustibile per centrali elettronucleari. Negli anni Settanta si prospettava un uso immediato di plutonio in reattori veloci autofertilizzanti; gli alti costi e le difficoltà operative di tali reattori ne hanno diminuito l'interesse, mentre si è provata la possibilità di impiegare negli impianti ad acqua esistenti combustibile utilizzando plutonio al posto dell'uranio-235, in una mistura di uranio naturale o impoverito e plutonio (*mixed-oxide fuel* - MOX).

Interessati sono Paesi europei, Russia, India e Giappone; gli USA sospesero il trattamento del combustibile esausto nel 1970 per motivi economici e contro la proliferazione, ma nel 2006 il governo americano ha inserito il riprocessamento nella proposta *Global Nuclear Energy Partnership*³², anche per rimuovere il combustibile esausto dai depositi presso i reattori, dato anche il crescente ritardo nella realizzazione di un deposito geologico nazionale delle scorie radioattive. Il riprocessamento continua a sollevare dubbi sui rischi inerenti di proliferazione e il progetto sta incontrando difficoltà presso il Congresso americano³³.

Attualmente circa 10.000 t di combustibile esausto vengono generate ogni anno nel mondo, contenenti circa 75 t di plutonio; circa un quarto viene riprocessato, mentre il resto rimane nei siti di stoccaggio intermedi. In attesa di venire trasformata in MOX, la quantità di plutonio separato a scopi civili cresce rapidamente fino a superare quella prodotta a scopo militare. Il riprocessamento a scopo civile viene svolto in Francia, Russia e Regno Unito anche per conto di altri Paesi, ma recentemente molti di essi hanno deciso di conservare localmente il combustibile esausto o, nel caso del Giappone, di sviluppare capacità locali; in seguito alla diminuzione dell'attività, gli impianti inglesi verranno chiusi entro il 2020, dato che il Regno Unito non utilizza nei suoi reattori il plutonio separato³⁴. I centri di riprocessamento di Sellafield (Regno Unito) e Marcoule (Fran-

³² La *Global Nuclear Energy Partnership* (GNEP) è un'iniziativa internazionale promossa dagli USA nel 2006 per lo sviluppo dell'energia nucleare civile in modo sicuro e capace di prevenire i pericoli di proliferazione militare. Fra gli obiettivi in particolare la ricerca di cicli del combustibile avanzati per una maggiore efficienza, la riduzione di scorie ad alta radioattività e la salvaguardia dell'ambiente. Ad agosto 2008 al GNEP partecipano 21 Paesi dei 5 continenti, con la collaborazione centrale della IAEA.

³³ E. Lyman, F.N. von Hippel, *Reprocessing Revisited: The International Dimensions of the Global Nuclear Energy Partnership*, Arms Control Association, April 2008.

³⁴ International Panel on Fissile Materials, *Global Fissile Material Report 2007*, Princeton University, Princeton, 2007.

Tabella 3. Stima della quantità di plutonio separato in tonnellate³⁶

paese\tipo	militare	stato di produzione militare	civile nel paese	civile all'estero	militare in eccesso
Belgio			3,3	0,4	
Cina	4 ± 0,8	cessato 1991			
Corea del Nord	0,035 ± 0,018	cessato 2007			
Francia	5 ± 1,0	cessato 1994	52,4		
Germania			1	14	
Giappone			6,7	38	
India	0,65 ± 0,13	attivo	5,4		
Israele	0,45 ± 0,11	attivo			
Pakistan	0,08 ± 0,016	attivo			
Russia	145 ± 25	cessato 1997	42,4		34-50
UK	7,9	cessato 1989	80,4	0,9	4,4
USA	38	cessato 1988			53,9
Totale	201,11 ± 27,07		191,6	53,3	92,3-108,3

cia) hanno lasciato enormi problemi di degrado ambientale e i programmi di decontaminazione richiedono decine di anni e altissimi costi (circa 92 G\$ per Sellafield)³⁵.

La tabella 3 presenta recenti stime della quantità di plutonio mondiale; le incertezze sulle quantità di WGP sono del 20% per Cina, Francia e India e del 25% per la Russia³⁶, mentre i dati relativi al plutonio civile si basano sulle dichiarazioni dei singoli paesi; gran parte del plutonio civile separato non è stato rimpatriato in attesa della produzione del MOX. Ricordiamo che bastano 8 kg di plutonio per produrre una bomba (anche 4 kg per laboratori esperti).

5. I rischi

L'uranio leggermente arricchito, il combustibile MOX e il plutonio nel combustibile esausto non pongono pericoli d'impiego per armi, i primi due perché non sono in grado di sostenere una reazione a catena esplosiva, il terzo perché non è trattabile data l'altissima radioattività delle scorie, che crea di fatto un'effettiva barriera di autoprotezione.

Uranio fortemente arricchito e plutonio separato sono gli ingredienti cruciali per la produzione di armi nucleari: gli altri elementi necessari, conoscenze di base, esplosivi convenzionali di altissima potenza, circuiteria elettronica, apparati meccanici

³⁵ Informazioni sulla storia e le prospettive dei programmi di riprocessamento francesi e inglesi si trovano, rispettivamente, nei rapporti: M. Schneider, Y. Marignac, *Spent Nuclear Fuel Reprocessing in France*, IPFM Research Report n. 4, Princeton, April 2008, e M. Forwood, *The Legacy of Reprocessing in the United Kingdom*, IPFM Research Report n. 5, Princeton, July 2008.

³⁶ H. Feiveson, A. Glaser, Z. Mian, F.N. von Hippel, *Global Stocks of Fissile Materials, 2007*, in *SIPRI Yearbook 2008...*, cit.

ecc., sono disponibili o acquisibili senza particolari difficoltà e segretamente non solo da parte di governi, ma anche di gruppi sub-nazionali e potenziali terroristi. Il materiale fissile più semplice da utilizzare è il WGU e quindi l'HEU; il plutonio ideale è quello di qualità militare, ma con qualunque tipo di plutonio proliferatori inesperti possono produrre bombe poco efficienti (fino a qualche kt di potenza) e laboratori esperti armi di caratteristiche avanzate³⁷.

Come abbiamo visto, per la produzione di HEU e la separazione di plutonio si richiedono lunghe lavorazioni in strutture complesse, con enormi investimenti; una produzione clandestina si rivela quindi impossibile se non per Paesi che abbiano impianti d'arricchimento isotopico o di riprocessamento di combustibile esausto per scopi civili e riescano a divertire a scopi militari parte della produzione, evitando i controlli internazionali.

Le enormi attuali scorte di HEU e plutonio separato e gli impianti per la loro produzione costituiscono quindi un pericolo a più livelli:

- nelle attuali potenze nucleari rimangono una facile e immediata risorsa per potenziali riprese del riarmo nucleare sia in termini quantitativi che qualitativi, a fronte di tensioni politiche internazionali e del congelamento degli attuali accordi di riduzione delle armi;
- disponendo dei materiali fissili, molti Paesi hanno le capacità di produrre armi nucleari in tempi molto brevi, qualora la situazione internazionale si deteriori e la loro sicurezza possa sembrare in pericolo, ovvero vogliano acquisire un ruolo internazionale altrimenti negato;
- gruppi sub-nazionali o terroristici, acquisito materiale fissile, possono arricchire di una nuova terribile minaccia il già tragico scenario mondiale.

Per quanto riguarda il primo rischio, dobbiamo notare le nuove tensioni fra USA e Russia su vari fronti, la denuncia del trattato START II, la lentezza nella realizzazione degli impegni dell'accordo SORT, che prevede drastiche riduzioni bilaterali delle armi nucleari entro il 2012, gli annunciati nuovi programmi di rinnovamento e potenziamento qualitativo degli arsenali di entrambe le potenze. Si può sperare che la nuova amministrazione americana voglia modificare drasticamente gli atteggiamenti che hanno caratterizzato l'ultima fase della presidenza

³⁷ Office of Arms Control and Proliferation, *Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-Usable Fissile Material Storage and Excess Plutonium Disposition Alternatives*, DOE, Washington, 1997.

38 Il *Trattato di non proliferazione* (NPT), in vigore dal 1970, ha i seguenti obiettivi: impedire che nuovi Paesi, oltre Cina, Francia, Russia, Regno Unito e USA, acquisiscano armi nucleari; agevolare la collaborazione internazionale per lo sviluppo dell'energia nucleare civile, sotto il controllo della IAEA; promuovere il progresso del disarmo nucleare. Aderiscono praticamente tutti i Paesi del mondo tranne Corea del Nord, India, Israele e Pakistan, oltre a Taiwan, non riconosciuta dall'ONU. Per il testo, vedi *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*, IAEA INFCIRC/140, IAEA, Vienna, 1970.

L'NPT è il caposaldo del regime di non proliferazione delle armi nucleari. Ogni 5 anni sono previste conferenze di revisione: l'ultima, nel 2005, ha visto insormontabili contrasti fra vari gruppi di Paesi per cui non si è riusciti in un mese neppure a definire il programma dei lavori. Vedi S.N. Kile, *Nuclear Arms Control and Non-Proliferation*, in *SIPRI Yearbook 2006: Armaments, Disarmament and International Security*, Oxford University Press, Oxford, 2006.

39 J. Simpson, *The 2000 NPT Review Conference*, in *SIPRI Yearbook 2001: Armaments, Disarmament and International Security*, Oxford University Press, Oxford, 2001.

40 Ricordiamo che la guerra contro l'Iraq nel 2003 è stata giustificata da parte della coalizione internazionale anche come azione antiproliferazione, dato che i controlli internazionali si dimostravano inadeguati.

41 International Atomic Energy Agency, *Model Protocol Additional to the Agreement(s) between State(s) and the International Atomic Energy Agency*, INFCIRC/540 (Corrected), IAEA, Vienna, 1997. I protocolli addizionali a dicembre 2008 sono stati firmati da 128 Paesi, ma sono in forza solo in 90 di questi e a Taiwan (a livello non governativo); naturalmente, sono esclusi i Paesi nucleari non parte dell'NPT. Sull'importanza degli accordi addizionali vedi, ad

Bush e che da parte russa si sappia rispondere con spirito collaborativo.

La seconda minaccia trae alimento dalla crescente erosione del regime di non proliferazione, a seguito di molti fattori negativi che si stanno accumulando:

– la decisione da parte dell'amministrazione Bush di denunciare il Programma d'azione per il disarmo nucleare in tredici passi concordato nella conferenza di revisione del Trattato di non proliferazione (NPT)³⁸ nel 2000³⁹;

– il fallimento dell'ultima conferenza di revisione dell'NPT;

– l'insicurezza legata alla relativa facilità per un Paese di uscire dal Trattato e utilizzare per un programma militare le competenze nucleari acquisite anche grazie all'NPT;

– i ritardi nel processo di disarmo nucleare;

– il rafforzamento dello status di Paese nucleare nel contesto internazionale;

– l'incapacità di acquisire all'NPT l'adesione di India, Israele e Pakistan, nella diffusa accettazione internazionale dei nuovi Stati nucleari;

– la posizione ambigua della Corea del Nord;

– l'insufficienza delle garanzie fornite dalle procedure di monitoraggio della IAEA, rivelata dal tentato programma nucleare segreto dell'Iraq degli anni Ottanta⁴⁰;

– le scarse adesioni alle procedure rafforzate di salvaguardia previste dalla IAEA⁴¹;

– le tensioni sul programma di arricchimento dell'Iran;

– la scoperta del mercato nero nucleare del pakistano Abdul Qadeer Khan, attivo in segreto per tredici anni⁴²;

– l'accordo nucleare USA-India⁴³;

– la ripresa dell'energia elettronucleare a livello mondiale, e in particolare i programmi di dodici-tredici impianti nella delicata area mediorientale;

– l'atteggiamento di molti Stati che sembrano riconsiderare la loro opzione nucleare e comunque danno priorità agli interessi economici rispetto al controllo di materiali e tecnologie sensibili.

Il pericolo del terrorismo nucleare è sempre più credibile, motivato dalla determinazione di vari gruppi terroristici internazionali, che sembrano non esitare di fronte a stragi di massa, dalle loro apparentemente ingenti possibilità finanziarie e dalla disponibilità di territori franchi, con l'appoggio e copertura di

esempio, R. Kokoski, *Technology and the Proliferation of Nuclear Weapons*, cit.

⁴² Per le attività della rete di Khan vedi S.N. Kile, *Nuclear Arms Control and Non-Proliferation*, in *SIPRI Yearbook 2005: Armaments, Disarmament and International Security*, Oxford University Press, Oxford, 2005.

⁴³ L'accordo per forniture nucleari da parte degli USA all'India, che non aderisce all'NPT, rappresenta una forzatura e costituisce un indebolimento dell'NPT stesso, aprendo la strada al superamento dei vincoli internazionali alla diffusione di tecnologie potenzialmente favorevoli alla proliferazione nucleare. Vedi C. Ahlström, *Legal Aspects of the Indian-US Civil Nuclear Cooperation Initiative*, in *SIPRI Yearbook 2006...*, cit.

⁴⁴ C.P. Ferguson, W.C. Potter, con A. Sands, L.S. Spector, F.L. Wehling, *The Four Faces of Nuclear Terrorism*, Routledge, New York, 2005; sul terrorismo nucleare vedi anche G. Allison, *Nuclear Terrorism*, Henry Holt, New York, 2004, e F. Calogero, *The Risks of a Nuclear Catastrophe*, in D. Antonius, A.D. Brown, T.K. Walters, J. Martin Ramirez, S.J. Sinclair (eds.), *Interdisciplinary Analyses of Terrorism and Aggression*, Cambridge Scholars Press, Newcastle-upon-Tyne, 2009.

⁴⁵ J.C. Mark, T. Taylor, E. Eyster, W. Maraman, J. Wechsler, *Can Terrorists Build Nuclear Weapons?*, in P. Leventhal, Y. Alexander, *Preventing Nuclear Terrorism*, Lexington Books, Lexington, 1987.

⁴⁶ R.C. Molander, *Perspectives on the Threat of Nuclear Terrorism*, Testimony before the Committee on Homeland Security and Governmental Affairs, United States Senate, 15 April 2008, RAND Corporation, Santa Monica, 2008.

⁴⁷ T.B. Cochran, M.G. McKinzie, *Detecting Nuclear Smuggling*, in «Scientific American», 298, April 2008, pp. 76-81.

popolazioni locali, a fronte dell'inadeguato controllo e notevole dispersione di materiale fissile militare. Esistono almeno quattro forme in cui può realizzarsi un'operazione terroristica nucleare:

- il furto ed esplosione di una bomba nucleare intatta;
- la fabbricazione ed esplosione di una bomba nucleare rudimentale;
- attacchi e sabotaggio di un impianto nucleare;
- la fabbricazione di una bomba convenzionale per la dispersione di materiale radioattivo.

Il problema delle attuali scorte di materiale fissile riguarda in particolare la seconda possibile azione terroristica, e solo su questa concentreremo l'attenzione. Secondo autorevoli analisti, oggi il maggior rischio di un'esplosione nucleare non è costituito dagli arsenali dei vari Paesi, ma proprio da un'azione terroristica con una bomba rudimentale⁴⁴.

Esiste un sostanziale accordo da parte degli esperti che un piccolo gruppo di terroristi, acquisito il necessario esplosivo nucleare, possa far detonare un ordigno nucleare della potenza analoga alla bomba di Hiroshima; naturalmente non una bomba affidabile, sicura e trasportabile, che richiede notevoli capacità e risorse scientifiche e tecniche specifiche, ma un sistema rudimentale basato su tecnologie relativamente semplici utilizzando un centinaio di kg di HEU⁴⁵; per i potenziali terroristi non è necessario fare un'esplosione di prova per mettere a punto un tale ordigno, per cui un loro attacco nucleare potrebbe avvenire assolutamente di sorpresa. Al disastro umano, sociale, economico e ambientale immediato si aggiungerebbero effetti a medio e lungo termine, con il pericolo e conseguente panico diffuso della possibile iterazione dell'attacco in altri punti del Paese colpito⁴⁶.

Ai Paesi minacciati è impossibile con la presente tecnologia individuare una bomba del genere nascosta in un autocarro o battello e tanto meno se predisposta in un'abitazione qualsiasi della città bersaglio dell'azione terroristica. Anche il capillare impiego di strumenti di controllo dei carichi delle navi in arrivo nei porti americani non sembra adeguato all'individuazione di materiale sensibile⁴⁷. Va ricordato che l'HEU ha una bassa radioattività intrinseca e non pone problemi a venire maneggiato e lavorato, e che, mentre il combustibile esausto di un reattore di potenza ha la sua «barriera di autoprotezione» radioattiva

contro il furto, ciò non è più vero per il materiale irraggiato nella maggior parte dei reattori di ricerca.

Un ordigno al plutonio è molto più difficile da realizzare, soprattutto perché richiede un sistema di innesco estremamente veloce (microsecondi), mentre per l'HEU si può ricorrere a un innesco molto più lento (millisecondi) utilizzando la tecnica a «incastro»: una massa supercritica viene formata lanciando una massa non critica contro un'altra massa non critica con un'esplosione convenzionale⁴⁸. Tuttavia non si può escludere il possibile uso di plutonio⁴⁹.

Ribadito che gruppi sub-nazionali non sono in grado di produrre materiale fissile in modo clandestino, mentre non è particolarmente difficile la produzione di un ordigno di potenza adeguata a scopo terroristico una volta acquisito HEU o anche plutonio, essi possono puntare all'acquisto o furto di tali materiali critici. Anche se la prevenzione e la lotta al terrorismo nucleare devono prevedere azioni articolate e contromisure multiple per vanificare in più punti la catena di stadi che un gruppo terroristico deve superare per giungere all'attacco nucleare finale⁵⁰, è chiaro che impedire l'acquisizione di HEU, soprattutto eliminando tutte le scorte non strettamente necessarie e insoddisfacentemente protette, rimane lo strumento più efficace per allontanare il pericolo di una bomba costruita da terroristi.

Attualmente vi sono situazioni di emergenza e punti deboli nel controllo dei materiali fissili militari: l'inadeguata salvaguardia delle scorte di alcuni depositi russi, la situazione di instabilità politica pakistana, il mercato nero nucleare di Abdul Qadeer Khan, la presenza di HEU in molti reattori di ricerca in istituzioni disperse e insufficientemente controllate in molti Paesi, e i trasporti di HEU e plutonio su lunghe distanze.

Il problema della vulnerabilità al furto di HEU del vasto «arcipelago» nucleare russo⁵¹ emerse immediatamente alla dissoluzione dell'URSS; l'Unione Sovietica aveva un efficace sistema di sicurezza nucleare, basato non sulla protezione fisica dei materiali in depositi di alta sicurezza con barriere e sistemi di allarme e con una precisa contabilità, ma piuttosto sulla chiusura della società, dei confini e dei laboratori e città nucleari, sul trattamento privilegiato del personale del settore nucleare e sulla rigorosa sorveglianza di ognuno e ogni cosa da parte del KGB. Una volta venuto meno il regime, i materiali sensibili rimasero

⁴⁸ L'innesco a incastro fu il primo a venire considerato nello sviluppo delle armi nucleari durante la seconda guerra mondiale e impiegato per la bomba lanciata su Hiroshima. Per le bombe al plutonio venne messo a punto l'innesco a implosione che crea un sistema supercritico comprimendo una sfera di materiale fissile a densità subcritica mediante un sistema di esplosioni convenzionali predisposto in modo da creare un'onda di compressione convergente. Attualmente tutti gli ordigni nucleari a fissione, sia a plutonio che a HEU, utilizzano l'innesco a implosione, estremamente più sicuro e affidabile di quello a incastro.

⁴⁹ Le possibilità per la produzione di una bomba rudimentale sono state esaminate dal direttore del laboratorio militare americano Sandia: A. Narath, *The Technical Opportunities for a Sub-National Group to Acquire Nuclear Weapons*, in *XIV International Amaldi Conference on Problems of Global Security*, Accademia nazionale dei lincei, Roma, 2003.

⁵⁰ M. Bunn, A. Wier, J.P. Holdren, *Controlling Nuclear Warheads and Materials: A Report Card and Action Plan Project on Managing the Atom*, Belfer Center for Science and International Affairs, Report commissioned by The Nuclear Threat Initiative, Harvard University, Cambridge (Mass.), March 2003.

⁵¹ G.T. Allison, O.R. Coté jr., R.A. Falkenrath, S.E. Miller, *Avoiding Nuclear Anarchy*, The MIT Press, Cambridge (Mass.), 1996.

esposti al rischio di furto, anche da parte del personale che in varie sedi si trovò privato dei precedenti privilegi e spesso senza stipendio⁵². Di fronte ai rischi posti dalla carente sicurezza delle scorte nucleari russe, su iniziativa dei senatori Sam Nunn, democratico, e Richard Lugar, repubblicano, il Congresso americano approvò nel novembre 1991 il *Soviet Nuclear Threat Reduction Act*, che autorizzava la spesa di 400 M\$ per aiutare la Russia a mettere in sicurezza e smantellare armi e materiali nucleari, chimici e biologici. Il programma, nato per far fronte a una situazione di emergenza, è via via evoluto in una vasta serie di interventi sistematici estremamente efficaci, con l'impegno di decine di miliardi di dollari.

Nonostante il rafforzamento dei controlli, a partire dal 1992 si sono susseguite intercettazioni, spesso casuali, di HEU e plutonio di origine illegale, alcune di quantità significative⁵³. L'IAEA dal 1993 ha istituito un *Illicit Trafficking Database* che raccoglie tutti i casi segnalati di traffico illegale e attività non autorizzate coinvolgenti materiali nucleari e radioattivi, cui attualmente collaborano 96 Paesi, e ha prodotto una guida tecnica per combattere tali attività illegali⁵⁴. Il problema dei furti di materiale sensibile è tuttora molto grave: il Direttore Generale della IAEA nella sua relazione alla 63a Sessione dell'Assemblea Generale dell'ONU il 28 ottobre 2008 ha segnalato 250 casi di furto o perdita di materiali radioattivi nel corso dell'ultimo anno⁵⁵.

I materiali nucleari sono particolarmente esposti al pericolo durante gli spostamenti dagli impianti di produzione alle fabbriche delle armi o dei reattori marini e quindi ai punti di impiego effettivi; altri trasporti, anche a lungo percorso, seguono la via inversa, dai punti smantellamento delle armi o motori marini ai punti di riprocessamento dei materiali fissili. Il problema è stato affrontato per gli spostamenti internazionali di materiali fissili civili con la Convenzione per la protezione del materiale nucleare del 1980⁵⁶; a fronte del crescente pericolo di azioni terroristiche, nel 2004 il Consiglio di Sicurezza dell'ONU adottò la Risoluzione 1540 che richiede agli Stati di «sviluppare e mantenere misure appropriate ed efficaci di protezione» del materiale e impianti nucleari. La IAEA è venuta via via a elaborare indicazioni precise per l'innalzamento della sicurezza in generale e per gli spostamenti in particolare⁵⁷, e l'8 luglio 2005 ha portato al rafforzamento della Convenzione del 1980 con un Emendamento (non ancora entrato in vigore) che esten-

⁵² M. Bunn, *Cooperation to Secure Nuclear Stockpiles. A Case of Constrained Innovation*, in «Innovations», 1, 1, Winter 2006, pp. 115-137.

⁵³ W.C. Potter, E. Sokova, *Illicit Nuclear Trafficking in the NIS: What's New? What's True*, in «The Nonproliferation Review», Summer 2008, pp. 112-120.

⁵⁴ International Atomic Energy Agency, *Combating Illicit Trafficking in Nuclear and Other Radioactive Material, Reference Manual*, IAEA Nuclear Security Series n. 6, Technical Guidance, IAEA, Vienna, 2007.

⁵⁵ M. El Baradei, *Statement to the Sixty-Third Regular Session of the United Nations General Assembly*, New York, 28 October 2008.

⁵⁶ *Convention on the Physical Protection of Nuclear Material*, INFIRC/274/Rev. 1, IAEA, Vienna, 1980.

⁵⁷ International Atomic Energy Agency, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, 2005 Edition, IAEA Safety Standards Series n. TS-R-1, IAEA, Vienna, 2005.

de la protezione fisica a tutti gli impianti e materiali nucleari civili⁵⁸.

Per quanto riguarda il plutonio, osserviamo che gli impianti di produzione del MOX non sono vicini a quelli di riprocessamento del combustibile esausto, per cui il plutonio separato deve venire trasportato fra i vari impianti. Più di 200 t del plutonio separato a usi civili, oltre all'80% del totale, è conservato in 4 siti in Europa e Russia, e nei prossimi 15 anni vi saranno nel mondo annualmente un centinaio di trasporti di una media di 300 kg di plutonio ciascuno. Ad esempio, in Francia si trasportano annualmente fra 12 e 15 t di ossido di plutonio fra La Hague e Marcoule, impianti distanti oltre 1.000 km, e successivamente il combustibile MOX viene distribuito in sei siti in Francia e a reattori in Belgio, Germania, Svizzera e Giappone. Il plutonio in transito su lunghe distanze diventa esposto al rischio di furti e rapine⁵⁹, come verificato da azioni dimostrative di attivisti di Greenpeace (Francia, ottobre 2004).

6. Metodi e programmi di eliminazione dell'HEU

Metodi

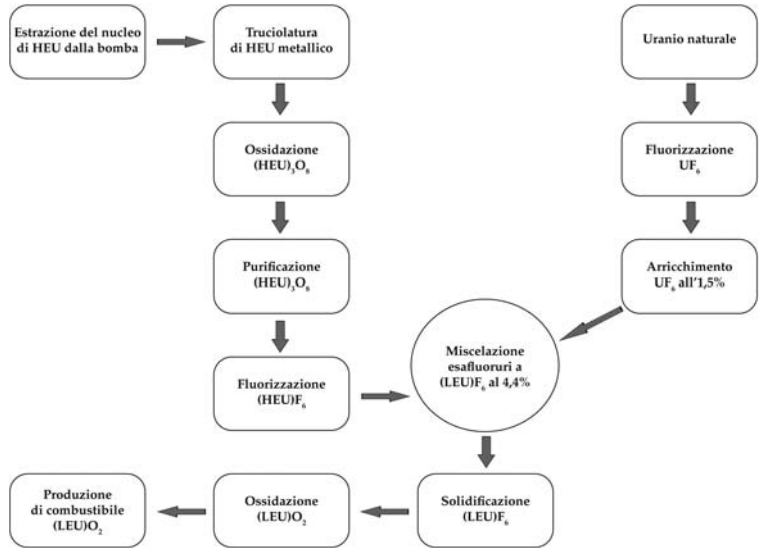
Esiste un metodo immediato per l'eliminazione dell'HEU: la sua riduzione a LEU mediante miscelamento con uranio a basso tenore di uranio-235. Il LEU così prodotto può venire utilizzato quale combustibile negli impianti elettronucleari, recuperandolo in questo modo per un impiego economicamente utile. Al fine di non sprecare le risorse impiegate per l'arricchimento, conviene miscelare l'HEU con materiale arricchito all'1,5%, piuttosto che con uranio naturale o impoverito²¹; un'ulteriore ragione di questa scelta mira alla diluizione delle componenti di uranio-234 e 236 presenti nel materiale fissile delle bombe in seguito ai vari riprocessamenti cui è di solito sottoposto; tale diluizione è imposta dalle condizioni previste dalle norme internazionali di commercializzazione per i combustibili elettronucleari⁶⁰.

La procedura di conversione avviene attraverso più fasi, schematizzate in figura 4. Anzitutto l'HEU in forma metallica viene isolato dagli altri componenti della bomba, o altra struttura d'impiego, e ridotto in trucioli. I trucioli metallici sono quindi riscaldati e convertiti in un ossido di HEU (U_3O_8), che subisce una purificazione chimica da eventuali contaminanti. L'ossido

⁵⁸ *Nuclear Security - Measures to Protect against Nuclear Terrorism, Amendment to the Convention on the Physical Protection of Nuclear Material*, Report by the Director General, GOV/INF/2005/10-GC(49)/INF/6, IAEA, Vienna, 2005.

⁵⁹ D. Albright, *Shipments of Weapons-Usable Plutonium in the Commercial Nuclear Industry*, ISIS, 3 January 2007.

⁶⁰ American Society of Standards and Testing Materials, *International Standard C 996-04*, ASTM, West Conshohocken, 2004.

Figura 4. Schema delle fasi di diluizione di HEU a LEU per combustibile elettronucleare

di HEU viene successivamente trasformato in esafluoruro di HEU (UF_6), che riscaldato assume la fase gassosa. La diluizione avviene appunto in fase gassosa miscelando l'esafluoruro di HEU con l'esafluoruro di LEU all'1,5% in modo da ottenere esafluoruro di LEU al 4,4%, che poi è raffreddato a fase solida; successivamente il materiale viene defluorizzato e ridotto a ossido di LEU (UO_2). Verificata la qualità commerciale, eventualmente corretta con qualche intervento, si procede alla produzione delle pastiglie del combustibile per reattori.

In questo processo, partendo da 1.000 kg di HEU (sufficiente per 40 bombe) e 29.517 kg di LEU all'1,5% (prodotto a partire da 86.181 kg di uranio naturale) si ottengono 30.517 kg di LEU al 4,4%, quanto serve al funzionamento di un impianto da 1 GWe per un anno e mezzo. Naturalmente, la diluizione può arrestarsi a tenori di uranio-235 più alti, al fine di produrre LEU per reattori di ricerca o per reattori ad alta temperatura in funzione o in progetto.

«Megatons to Megawatts»

Un importante programma ventennale di conversione di HEU a LEU è in vigore dal 1993, con l'obiettivo di trattare 500 t di WGU proveniente da circa 20.000 bombe nucleari russe e produrre 15.000 t di combustibile per centrali elettronucleari americane. Il piano mira a più obiettivi:

- accelerare lo smantellamento delle armi sovietiche in eccesso rispetto agli accordi START, il cui progresso si scontrava con i problemi economici russi del tempo;
- evitare l'accumularsi di enormi quantità di materiale fissile militare in presenza di sistemi di controllo e protezione fisica non sempre adeguati;
- agevolare la riconversione dei laboratori e degli scienziati russi dal settore militare a quello civile, riducendo il pericolo dell'esodo di esperti e di attrezzature sensibili verso potenziali proliferatori.

Il negoziato russo-americano richiese un paio di anni, in particolare per le implicazioni economiche del progetto e le sue ripercussioni sul mercato mondiale dell'uranio e dei servizi di arricchimento; si è reso inoltre necessario risolvere problemi legislativi interni ai due Paesi riguardanti il commercio di materiale fissile, la creazione di necessarie strutture operative commerciali e la realizzazione degli impianti necessari; infine vennero individuate e convenute le procedure di controllo reciproco sul rispetto degli accordi: una volta l'anno ispettori americani in Russia controllano che l'HEU provenga effettivamente dallo smantellamento di bombe, mediante spettrometria gamma dei trucioli, e ispettori russi in America si assicurano che il LEU venga utilizzato solo per combustibile elettronucleare.

L'*Highly Enriched Uranium Agreement*, noto come «Megatons to Megawatts», venne finalmente firmato il 18 febbraio 1993 da Clinton e Eltsin. In pratica prevede l'acquisto da parte americana nel corso di 20 anni di esafluoruro di LEU al 4,4% prodotto in Russia a seguito della trasformazione di 500 t di WGU; gli USA pagano il costo equivalente all'arricchimento da uranio naturale a LEU (circa 8 miliardi di dollari) e mettono a disposizione della Russia una quantità di uranio naturale corrispondente a quello che sarebbe stato richiesto per la produzione del LEU (per circa 4 miliardi di dollari); quest'ultimo in parte verrà trasferito in Russia e in parte venduto dalla Russia sul mercato internazionale³⁴.

Per rendere operativo l'accordo vennero create due società commerciali private, la TENEX in Russia e l'USEC negli USA, responsabili delle transazioni; nel gennaio 1994 fu firmato a Mosca un accordo trilaterale Russia, Ucraina e USA per lo smantellamento delle armi nucleari ucraine nell'ambito del programma, in cambio di combustibile per i reattori nucleari. Infine la TENEX ha definito un accordo commerciale per la vendi-

ta di parte dell'uranio naturale di sua spettanza presso l'USEC a tre compagnie occidentali, Cameco (Canada), GOGEMA (Francia) e RWE NUKEM (Germania), per un totale di oltre 32.000 t; altro uranio naturale di spettanza russa è stato acquistato dal Department of Energy (DOE) americano.

Cinque laboratori ex-militari siberiani sono coinvolti nel progetto: l'HEU estratto dalle bombe smantellate viene inviato per la truciolatura e l'ossidazione a Severks (già Tomsk-7) e Ozersk (già Chelyabinsk-65, già Chelyabinsk-40), per poi venire fluorizzato e diluito a Novouralsk (già Sverdlovsk-44), Severks e Zelenogorsk (già Krasnoyarsk-45)⁶¹; l'esafluoruro di LEU viene imbarcato a San Pietroburgo per Paducah, nel Kentucky, per gli aggiustamenti finali prima della sua consegna a 5 impianti americani per la produzione di combustibile per i reattori⁶².

Il programma «Megatons to Megawatts» è indubbiamente un importante strumento di disarmo, lotta alla proliferazione e al terrorismo nucleare e il principale caso economicamente significativo di riconversione di armi e impianti militari a scopo civile; dopo un avvio lento, a causa dei vari problemi assolutamente nuovi da risolvere, anche per un inserimento non destabilizzante nel mercato, si procede al ritmo di 30 t di HEU trasformate annualmente: a dicembre 2008 sono state eliminate circa 350 t di WGU, l'equivalente di 14.010 testate nucleari e il LEU prodotto copre circa il 44% delle necessità americane di combustibile, ossia il 15% del mercato mondiale. Il programma produrrà in tutto 15.000 t di LEU, in grado di generare 6.000 miliardi di kWh, equivalenti a 10 miliardi di barili di petrolio, il carico di 10.000 super-petroliere.

Il *Material Consolidation and Conversion (MCC) Program* è un secondo, molto più piccolo, programma finanziato dagli USA focalizzato sulla diluizione dell'eccesso di HEU civile russo arricchito oltre l'80%: due centri russi, uno a Dmitrovgrad e uno a Podolsk, sono impegnati nella riduzione dell'HEU a LEU da usare in impianti russi. Il programma MCC prevede la diluizione di 17 t di HEU entro il 2015; alla fine del 2006 erano già state trattate 8,4 t.

Altro HEU russo, di varia provenienza, viene utilizzato per trasformare in LEU uranio proveniente dal ritrattamento di combustibile esausto di impianti di vari Paesi europei: sono state così prodotte circa 500 t di LEU, corrispondenti a circa 17,5 t di HEU.

⁶¹ Laboratori e città militari segrete costruite per il programma nucleare sovietico avevano anche più denominazioni differenti e dopo la caduta dell'URSS hanno ripreso i nomi originali dei villaggi presso cui erano stati costruiti.

⁶² U.S. General Accounting Office, *Status of Transparency Measures for U.S. Purchase of Russian Highly Enriched Uranium*, Report GAO/RCED99-194, Washington, 1999.

Nonostante questi programmi, la quantità di HEU russo rimane molto grande, anche perché sempre nuovo materiale viene liberato dallo smantellamento delle armi nucleari russe in soprannumero e dalle operazioni di recupero dell'HEU da motori marini e impianti civili. In realtà gli impianti russi sono in grado di trattare una quantità maggiore di HEU, ma il mercato internazionale difficilmente potrebbe assorbire l'immissione di ulteriore LEU senza gravi scompensi.

Il mondo scientifico internazionale, ritenendo necessaria un'accelerazione dell'eliminazione dell'HEU russo per motivi di sicurezza, lotta alla proliferazione e contrasto al terrorismo, sta considerando possibili soluzioni efficaci ed economicamente compatibili⁶³.

Riduzione dell'HEU militare americano

L'eliminazione di HEU americano è molto più lento, sia perché negli USA si sta smantellando solo un numero limitato di testate nucleari, sia perché gran parte dell'HEU in eccesso è stato riservato per la propulsione navale. Dal 1994 all'estate 2008 circa 96 t di HEU sono state trasformate in LEU, di cui 2,6 t a un tenore del 19,75% per reattori di ricerca⁶⁴. Parte dell'HEU è risultato contaminato da vari isotopi tanto da non poter essere trasformato in combustibile di qualità commerciale, ma il DOE ha ottenuto l'autorizzazione per utilizzarlo nei propri reattori: si tratta di circa 47 t di HEU, di cui 23 t erano già state convertite alla fine del 2006. Il DOE prevede la conversione del rimanente materiale in eccesso a partire dal 2010 al ritmo di circa 3 t all'anno.

Propulsione navale

La segretezza sui motori nucleari marini e sul loro combustibile rende difficile un'analisi tecnica indipendente per esaminare le possibilità e implicazioni di una loro conversione a LEU. Si sa che sono tutti del tipo ad acqua pressurizzata e informazioni indirette si ricavano dalla presumibile potenza globale delle navi e, nel caso dei sommergibili, dalle dimensioni dello scafo e dai tempi di rifornimento. Studi sono stati fatti per il reattore KLT-40 impiegato in alcuni rompighiaccio russi (sul quale sono state fornite informazioni dal governo russo a quello norvegese), raggiungendo la conclusione che la sostituzione dell'attuale combustibile HEU al 40% con LEU al 20% ma con una densità

⁶³ R.L. Civiak, *Closing the Gaps, Securing High Enriched Uranium in the Former Soviet Union and in Eastern Europe*, Federation of American Scientists, Washington, 2002.

⁶⁴ R. George, *U.S. HEU Disposition Program*, in *Proceedings of the 49th INMM Annual Meeting*, Nashville, 13-17 July 2008.

più elevata non riduce la potenza e la durata operativa del nocciolo del reattore⁶⁵. Combustibile LEU adatto è stato sviluppato in Russia per un analogo reattore civile per impianti elettronucleari montati su chiatte.

Per quanto riguarda i sommergibili, che ovviamente richiedono reattori estremamente compatti e rifornimenti più rari possibile, il fatto che alcune marinerie siano passate a combustibile a LEU conferma che è possibile rinunciare all'HEU senza perdere di potenza e con ricariche di combustibile ogni 7-10 anni operativi. La marina americana, alla richiesta nel 1994 del Congresso di esaminare la conversione a LEU al 20%, ha risposto negativamente⁶⁶ in quanto i nuclei dei reattori sono previsti durare quanto i sommergibili, ossia 33 anni, dato che per ricaricare il reattore dei loro sommergibili è necessario tagliare lo scafo e saldarlo di nuovo. Per questo motivo gli USA hanno creato grandi scorte di HEU per la propulsione navale, riservando allo scopo gran parte dell'HEU estratto dalle armi smantellate.

Va osservato che stanno emergendo nuove tecnologie per la propulsione di sommergibili in immersione, molto meno costose della propulsione nucleare, che richiede notevoli strutture di appoggio e pone problemi ambientali alla radiazione delle navi, come dimostra il caso russo. Queste tecnologie eliminano la necessità di sommergibili nucleari per missioni che non siano strettamente strategiche, le quali solamente richiedono lunghissimi tempi di immersione; gli altri sommergibili e le navi di superficie possono mantenere un ruolo efficace nella struttura di difesa anche con propulsione non nucleare, riducendo notevolmente le spese e migliorando la sicurezza globale e le condizioni ambientali¹⁵.

Reattori di ricerca e produzione d'isotopi a scopo medico

Come abbiamo visto, l'HEU utilizzato per scopi civili è una minima parte delle scorte globali, tuttavia merita particolare attenzione per la sua dispersione e la frequente inadeguatezza della sua protezione fisica, e perciò particolarmente vulnerabile al rischio di furto o di diversione militare. Da qui l'attenzione della comunità scientifica, di governi e della IAEA per la ricerca di soluzioni alternative che permettano l'eliminazione dell'HEU dalle attività non militari.

Un *Technical Workshop on HEU Minimization* si è tenuto a Oslo il 17-18 giugno 2006, per esaminare i problemi e propor-

⁶⁵ A.C. Diakov, A.M. Dmitriev, J. Kang, A.M. Shuvayev, F.N. von Hippel, *Feasibility of Converting Russian Icebreaker Reactors from HEU to LEU Fuel*, in «Science and Global Security», 14, 2006, pp. 33-48.

⁶⁶ Director, Naval Nuclear Propulsion, *Report on Use of Low Enriched Uranium in Naval Nuclear Propulsion*, June 1995.

67 C. Chuen, W.C. Potter, *The Oslo Symposium: On the Road to HEU Minimization*, James Martin Center for Nonproliferation Studies, Monterey, 22 August 2006; vedi anche J. Goldemberg, *On the Minimization of Highly Enriched Uranium (HEU) in the Civilian Sector Workshop Report*, Technical Workshop on HEU Minimization, Oslo, 17-18 June 2006, e i contributi al seguente simposio politico: L.S.H. Holgate, *Partnerships for HEU Minimization*, e W.C. Potter, *Comments on Policy Options for HEU Minimization and Elimination*.

68 La *Seven Country Initiative* è stata promossa dalla Norvegia a seguito del fallimento della conferenza di revisione del 2005 dell'NPT e coinvolge Australia, Cile, Indonesia, Romania, Sudafrica e Regno Unito. Ha come obiettivo l'individuazione di principi comuni e priorità per rafforzare i tre pilastri dell'NPT: disarmo, nonproliferazione e sviluppo dell'energia nucleare civile.

69 Le quattro compagnie mondiali produttrici del 95% del tecnezio utilizzato al mondo sono MDS-Nordion (Canada), Tyco-Healthcare Mallickrodt (Olanda), Institut National des Radioéléments (IRE, Belgio) e Nuclear Technology Products (NTP, Sudafrica); esse sono riluttanti a modificare la forma di produzione per i costi economici e gli impegni finanziari della conversione a LEU. I reattori si trovano, rispettivamente, a Chalk River (NRU), Petten (High Flux Reactor), Mol (BR2) e Pelindaba (Safari-1); un altro centro di produzione si trova in Francia a Saclay (Osiris). Tutti questi reattori stanno raggiungendo il limite della loro operatività, con oltre quarant'anni di attività, e, per evitare il rischio dell'interruzione dei rifornimenti di isotopi radiomedici, si sta studiando come prolungarne la vita. Per un'analisi di costi e disponibilità, vedi F.N. von Hippel, L.H. Kahn, *Feasibility of Eliminating the Use of Highly Enriched Uranium...*, cit.

70 E. Bradley, P. Adelfang, I.N. Goldman, *Highly Enriched Uranium to Low Enriched Uranium Fuel*

re soluzioni per la conversione degli impianti civili da HEU a LEU, sia per reattori di ricerca e pulsati, che per assemblaggi critici e per i bersagli generatori d'isotopi a scopo diagnostico; i tecnici hanno individuato soluzioni operative efficaci, ma non si è raggiunto un accordo a livello politico per la definizione di un impegno formale mirante alla riduzione dell'HEU nelle attività civili⁶⁷, come proposto dalla Norvegia nell'ambito della *Seven Country Initiative*⁶⁸, accordo che era uno degli obiettivi dell'evento.

La produzione attuale del tecnezio-99m per medicina, concentrata per il 95% in pochi centri⁶⁹ e basata sull'irraggiamento di HEU, come abbiamo visto, sta portando ad accumuli di WGU presso i centri di produzione e la ridotta radioattività di tale materiale non crea una barriera difensiva per furti o usi illegali. La IAEA ha iniziato nel 2005 un progetto di ricerca coordinata (CRP) per lo sviluppo di tecniche di produzione locale a piccola scala di molibdeno-99 usando LEU o attivazione neutronica. Gli obiettivi sono appunto di individuare tecnologie alternative e studiare procedure operative e organizzative nel settore medico al fine di mettere in grado i singoli Paesi di produrre i radiofarmaci necessari localmente senza l'impiego di HEU. I principali aspetti tecnici all'esame riguardano la composizione chimica e le caratteristiche fisiche dei composti di LEU da utilizzare, l'efficacia dei procedimenti radiochimici di estrazione, il controllo della produzione di scorie (l'uso di LEU richiede 5 volte più uranio che nel caso dell'HEU), il mantenimento della qualità del prodotto, la garanzia di forniture sicure e sufficienti ai bisogni, il controllo della generazione di plutonio (25 volte superiore usando LEU rispetto all'HEU)⁷⁰. Significativi progressi tecnici sono stati raggiunti: sta entrando in produzione il nuovo reattore a LEU australiano OPAL a Lucas Heights, altri centri e compagnie iniziano a operare con LEU, se pur su piccola scala, e qualche Paese sta sviluppando conseguenti politiche mediche operative⁷⁰.

La conversione a LEU del combustibile dei reattori di ricerca, per la loro grande varietà, richiede che ogni impianto venga studiato individualmente sia dal punto di vista tecnico che delle condizioni operative e del contesto ambientale. La conversione a LEU dei reattori di ricerca, se non si fanno ulteriori modifiche, può al più ridurre l'efficienza, in particolare il flusso di neutroni, del 5-10%. Ma il flusso di neutroni può venire addi-

rittura migliorato con vari interventi: modifica della configurazione o della dimensione del nocciolo, ottimizzazione dell'assemblaggio del combustibile, ridisposizione degli apparati sperimentali e soprattutto utilizzo di nuovi combustibili a LEU ad alta densità⁷¹; ciò si è potuto verificare in vari interventi in cui si è garantita l'efficienza e l'intensità delle prestazioni senza aumento dei costi operativi⁷².

Per quanto riguarda gli assemblaggi critici, numerosi possono venir eliminati del tutto essendo venuta meno la loro motivazione: dalla fine della guerra fredda nessun reattore nucleare è stato impiegato nello spazio e il progetto della NASA di un reattore a HEU per spedizioni interplanetarie è stato sospeso indefinitamente per il costo; i futuri reattori elettronucleari veloci non useranno HEU ma plutonio; molti studi della neutronica dei reattori possono venire oggi compiuti in modo più economico e con pari accuratezza utilizzando simulazioni numeriche al calcolatore⁷³. Un numero molto inferiore a quello attuale di assemblaggi critici a HEU può essere sufficiente a livello mondiale per calibrazione di codici numerici e per esperimenti di nuovi tipi di reattori; essi possono utilizzare uranio a ridotto arricchimento anziché l'attualmente dominante WGU. Un esempio è dato dal reattore francese MASURCA (*Maquette de Surgénérateur à Cadarache*), che impiega HEU al 30% e viene utilizzato da ricercatori di tutto il mondo.

Anche gran parte dei reattori pulsati sono superati, quali simulatori di esplosioni nucleari e per studi di efficienza delle armi, da esperimenti numerici con calcolatori veloci utilizzando codici affidabili e verificati dai confronti con modelli, informazioni sulle proprietà dei materiali e dati empirici precedentemente raccolti in laboratorio e con test sotterranei⁷⁴; per questo motivo gli Stati Uniti hanno spento due dei loro tre reattori pulsati, risparmiando le spese necessarie per metterli in condizioni di piena sicurezza. Studi condotti in USA e Russia dimostrano che reattori pulsati a LEU possono fornire le stesse informazioni di quelli a HEU²⁶ e ricercatori di Sarov stanno sviluppando uno studio di fattibilità per la conversione a LEU del loro BGR.

Dal programma *Reduced Enrichment for Research and Test Reactors* alla *Global Threat Reduction Initiative*

Nella seconda metà degli anni Settanta l'accresciuta percezione dei rischi legati al combustibile HEU dei reattori di ricerca di-

Conversion Projects, 29th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR), Prague, 23-27 September 2007.

⁷¹ La densità tipica dell'uranio nei combustibili HEU era di 1,3-1,7 g/cc e nei primi combustibili a LEU in lega uranio-alluminio la densità raggiungeva i 2,3-3,2 g/cc, per giungere nel corso degli anni Ottanta a 4,8 g/cc; attualmente una collaborazione internazionale (Argentina, Canada, Corea del Sud, Francia, Russia e USA) sta consolidando una lega uranio-molibdeno con densità di 6-8 g/cc, mentre si intensificano le ricerche per l'uranio monolitico in lega con il molibdeno da 15,6 g/cc.

⁷² A.J. Bieniawski, *Where to Take HEU Minimization - The US Perspective*, Technical Workshop on HEU Minimization, Oslo, 17-18 June 2006.

⁷³ F.N. von Hippel, A *Comprehensive Approach to Elimination of Highly-Enriched-Uranium from All Nuclear-Reactor Fuel Cycles*, in «Science & Global Security», 12, 3, 2004, pp. 137-165.

⁷⁴ Committee on the Evaluation of Quantification of Margins and Uncertainties Methodology for Assessing and Certifying the Reliability of the Nuclear Stockpile, *Evaluation of Quantification of Margins and Uncertainties Methodology for Assessing and Certifying the Reliability of the Nuclear Stockpile*, National Research Council, The National Academies Press, Washington, 2008.

spersi nei vari Paesi portò nel 1978 al lancio negli USA del programma *Reduced Enrichment for Research and Test Reactors* (RERTR) mirante allo sviluppo delle tecnologie necessarie per la conversione a LEU dei reattori di ricerca presenti nei Paesi occidentali, in gran parte utilizzando combustibile fornito dagli USA: vennero individuati 106 reattori da convertire e inizialmente l'obiettivo era di ridurre le esportazioni di HEU da 450 kg annui a 150 kg; seguendo le indicazioni dell'*International Fuel Cycle Evaluation* (INFCE) il DOE puntò allo sviluppo di combustibili ad alta densità con un arricchimento del 19,5%, concentrando le ricerche al laboratorio nazionale di Argonne⁷⁵. Nello stesso anno un programma analogo iniziò nell'Unione Sovietica, che dal 1980 ridusse dal 90% al 36% l'arricchimento del combustibile fornito ai reattori di ricerca di altri Paesi; a partire dalla seconda metà degli anni Ottanta difficoltà economiche ostacolarono in questo campo le attività sovietiche, che ripresero dal 1994 in collaborazione con gli USA, nell'ambito di un accordo formale fra il DOE e il Ministero russo dell'energia. Intanto si è andato intensificando il rimpatrio negli USA del combustibile esausto dei reattori di ricerca, che, come già osservato, contiene una frazione notevole di HEU; il programma *Foreign Research Reactor Spent Nuclear Fuel* (FRR SNF) accoglie negli USA oltre a combustibile dei reattori anche bersagli HEU utilizzati per la produzione di isotopi medici; il FRR SNF riguarda materiale irradiato prima del 2016 e restituito entro maggio 2019 e fornisce assistenza per le varie operazioni di rientro.

Alla fine degli anni Novanta Russia, USA e IAEA hanno lanciato il programma *Russian Research Reactor Fuel Return* (RRRFR) per il ritorno in Russia di combustibile HEU sia fresco che irradiato di 20 reattori di ricerca forniti dall'Unione Sovietica a 17 Paesi; i reattori devono venire o spenti o convertiti a LEU con combustibile conforme alle norme nazionali e rispettando le convenzioni previste dalla IAEA; l'HEU deve venire restituito prima del carico di nuovo combustibile LEU. Entro il 2016 il programma prevede di trasportare al complesso di riprocessamento di Mayak un totale di 2.000 kg di HEU e 2.500 kg di combustibile esausto.

Nella seconda metà degli anni Novanta i programmi subirono un rallentamento sia per carenza di finanziamenti sia per una diminuita attenzione da parte dei governi interessati; a fronte

⁷⁵ A. Travelli, *Fuel Issues: Replacement of HEU*, IAEA Scientific Forum, Vienna, 22 September 2004.

⁷⁶ P. Staples, *An Overview of the Global Threat Reduction Initiative Program for Research Reactor Conversions*, 49th INMM Annual Meeting, Nashville, 13-17 July 2008.

⁷⁷ P. Adelfang, I.N. Goldman, A.N. Soares, E. Bradley, *Status and Progress of IAEA Activities on Research Reactor Conversion and Spent Fuel Return Programmes in the Years 2005-2006*, IAEA, Vienna, 2008.

⁷⁸ P.C. Bleek, *Global Cleanout: An Emerging Approach to the Civil Nuclear Material Threat*, Belfer Center, Harvard University, Cambridge (Mass.), September 2004.

⁷⁹ Y. Sokolov, *Welcome Address to 30th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, RERT 2008 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Washington, 5-9 October 2008.

⁸⁰ Il caso più difficile di conversione è rappresentato dal reattore tedesco FRM-II di Monaco da 20 MWt (critico dal marzo 2004) che consuma circa 40 kg di HEU al 93% all'anno; esiste un progetto di riduzione dell'arricchimento del combustibile a un tasso inferiore al 50% entro il 2010, ma non si prevede la possibilità di piena conversione a LEU con la tecnologia attuale, che richiederebbe la totale modifica della geometria del reattore.

⁸¹ I 20 Paesi che hanno ridotto l'HEU a meno di 1 kg sono: Austria, Brasile, Bulgaria, Cile, Columbia, Corea del Sud, Danimarca, Filippine, Georgia, Grecia, Indonesia, Iraq, Lettonia, Norvegia, Portogallo, Slovenia, Spagna, Svezia, Thailandia e Vietnam. In Italia rimangono fra 100 e 200 kg di HEU, in combustibile irradiato. Dati desunti dal James Martin Center for Nonproliferation Studies, Monterey e dall'IPFM.

⁸² V.G. Aden, E.F. Kartashev, V.A. Lukichev, S.A. Sokolov, *Lowering the Enrichment of Fuel in Research Reactors*, in «Atomic Energy», 103, 1, 2007, pp. 573-576.

delle critiche, in particolare degli ambienti scientifici, il 26 maggio 2004 il DOE decise di accelerare ed espandere l'eliminazione di HEU dalle attività civili con significativi finanziamenti (sui 50 M\$ annui) e condensando i programmi precedenti nella *Global Threat Reduction Initiative* (GTRI) e lanciazione di nuovi, ai quali partecipano in varie forme oltre 90 Paesi⁷⁶ con l'assistenza tecnica della IAEA⁷⁷. Il programma *Global Research Reactor Security* provvede al rafforzamento della sicurezza dei materiali nucleari al di fuori dell'ex-Unione Sovietica finché non vengano eliminati, reimpatriati o degradati: sono coinvolti 18 reattori in 5 Paesi. Infine il *Gap Materials Program* intende affrontare le problematiche relative all'HEU civile non coperte dagli altri progetti: più di 145 kg di HEU è stato così riportato negli USA da Belgio, Canada, Italia e Olanda.

Vi sono stati inoltre interventi occasionali, sostenuti in varie forme dagli USA anche in collaborazione con la Russia e la IAEA, che hanno permesso il recupero di tutto l'HEU precedentemente esistente in Kazakistan, Georgia, Serbia, Romania e Bulgaria⁷⁸.

A seguito di questi programmi e di iniziative indipendenti, a ottobre 2008 sono stati convertiti o completamente disattivati 62 reattori⁷⁹ e si sono individuati altri 39 convertibili con le attuali tecnologie; altri 28, soprattutto di progetto russo, richiedono sviluppi speciali e combustibili LEU ad altissima densità non ancora disponibili⁸⁰. A novembre 2008, 20 Paesi si sono liberati dall'HEU posseduto in precedenza⁸¹, essendo stati rimpatriati negli USA oltre 1.100 kg di HEU trattato e in Russia oltre 760 kg di HEU fresco o trattato da 11 Paesi.

Gli USA si sono impegnati a convertire a LEU tutti i propri reattori di ricerca entro il 2014. Anche la Russia ha deciso di accelerare la conversione a LEU dei suoi reattori di ricerca, dopo uno studio condotto dal 1994 su nuovi elementi di combustibile e loro assemblaggi ad alta densità⁸². L'obiettivo attuale è la conversione o spegnimento di 129 reattori entro il 2018.

7. Metodi e programmi di eliminazione del plutonio

Metodi

Il plutonio separato presenta problematiche maggiori dell'HEU per quanto riguarda l'abbattimento delle sue potenzialità mili-

tari dato che, a differenza dell'HEU, non può venire diluito con suoi isotopi non fissili, dato che tutti i suoi isotopi sono in grado di produrre una reazione a catena esplosiva; inutilizzabile a scopi militari sembra solo il plutonio-238, che però si produce in minime quantità. L'eliminazione del plutonio è soprattutto importante quale azione anti-proliferazione e per il consolidamento del disarmo nucleare, data la relativa difficoltà del suo impiego da parte di terroristi.

Gli studi compiuti da americani e russi⁸³ hanno individuato come obiettivo per la messa in sicurezza del plutonio militare la sua trasformazione in una forma che presenti la stessa inaccessibilità del plutonio presente nel combustibile esausto dei reattori commerciali. In pratica sono stati considerati possibili solo tre metodi:

- immagazzinare definitivamente il plutonio in strutture di massima sicurezza sotto continua sorveglianza;
- mescolare il plutonio con uranio e fabbricare combustibile MOX da utilizzare nei reattori esistenti;
- immobilizzare il plutonio con scorie altamente radioattive.

Strutture della massima sicurezza sono state predisposte in Russia presso Majak⁸⁴, con il contributo americano nell'ambito del programma Lugar-Nunn, e in Nevada, rafforzando la *Device Assembly Facility* costruita negli anni Ottanta per preparare gli ordigni dei test nucleari; in questo modo il plutonio viene protetto dai rischi di dispersione, diversione e furto, ma rimane disponibile per venire lavorato e utilizzato per nuove armi nucleari in tempi brevi e a costi limitati. Impianti di questo tipo sono comunque utili per il deposito temporaneo degli esplosivi nucleari in attesa di eliminazione.

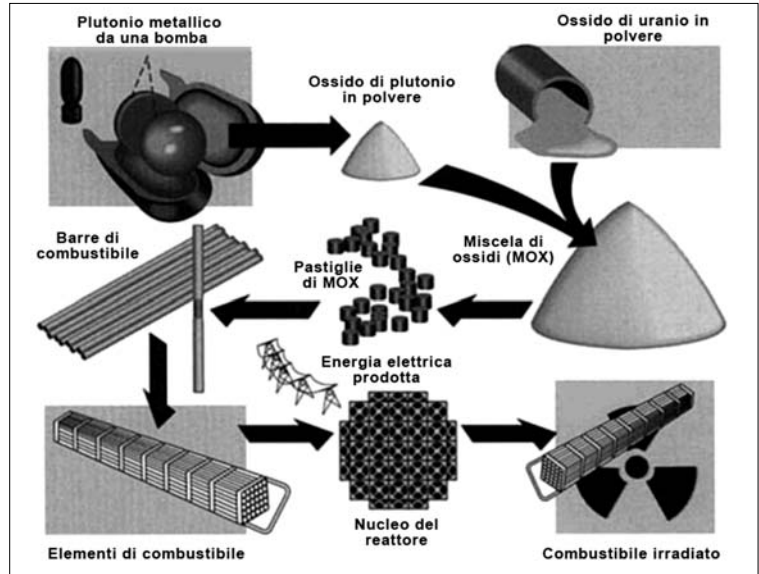
Impiegando i due ultimi metodi il plutonio finisce mescolato in modo inestricabile con materiali altamente radioattivi, in modo che sia molto costoso e difficile da recuperare. La prima fase di questi processi consiste nella separazione del nucleo di plutonio metallico dagli altri componenti dell'arma nucleare, nella sua polverizzazione e riduzione a ossido PuO₂.

Le successive fasi per la produzione di MOX (figura 5) sono: la miscelatura con ossido di uranio UO₂ (10 parti a 1); la compressione della polvere e la sua cottura a formare pastiglie ceramiche cilindriche, che poi vengono inserite in lunghi tubi metallici a formare elementi di combustibile, che contiene 4-5% di plutonio. Una volta utilizzato in un reattore, il combusti-

⁸³ U.S. National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium*, National Academy Press, Washington, 1994; U.S. National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control, *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium: Reactor-Related Options*, National Academy Press, Washington, 1995; tali rapporti si basano anche su F. Berkhout, A. Diakov, H. Feiveson, H. Hunt, E. Lyman, M. Miller, F.N. von Hippel, *Disposition of Separated Plutonium*, in «Science & Global Security», 3, 1993, pp. 161-213.

⁸⁴ M. Bunn, *Mayak Fissile Material Storage Facility*, in *Nuclear Threat Initiative Research Library: Securing the Bomb*, Project on Managing the Atom, Harvard University and Nuclear Threat Initiative, Cambridge (Mass.), 2004.

Figura 5. Schema del processo di eliminazione del plutonio delle bombe mediante trasformazione in MOX e seguente irradiazione



bile MOX esausto contiene ancora 2/3 del plutonio, dato che l'uranio-238 produce nuovo plutonio che viene consumato solo in parte; il plutonio si trova comunque mescolato a scorie altamente radioattive, che richiederebbero processi chimici e manipolazione a distanza per il suo eventuale recupero.

Va detto che la fabbricazione di combustibile MOX è molto più rischiosa e costosa di quella del LEU e il suo maneggio richiede maggiori salvaguardie e procedure di sicurezza negli impianti di produzione; continuano studi e prove per individuare le tecnologie di produzione ottimali⁸⁵.

La velocità di eliminazione del plutonio come combustibile MOX per reattori ad acqua leggera è più lenta di quella dell'HEU, poiché per ragioni di sicurezza solo un terzo del combustibile di tali reattori può essere MOX, per cui un impianto da 1 GWe impiega tre anni a eliminare 1 t di plutonio. Più efficienti si prospettano reattori veloci in grado di utilizzare combustibile con maggiore concentrazione di plutonio: il reattore dimostrativo russo BN-800 da 800 MWe attualmente in costruzione dovrebbe poter irradiare annualmente 1,6 t di plutonio come MOX.

Non tutto il plutonio di origine militare può venire utilizzato per produrre MOX, in particolare a causa della presenza di contaminanti; in tale caso l'unica possibilità rimane l'immobilizzazione del PuO_2 in scorie radioattive.

⁸⁵ S.R. Greene, *Reactor-based Plutonium Disposition: Opportunities, Options, and Issues*, IAEA-SM-358/38, IAEA, Vienna, 2000.

Nel metodo d'immobilizzazione, l'ossido di plutonio viene vetrificato o reso in forma ceramica insieme a prodotti di fissione altamente radioattivi: nel primo caso il vetro contiene meno del 10% di plutonio, mentre la ceramica può immobilizzarne percentuali maggiori⁸⁶. La vetrificazione è una tecnologia già sviluppata per il trattamento delle scorie altamente radioattive e correntemente impiegata in Belgio, Cina, Francia, Giappone, Russia, Regno Unito e USA, ma presenta limiti per l'applicazione al plutonio, poiché il vetro è instabile dal punto di vista termodinamico e su tempi geologici può cristallizzare, perdendo le capacità di contenimento. La ceramizzazione sembra più stabile chimicamente su tempi lunghi⁸⁷, permette l'immagazzinamento di maggiore quantità di materiali altamente radioattivi e la sua produzione non presenta problemi di sicurezza. Il Dipartimento dell'Energia americano ha scelto per l'eliminazione di parte del plutonio militare una forma ceramica, lo synroc, una miscela di vari minerali e leghe. Un altro metodo d'immobilizzazione allo studio propone la produzione di pastiglie di MOX di qualità inadeguata all'uso come combustibile, le quali vanno mescolate con barre di combustibile esausto altamente radioattivo in contenitori comuni. Ricerche in corso sono dedicate allo studio di barriere radioattive che rendano insormontabili le difficoltà del recupero del plutonio comunque immobilizzato.

⁸⁶ A. Macfarlane, *Immobilization of Excess Weapon Plutonium: A Better Alternative to Glass*, in «Science & Global Security», 7, 1998, pp. 271-309.

⁸⁷ Molte rocce, fra le più antiche, contengono materiali ceramici ricchi di sostanze radioattive; la loro lunghissima durata, miliardi di anni, dimostra la capacità di resistere alla corrosione e ai danni da radiazione. I vetri naturali, essenzialmente di origine vulcanica, sono molto più giovani, non raggiungendo i quaranta milioni di anni, e meno sicure sono le previsioni sulla loro stabilità e resistenza alla corrosione per lunghi tempi geologici.

⁸⁸ J.P. Holdren, E.P. Velikhov (co-chairs), *Final Report of the US-Russia Independent Scientific Commission on Disposition of Excess Weapons Plutonium*, Office of Science and Technology Policy, Washington, 1997.

⁸⁹ Il testo dell'accordo si trova, ad esempio, sul sito del Dipartimento di Stato americano all'indirizzo www.state.gov/documents/organization/18557.pdf.

Programmi di eliminazione

Lo stato attuale dell'eliminazione del plutonio militare è molto più arretrato e insoddisfacente di quella del LEU, e riguarda praticamente solo la Russia e gli USA, che nel 2000 hanno dichiarato di possedere ciascuno 50 t di WGP in eccesso rispetto alle necessità militari.

Nell'incontro del *Group of Eight Nuclear Safety and Security Summit* (Mosca, aprile 1996) per iniziativa di Eltsin venne creata una commissione scientifica americano-russa sullo smaltimento del plutonio militare in eccesso: i risultati della commissione riverberano le indicazioni dell'Accademia delle Scienze americana, con proposte operative per i due governi⁸⁸, che sono state in parte recepite dal *Plutonium Management and Disposition Agreement* (PMDA) del 2000 fra Russia e USA⁸⁹.

L'accordo prevede che ciascuna parte elimini almeno 34 t di plutonio di qualità militare e collabori all'eliminazione concordata di quantità ulteriori, o come combustibile o attraverso

immobilizzazione o altri metodi concordati, al ritmo di almeno due tonnellate all'anno, sotto controllo reciproco e ispezioni coinvolgenti la IAEA. Le parti s'impegnano a realizzare il programma in modo sicuro e nel rispetto dell'ambiente. Il governo americano partecipa al sostegno delle attività in Russia con un contributo fino a 200 M\$, finalizzato al progetto, realizzazione e gestione degli impianti necessari per lo smaltimento, e si sollecitano ulteriori contributi da parte di altri paesi interessati a una rapida eliminazione del plutonio russo e dei pericoli che esso comporta. Un preciso programma di sviluppo temporale di 20 anni a partire dal 2002, con scadenze per gli obiettivi via via da raggiungere⁹⁰, prevedeva per gli USA l'inizio dell'utilizzo del MOX prodotto in reattori entro il settembre 2007 ed entro il marzo 2008 le operazioni di immobilizzazione; la Russia entro il 2008 avrebbe dovuto produrre MOX a livello industriale.

Di fatto il programma sta subendo enormi ritardi e si trova ancora nella fase di progettazione degli impianti. Gli USA verso la metà del 2007 hanno deciso di utilizzare le 34 t di plutonio per la produzione di MOX e solo nel maggio 2008 il DOE ha firmato un accordo con la compagnia francese AREVA per la costruzione di un impianto di produzione di MOX al centro nucleare di Savannah River, secondo un progetto basato sull'analogo impianto francese Melox a Marcoule; l'impianto dovrebbe entrare in funzione nel 2016. Per 13 t di plutonio militare di qualità inadatta alla produzione di MOX il DOE prevede l'immobilizzazione in forma ceramica entro il 2013. Intanto i costi del programma sono andati lievitando e le stime attuali si aggirano sui 6 miliardi di dollari.

La Russia considera il proprio plutonio eccedente l'impiego nelle bombe come un'importante riserva energetica da utilizzare in impianti elettronucleari, e pertanto non ammette la possibilità di immobilizzarlo in scorie radioattive, ma solo di convertirlo in MOX. Tuttavia, neppure in Russia esisteva nel 2002 un impianto di produzione di MOX. Controversie sui problemi di responsabilità dei fornitori americani per l'impianto russo di produzione MOX sono state definite solo nel dicembre 2006 e ora si prevede che l'impianto entrerà in funzione non prima del 2018, con oltre 10 anni di ritardo. Anche i problemi finanziari si stanno acuendo: i contributi da parte dei Paesi occidentali sono arrivati a 850 M\$, inclusi 400 M\$ americani, mentre i costi dell'impianto e della sua operazione sono levitati a 4,1

⁹⁰ E. Sokova, *Plutonium Disposition*, James Martin Center for Nonproliferation Studies, Monterey, July 2002.

G\$⁹¹. Un'ulteriore causa nel ritardo del programma russo è stato il dibattito interno alla comunità nucleare russa sul tipo di combustibile da produrre, se per reattori ad acqua leggera, reattori veloci o reattori a gas ad alta temperatura. Solo all'inizio del 2007 il governo russo ha deciso di privilegiare l'impiego del plutonio nel reattore veloce BN-800, che non sarà operativo prima del 2012. Vale la pena osservare che il BN-800 produrrà più plutonio di quanto ne consumi e che i russi intendono recuperarlo e riciclarlo; è stato raggiunto un accordo ulteriore, per cui la Russia si impegna comunque a non purificare il plutonio riprocessato a qualità militare.

Osservato che in realtà le quantità di plutonio di cui si prevede attualmente l'eliminazione sono ancora piccole rispetto alle scorte esistenti e comunque richiedono tempi lunghi, mentre una crescente quantità di plutonio viene separata dalle attività civili, si deve concludere che il problema del plutonio e dei rischi che esso comporta resteranno a lungo con noi.

In questa situazione, il passo più urgente da compiere è la messa in sicurezza delle scorte di plutonio sotto un monitoraggio internazionale per aumentare la reciproca garanzia che non possano venire impiegate per la produzione di armi, in attesa che esso venga trasformato fisicamente in forme tali che sia estremamente difficile e costoso recuperarlo a scopi militari.

8. Un impegno per la scienza, la politica e la società civile

Questi ultimi anni, in particolare dopo l'11 settembre 2001, hanno visto un significativo aumento di attenzione e di iniziative concrete miranti alla mitigazione del rischio di impieghi illegali di esplosivi nucleari. Gli sforzi maggiori a livello politico sono rivolti contro la possibilità di azioni terroristiche: il 13 aprile 2005 l'Assemblea Generale dell'ONU ha adottato la *International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism*⁹², mirante a creare una base legale per la collaborazione internazionale per l'investigazione, prosecuzione ed estradizione di colpevoli di atti di terrorismo nucleare, e il 15 luglio 2006 i Presidenti Bush e Putin hanno lanciato la *Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism*, cui aderiscono attualmente settantacinque Paesi⁹³, designata a «prevenire l'acquisizione, il

⁹¹ Joint U.S.-Russian Working Group on Cost Analysis and Economics in Plutonium Disposition, *Analysis of Russian-Proposed Unified Scenario for Disposition of 34 Metric Tons of Weapon-Grade Plutonium*, U.S. Department of Energy, Washington, 2006.

⁹² La convenzione è entrata in vigore il 7 luglio 2007 con la 22ma ratifica e a dicembre 2008 ha 115 firmatari e 49 parti. Per il testo vedi *International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism*, A/59/766, United Nations, New York, 2005.

⁹³ Il testo della *Global Initiative* si trova sul sito del governo americano all'indirizzo https://ostiweb.osti.gov/up/docs/IAEM_docs/pdf/607.pdf.

trasporto o l'uso da parte di terroristi di materiali nucleari e sostanze radioattive o ordigni esplosivi improvvisati utilizzando tali materiali, e altresì azioni ostili contro impianti nucleari». E l'urgenza di quest'ultimo punto è stata platealmente dimostrata dall'attacco, il 7 novembre 2007, al centro nucleare di Pelindaba, che ospita le scorte di HEU prodotto per il programma nucleare militare sudafricano degli anni Settanta e Ottanta⁹⁴.

Nonostante le molteplici iniziative nazionali e internazionali rimane un'enorme distanza fra la gravità e urgenza delle minacce alla sicurezza mondiale poste dall'esistenza delle grandi scorte di materiale fissile militare e l'ampiezza e tempestività della risposta dei vari Paesi. Molti programmi procedono lentamente spesso per vincoli e ostacoli dovuti a scarso impegno e collaborazione di e fra le strutture responsabili, per una varietà di motivi: l'onnipresente segreto militare, irrigidimenti a difesa della sovranità nazionale, sottovalutazione del pericolo, impedimenti burocratici. Ciò ritarda l'impiego stesso dei fondi disponibili: gli USA prevedono globalmente per le varie iniziative 1.083 M\$ per il 2009, una riduzione del 18% rispetto al bilancio 2008⁹⁵.

Spesso le iniziative procedono spedite quando godono dell'attenzione dei massimi livelli politici, tipicamente dei Capi di Stato, per poi impantanarsi una volta di competenza di funzionari intermedi e delle burocrazie statali. Ad esempio, il programma di messa in sicurezza delle strutture nucleari russe lanciato dai senatori Nunn e Lugar si trovò presto nelle pastoie di vincoli generati da sospetti, segreti e lentezze burocratiche, che vennero superate da decisioni al vertice dopo gli attentati dell'11 settembre 2001; se le iniziative non cessarono del tutto nel frattempo è stato solo perché scienziati russi e americani continuarono nella collaborazione fra laboratori evitando di formalizzare le attività e di coinvolgere le istituzioni⁹⁶.

La piena collaborazione esistente a livello mondiale fra scienziati e tecnologi esperti delle varie problematiche e fra le istituzioni scientifiche è uno dei punti di forza per il raggiungimento di soluzioni ai problemi tecnici e per sollecitare l'azione dei responsabili politici.

Il settore civile

Come abbiamo visto, rimangono solo minori problemi tecnici per l'eliminazione di HEU nel settore civile:

⁹⁴ Durante la notte, un gruppo di 4 intrusi, tagliata la recinzione esterna elettrificata a 10.000 V, penetrò in una sala controllo, ove sparò a un operatore. Intanto un secondo gruppo, superata in un altro punto la recinzione perimetrale, attaccò le forze di sicurezza. Entrambi i gruppi riuscirono a dileguarsi senza perdite; la direzione dell'impianto affermò che non si erano impadroniti di alcunché di valore.

⁹⁵ M. Bunn, *Securing the Bomb 2008*, Project on Managing the Atom, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard University, Cambridge (Mass.), November 2008.

⁹⁶ *Russian-American Collaborations to Reduce the Nuclear Danger*, «Los Alamos Science», 24, 1996.

– lo sviluppo di combustibili avanzati a LEU per reattori di ricerca, al fine di arrivare al traguardo di uranio monolitico, che permetterebbe la conversione di praticamente tutti i reattori di ricerca mondiali;

– l'individuazione di metodi efficaci ed economicamente vantaggiosi per la sostituzione dei bersagli a HEU per la produzione del tecnezio per scopi medici.

Ampie collaborazioni internazionali su queste tematiche possono accelerare i tempi delle soluzioni tecniche e garantire la massima trasparenza e garanzia reciproca. Va osservato che manca ancora un inventario completo di tutto l'HEU in impieghi civili, punto di partenza necessario per ogni azione globale: la IAEA potrebbe farsi carico della raccolta delle informazioni e delle eventuali indagini.

In alternativa alla conversione e messa in sicurezza⁹⁷ dei numerosi reattori di ricerca ancora operanti a HEU, molti di essi possono essere spenti e le ricerche trasferite presso un numero limitato di strutture internazionali di eccellenza operanti sotto una direzione collegiale: ciò, oltre a mitigare il problema dell'HEU, permette economie ma soprattutto assicura una migliore qualità delle ricerche potendo fornire apparati migliori e strumentazione di altissima qualità continuamente aggiornata e arricchita.

Sono quindi maturi i tempi per decise azioni politiche che portino ad accelerare la conversione a LEU di tutte le strutture civili, inclusi i rompighiaccio russi e la produzione di radiofarmaci. A Oslo è emerso che motivi economici, convenienza industriale, nonché malintesi sensi di prestigio nazionale rendono ancora impraticabile una convenzione formale per il bando dell'HEU dalle applicazioni civili; si può allora puntare a suscitare a livello internazionale una norma «morale» che delegittimi il possesso e l'uso di HEU al di fuori degli impieghi militari, nell'interesse della sicurezza nazionale e internazionale. A questo obiettivo può contribuire significativamente l'azione dell'opinione pubblica e di organizzazioni non governative.

Sono ancora necessarie ricerche per l'attenuazione dei pericoli legati al plutonio, in particolare per le opzioni di immobilizzazione. A fronte delle prospettive di un rafforzamento del suo uso civile, sia a seguito dell'eliminazione del plutonio di origine militare come MOX negli attuali reattori, sia per i progetti di impianti di quarta generazione attualmente in fase di sviluppo⁹⁸, è importante l'individuazione di precise linee guida che

⁹⁷ Si rileva che per molti reattori di ricerca, in particolare quelli installati all'interno di università, i costi necessari per la messa in sicurezza secondo le norme suggerite dalla IAEA e dalle legislazioni nazionali superano normalmente quelli della conversione a LEU.

⁹⁸ Generation IV International Forum, *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, GIF-002-00, December 2002; *The U.S. Generation IV Fast Reactor Strategy Report*, U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, DOE/NE-0130, Washington, December 2006. Osserviamo che nessuno dei progetti di impianti di quarta generazione usa HEU o LEU, ma solo uranio naturale e plutonio, che per la maggior parte subisce fissione assieme agli altri attinidi prodotti, in modo che nel combustibile esausto si trovino solo prodotti di fissione non utilizzabili a scopo militare.

assicurino il rispetto degli obiettivi di non proliferazione, la trasparenza dei programmi e stretti controlli sui trasferimenti internazionali⁹⁹. L'immobilizzazione del plutonio deve tener conto di due aspetti, non ancora risolti in modo soddisfacente: nel breve periodo rendere il plutonio indisponibile per uso militare e rischi terroristici, sui tempi lunghi garantire l'ambiente da rischi di contaminazione radioattiva. Ancora poco noto, ad esempio, è l'effetto della radioattività sulle strutture vetrose o ceramiche di contenimento e la conseguente alterazione delle loro proprietà chimiche sui tempi lunghi.

Per affrontare il problema della proliferazione nucleare a fronte della ripresa mondiale dell'energia elettronucleare, un salto di qualità può venire da un controllo multilaterale del ciclo del combustibile nucleare in tutte le sue fasi¹⁰⁰, nello spirito delle proposte di Niels Bohr e Robert Oppenheimer agli albori dell'era atomica; improponibili ai tempi della guerra fredda, sono ora di piena attualità e rilanciate nel contesto internazionale dal direttore della IAEA Mohammed ElBaradei al ricevimento del premio Nobel per la pace 2005¹⁰¹; uno studio recente delle Accademie delle Scienze russa e americana va ancora oltre, considerando la possibilità di una completa internazionalizzazione del ciclo del combustibile, con un'analisi precisa di tutti gli aspetti e l'individuazione delle strategie per realizzarla concretamente¹⁰².

⁹⁹ C. Chuen, *Developing HEU Guidelines*, James Martin Center for Nonproliferation Studies, Monterey, March 2008.

¹⁰⁰ V. Fedchenko, *Multilateral Control of the Nuclear Fuel Cycle*, in *SIPRI Yearbook 2006...*, cit.

¹⁰¹ M. ElBaradei, *Nobel Lecture*, Oslo, 10 December 2005.

¹⁰² U.S. Committee on the Internationalization of the Civilian Nuclear Fuel Cycle; Committee on International Security and Arms Control, Policy and Global Affairs; National Academy of Sciences and National Research Council, Russian Committee on the Internationalization of the Civilian Nuclear Fuel Cycle, *Internationalization of the Nuclear Fuel Cycle: Goals, Strategies, and Challenges*, Russian Academy of Sciences and National Academy of Sciences, Washington, 2008.

Il settore militare

Se per il settore civile vi sono ragionevoli prospettive di soluzioni in tempi brevi, estremamente insoddisfacente è la situazione delle enormi scorte di WGU e di WGP militari, a fronte del continuo e riaffermato interesse delle potenze nucleari negli armamenti nucleari e degli ostacoli al processo di disarmo. Se i programmi di eliminazione dell'HEU sono estremamente lenti e non ancora iniziati quelli del plutonio, ciò dipende soprattutto da mancanza di volontà politica e inadeguata priorità nelle agende per la sicurezza nazionale e internazionale, dato che sono disponibili soluzioni operative e infrastrutture tecnologiche in grado di trattare quantità molto maggiori di materiali fissili pericolosi. Esiste il pericolo che l'accumulo di plutonio e di HEU possa rallentare lo stesso smantellamento delle armi come previsto dagli attuali trattati di riduzione degli arsenali.

Un primo punto delicato relativo alle scorte militari è la totale

manca di controlli internazionali sui materiali fissili americani e russi dichiarati in eccesso rispetto all'impiego nelle armi. Nel 1996 i Presidenti Clinton e Eltsin avevano aderito alla proposta del Direttore Generale della IAEA, Hans Blix, di permettere alla IAEA di monitorare le quantità di WGU e WGP estratte dalle armi che venivano via via smantellate, quale forma di garanzia internazionale sulla riduzione degli armamenti nucleari; venne così lanciata l'«iniziativa trilaterale» fra IAEA, Russia e USA che doveva precisare metodi, procedure e tecniche di verifica compatibili con il rispetto del segreto militare¹⁰³. Dopo 6 anni e 98 incontri di tecnici delle tre parti, i lavori preparatori vennero completati nel 2002 con una relazione finale dettagliata sui vari punti del programma, ma non si giunse alla fase operativa per il rifiuto da parte di Bush e il diminuito interesse di Putin rispetto al suo predecessore¹⁰⁴. I risultati raggiunti dagli esperti rimangono un prezioso bagaglio di conoscenze a disposizione della prossima fase che i rapporti bilaterali Russia-USA verranno ad assumere nella politica dei due nuovi Presidenti¹⁰⁵.

Dal punto di vista operativo, il processo di smantellamento delle armi a fissione e la messa in sicurezza del loro esplosivo nucleare, sia esso HEU o plutonio, evolve in quattro fasi:

- smontaggio, trasporto e smantellamento dell'arma;
 - immagazzinamento temporaneo del materiale fissile estratto;
 - trattamento del materiale fissile per ridurne/eliminarne il possibile riutilizzo a scopo militare;
 - smaltimento su tempi lunghi e protezione dei residui potenzialmente riutilizzabili per armi dei vari impieghi e trattamenti.
- Ciascuna di queste fasi pone problemi di sicurezza e di trasparenza con aspetti sia scientifici che organizzativi e politici a vari livelli, problemi in gran parte ancora aperti e non affrontati con la necessaria urgenza. Un esempio di ricerca necessaria è l'individuazione di metodi e materiali da impiegare per lo smaltimento come rifiuto di HEU che, per la limitata quantità o per la qualità, non sia tecnicamente ed economicamente possibile trattare e recuperare. Vanno studiati i contenitori, le barriere e i siti di smaltimento per una eliminazione sicura dal punto di vista ambientale e protetta da furti o utilizzi pericolosi.

Organizzazioni indipendenti di scienziati stanno affrontando sia aspetti tecnici che strategie operative, nonostante le barriere poste dai vincoli di segretezza e dalla prassi militare, e mantengono la pressione sui responsabili politici per azioni coraggiose

¹⁰³ I Paesi con arsenali nucleari considerano segrete le quantità, la composizione e le forme del materiale fissile contenuto nelle testate nucleari sia globalmente che in ciascuno dei loro componenti.

¹⁰⁴ *Global Fissile Material Report 2008...*, cit., capitolo 6.

¹⁰⁵ T.E. Shea, *The Trilateral Initiative: A Model for the Future?*, in «Arms Control Today», May 2008.

e decise. Ma, come in altri contesti di difesa di interessi globali, soluzioni sono possibili solo se l'opinione pubblica in generale e organizzazioni spontanee di base riconoscono l'urgenza dei problemi e si impegnano per imporli come prioritari nell'agenda dei grandi temi cruciali per la comune sicurezza.

Un obiettivo concreto che potrebbe venire realizzato in tempi brevi è l'adozione di un trattato internazionale per la cessazione della produzione di materiale fissile militare e l'eliminazione di quello esistente, al fine di formalizzare l'attuale moratoria unilaterale di alcuni Paesi nucleari e di estenderla universalmente in modo controllato e con le necessarie garanzie internazionali¹⁰⁶. I problemi che finora hanno praticamente impedito l'avvio formale dei negoziati per un *Fissile Material (Cutoff) Treaty*, sono essenzialmente le tecniche di verifica e le scorte esistenti, con posizioni differenti dei Paesi coinvolti¹⁰⁷. Studi delle possibili tecniche di verifica del trattato e per l'individuazione di eventuali attività clandestine sono stati recentemente messi a punto dall'IPFM¹⁰⁸, con la collaborazione di scienziati di diversi Paesi. Un tale trattato rafforzerebbe il regime di non proliferazione, ridurrebbe i rischi di terrorismo nucleare e favorirebbe la creazione di una base per il disarmo nucleare dato che:

- risponderebbe alle reiterate richieste dell'Assemblea Generale dell'ONU, dalla Risoluzione 1148 del 1957 alla 48/751 del 1993, e agli impegni delle cinque potenze nucleari previsti dal NPT;
- estenderebbe a tutti gli attuali nove Paesi con armi nucleari un bando legalmente vincolante di non produzione di materiale fissile militare, attualmente imposto ai soli paesi non-nucleari;
- ridurrebbe gli aspetti discriminatori dell'NPT imponendo un sistema di controllo e di salvaguardia anche ai Paesi nucleari;
- potenzierebbe i controlli e le regolamentazioni nazionali sul materiale fissile;
- aiuterebbe a rendere irreversibile la riduzione delle armi nucleari;
- creerebbe istituzioni per raggiungere un mondo privo di armi nucleari.

Un definitivo allontanamento della minaccia di future esplosioni nucleari richiede ovviamente una varietà di azioni a molti livelli e in gran parte dei Paesi mondiali, e cambiamenti profondi nel modo di concepire i rapporti internazionali e di gestire gli inevitabili conflitti¹⁰⁹, tuttavia una misura fondamentale, per

¹⁰⁶ Il negoziato per un *Fissile Material Cutoff Treaty* venne approvato senza dissensi dall'ONU nel 1993 (UN General Assembly Resolution 48/75L, 1993) e nel 1995 la Conferenza sul Disarmo (CD) di Ginevra convenne l'inizio dei negoziati, che tuttavia non ebbe seguito; nel 2000 la conferenza di revisione dell'NPT concordò l'inizio immediato dei negoziati nell'ambito della CD, da concludere entro 5 anni (*2000 NPT Review Conference Final Document*, Article VI and Preambular, Paragraphs 8 to 12) ma ancora non sono iniziati i negoziati formali. Nel 2006 gli USA hanno presentato alla CD una bozza di trattato che non presenta alcuna forma di verifica (United States of America, *White Paper on a Fissile Material Cutoff Treaty*, U.S. Mission to the United Nations in Geneva, Press Release, 18 May 2006).

¹⁰⁷ International Panel on Fissile Material, *Country Perspectives on the Challenges to a Fissile Material (Cutoff) Treaty*, Princeton University, Princeton, 2008.

¹⁰⁸ International Panel on Fissile Material, *Global Fissile Material Report 2007*, cit., capitolo 9, e *Global Fissile Material Report 2008...*, cit.

¹⁰⁹ G. Perkovich, J.T. Mathews, J. Cirincione, R. Gottemoeller, J.B. Wolfsthal, *Universal Compliance, a Strategy for Nuclear Security*, Carnegie Endowment for International Peace, Washington, 2005.

cui già esistono studi, modelli accurati e analisi di fattibilità e che può venire intrapresa immediatamente, rimane proprio l'eliminazione urgente degli esplosivi nucleari, come anche ribadito dalla Commissione internazionale indipendente per la liberazione del mondo dalle armi di distruzione di massa¹¹⁰.

Solo l'eliminazione sicura e definitiva di HEU e WGP rende irreversibile lo smantellamento delle armi nucleari e credibile il processo di disarmo nucleare, riduce gli incentivi alla proliferazione di nuovi Paesi e annulla la possibilità del terrorismo nucleare, eliminando dallo scenario mondiale i più terribili terrori contemporanei.

¹¹⁰ The Weapons of Mass Destruction Commission, *Weapons of Terror*, Fritzers, Stockholm, 2006.

