

# le Scienze

Marzo 2019  
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

## Disarmo nucleare



Riciclare il materiale fissile delle testate per alimentare le centrali nucleari potrebbe incentivare la dismissione degli arsenali atomici

### **Paleoantropologia**

Frammenti d'osso rivelano gli incroci dei nostri antenati

### **Fisica**

Strumenti matematici per scoprire nuove particelle

### **Evoluzione culturale**

La trasmissione delle fiabe nelle migrazioni umane

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003  
CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA  
RIVISTA MENSILE - NUMERO 907 - 1 MARZO 2019



9 770036 608000



# Una nuova anomalia da disinnescare

Oggi come nella guerra fredda è necessario agire per contrastare la minaccia delle armi nucleari

**D**ue minuti alla mezzanotte. Anche nel 2018, come un anno prima, il Doomsday Clock, l'orologio dell'Apocalisse, è fermo a un passo dalla catastrofe. Il «Bulletin of the Atomic Scientists», che lo aggiorna dal 1947, l'ha definita una «nuova anomalia», anche perché è la prima volta che l'orologio si trova per due volte così vicino all'ora fatidica. L'unica altra occasione in cui fu fissato a due minuti era il 1953, in piena guerra fredda, quando gli Stati Uniti hanno sperimentato per la prima volta la bomba all'idrogeno.

E tanto basterebbe per capire fino a che punto gli scienziati del «Bulletin» siano preoccupati per lo stato del pianeta. Come nel 2017, una fonte di seria apprensione è l'approccio disinvolto di molti paesi, per usare un eufemismo, alla mitigazione del cambiamento climatico. Dopo anni di piccole ma significative riduzioni, le emissioni di gas serra hanno ricominciato ad aumentare, nonostante l'accordo sul clima di Parigi, o forse proprio per la sua debolezza.

Ma nel comunicato di inizio anno torna a farsi viva la minaccia nucleare, dopo i test del 2017 della Corea del Nord e le schermaglie di inizio 2018 tra Trump e Kim Jong-un (che si sono incontrati ad Hanoi mentre questo numero della rivista andava in stampa). Ma non solo. Gli Stati Uniti hanno abbandonato l'accordo nucleare con l'Iran, e hanno annunciato che si ritireranno dall'Intermediate-range Nuclear Forces Treaty (INF): «Gravi passi verso un completo smantellamento del processo di controllo globale degli armamenti». E, nonostante l'apparente distensione dei rapporti tra Stati Uniti e Corea del Nord, la questione delle testate nucleari coreane e dei test missilistici rimane irrisolta.

Infine, i paesi definiti «nucleari» dal Trattato di non proliferazione stanno procedendo con programmi di modernizzazione degli arsenali che – sempre secondo il «Bulletin» – «sono indistinguibili da una corsa mondiale agli armamenti». E le dottrine militari di Russia e Stati Uniti hanno via via più eroso il tabù contro l'impiego di armi atomiche «mentre il processo per negoziare la riduzione delle testate nucleari e delle scorte di materiale fissile è moribondo».

Moribondo. Ma allora chi ce lo fa fare di parlare di disarmo nucleare? In realtà, la ripresa di quel processo avrebbe due effetti positivi per tutti. Al di là di un evidente miglioramento della sicurezza planetaria, lo smantellamento delle testate atomiche potrebbe fornire combustibile per le centrali nucleari per la produzione di elettricità, come raccontano Flavio Parozzi e Franco Polidoro a pagina 30.

Secondo una stima della Federation of Atomic Scientists, sono quasi 15.000 le testate totali negli arsenali militari, ma 5000 sono testate già dismesse da smantellare. A queste si aggiungono le riserve di uranio altamente arricchito e di plutonio, sufficienti per realizzare 100.000 nuove testate, da cui si potrebbero ricavare circa 1250 tonnellate di materiale fissile. «Un buon esempio dei percorsi fatti – scrivono gli autori – è stato dato dall'accordo Megatons to Megawatts tra Stati Uniti e Russia, con cui nel periodo 1993-2013 sono state convertite in combustibile per le centrali di generazione elettrica 20.000 testate nucleari».

Forse non è la stagione più favorevole per parlare di disarmo nucleare, con i leader del mondo che non fanno che mettere in mostra bicipiti. Ma questa non è una buona ragione per non farlo, anzi.

## Comitato scientifico

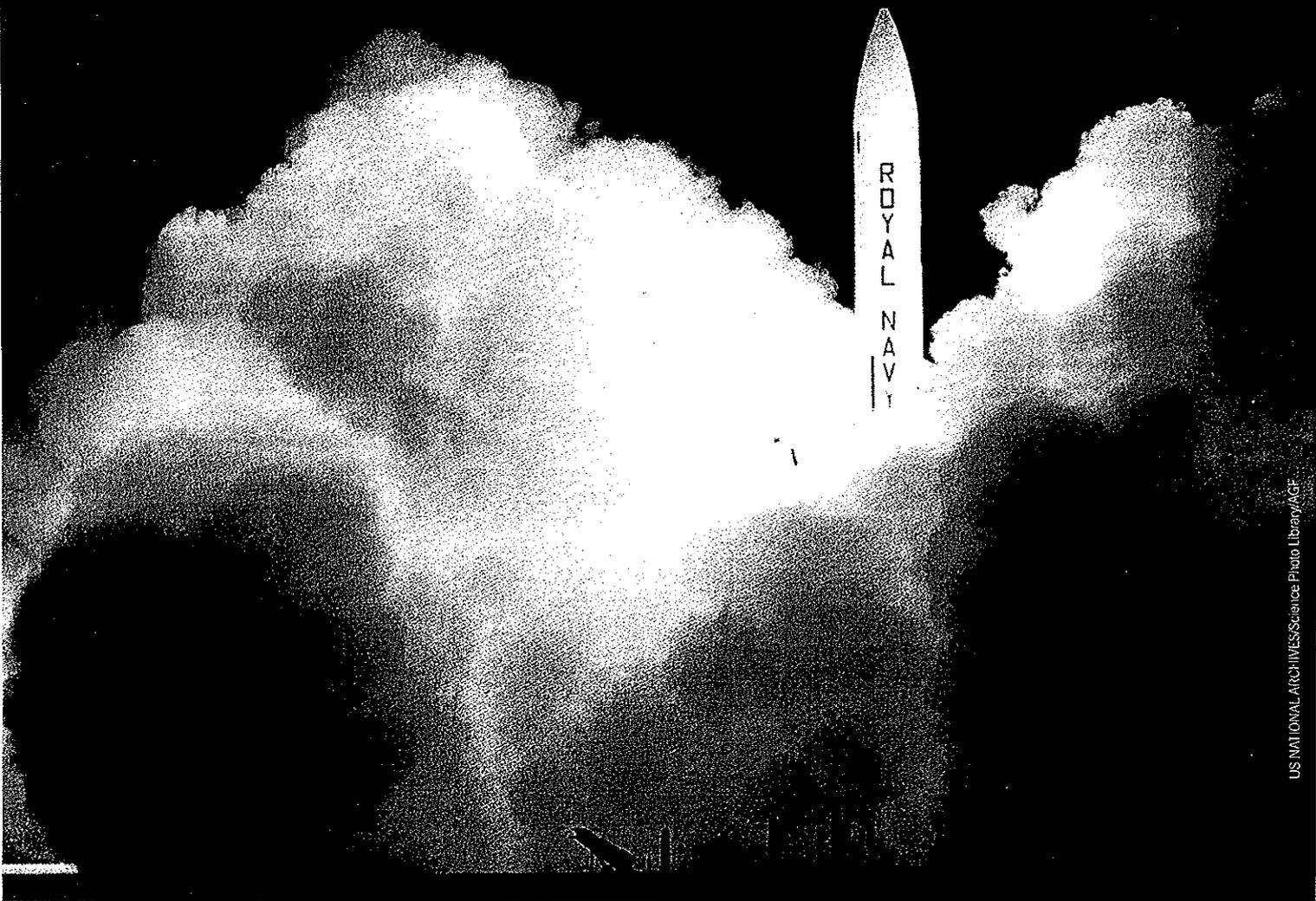
- Leslie C. Aiello**  
presidente, Wenner-Gren Foundation for Anthropological Research
- Roberto Battiston**  
professore ordinario di fisica sperimentale, Università di Trento
- Roger Bingham**  
docente, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego
- Edoardo Boncinelli**  
docente, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano
- Arthur Caplan**  
docente di bioetica, Università della Pennsylvania
- Vinton Cerf**  
Chief Internet Evangelist, Google
- George M. Church**  
direttore, Center for Computational Genetics, Harvard Medical School
- Rita Colwell**  
docente, Università del Maryland a College Park e Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health
- Richard Dawkins**  
fondatore e presidente, Richard Dawkins Foundation
- Drew Endy**  
docente di bioingegneria, Stanford University
- Ed Felten**  
direttore, Center for Information Technology Policy, Princeton University
- Kaigham J. Gabriel**  
presidente e CEO, Charles Stark Draper Laboratory
- Harold Garner**  
direttore, divisioni sistemi e informatica medici, docente, Virginia Bioinformatics Institute, Virginia Tech
- Michael S. Gazzaniga**  
direttore, Sage Center for the Study of Mind, Università della California a Santa Barbara
- David Gross**  
docente di fisica teorica, Università della California a Santa Barbara (premio Nobel per la fisica 2004)
- Danny Hillis**  
co-presidente, Applied Minds, LLC
- Daniel M. Kamm**  
direttore, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, Università della California a Berkeley
- Vinod Khosla**  
Partner, Khosla Ventures
- Christof Koch**  
presidente dell'Allen Institute for Brain Science di Seattle
- Lawrence M. Krauss**  
direttore, Origins Initiative, Arizona State University
- Morten L. Kringelbach**  
direttore, Hedonia: TrygFonden Research Group, Università di Oxford e Università di Aarhus
- Steven Kyle**  
docente di economia applicata e management, Cornell University
- Robert S. Langer**  
docente, Massachusetts Institute of Technology
- Lawrence Lessig**  
docente, Harvard Law School
- John P. Moore**  
docente di microbiologia e immunologia, Weill Medical College, Cornell University
- M. Granger Morgan**  
docente, Carnegie Mellon University
- Miguel Nicolelis**  
condirettore, Center for Neuroengineering, Duke University
- Martin Nowak**  
direttore, Program for Evolutionary Dynamics, Harvard University
- Robert Palazzo**  
docente di biologia, Rensselaer Polytechnic Institute
- Telmo Pievani**  
professore ordinario filosofia della scienza biologiche, Università degli Studi di Padova
- Carolyn Porco**  
leader, Cassini Imaging Science Team, e direttore, CICLOPS, Space Science Institute
- Vilayanur S. Ramachandran**  
direttore, Center for Brain and Cognition, Università della California a San Diego
- Lisa Randall**  
docente di fisica, Harvard University
- Carlo Alberto Redi**  
docente di zoologia, Università di Pavia
- Martin Rees**  
docente di cosmologia e astrofisica, Università di Cambridge
- John Reganold**  
docente di scienza del suolo, Washington State University
- Jeffrey D. Sachs**  
direttore, The Earth Institute, Columbia University
- Eugenie C. Scott**  
Founding Executive Director, National Center for Science Education
- Terry Sejnowski**  
docente e direttore del Laboratorio di neurobiologia computazionale, Salk Institute for Biological Studies
- Michael Shermer**  
editore, rivista «Skeptic»
- Michael Snyder**  
docente di genetica, Stanford University School of Medicine
- Giorgio Vallortigara**  
docente di neuroscienze, direttore associato, Centre for Mind/Brain Sciences, Università di Trento
- Lene Vestergaard Hau**  
docente di fisica e fisica applicata, Harvard University
- Michael E. Webber**  
direttore associato, Center for International Energy & Environmental Policy, Università del Texas ad Austin
- Steven Weinberg**  
direttore, gruppo di ricerca teorica, Dipartimento di fisica, University del Texas ad Austin (premio Nobel per la fisica 1979)
- George M. Whitesides**  
docente di chimica e biochimica, Harvard University
- Nathan Wolfe**  
direttore, Global Viral Forecasting Initiative
- Anton Zeilinger**  
docente di ottica quantistica, Università di Vienna
- Jonathan Zittrain**  
docente di legge e computer science, Harvard University

NUCLEARE

# Testate da riciclare

Le bombe atomiche custodite negli arsenali di vari paesi potrebbero essere dismesse in modo da fornire combustibile per centrali nucleari che producono elettricità

*di Flavio Parozzi e Franco Polidoro*



**L** 16 luglio 1945 in Europa la guerra era finita da più di due mesi, ma il conflitto era ancora aperto con il Giappone. Nei pressi di Alamogordo, nel deserto del New Mexico, veniva collaudato il funzionamento della prima bomba atomica, a cui gli Stati Uniti stavano lavorando da quando temevano che un progetto analogo fosse già in cantiere in Germania.

A questo collaudo generale era stato dato il nome di Trinity Test. L'esplosione della sua piccola sfera di plutonio aveva coronato le aspettative del Progetto Manhattan, liberando una potenza equivalente a poco meno di 20.000 tonnellate di tritolo. Qualche settimana dopo, l'uso di due ordigni come questo sulle città di Hiroshima e di Nagasaki costrinse il Giappone alla resa, mettendo fine alla seconda guerra mondiale.

Questo fu il «peccato originale» che segnò per sempre l'energia nucleare nonostante i benefici portati in seguito dalle sue applicazioni pacifiche in svariati campi. Purtroppo fu l'inizio di una nuova era militare dopo l'invenzione delle armi da fuoco.

La corsa alla nuova super-arma avvenne infatti senza tregua. Già a partire dal 1946 gli Stati Uniti ripresero i loro test atomici nell'Oceano Pacifico, con l'Operazione Crossroads, nell'atollo

di Bikini. Nel 1949 li raggiunse l'Unione Sovietica con la sua prima detonazione nucleare nel poligono di Semipalatinsk, in Kazakistan. E poi li seguirono di lì a poco Regno Unito e Francia, tanto che, dopo il 1950, durante la guerra fredda tra Stati Uniti e Unione Sovietica, furono effettuate da queste due superpotenze oltre 2000 detonazioni di bombe atomiche e più di 300 da Francia, Regno Unito e Cina.

Dopo circa 450 test in atmosfera e in mare, questa corsa portò inevitabilmente a un significativo aumento della contaminazione radioattiva del pianeta. Statunitensi, britannici e sovietici furono perciò indotti a stipulare nel 1963 un primo trattato sulla messa al bando parziale di questo tipo di esperimenti, il Limited Test Ban Treaty, che li impegnò a non fare più esperimenti di armi nucleari in atmosfera, nel mare e nello spazio.



**Prove di guerra.** Test di lancio per un missile Polaris, progettato per trasportare testate nucleari, da Cape Canaveral, in Florida. Questo vettore è stato ritirato a metà degli anni novanta.

Francia e Cina non seguirono immediatamente questa strada, continuando con qualche esplosione in atmosfera, rispettivamente fino al 1974 e al 1980. Poi tutti i test proseguirono nel sottosuolo dei vari poligoni, includendo tra i paesi che avevano sviluppato le loro bombe anche Israele, India, Pakistan e Corea del Nord.

Alla fine degli anni sessanta, quando Stati Uniti e Unione Sovietica avevano ormai riempito i propri arsenali atomici con decine di migliaia di testate, queste stesse nazioni spinsero per la stipula di un accordo internazionale in grado di frenare la proliferazione delle armi nucleari. Noto come Trattato di non proliferazione (TNP), l'accordo entrò in vigore nel 1970. Oggi vi aderiscono 189 paesi, tra cui l'Italia. Il trattato implica soprattutto il divieto alle nazioni «non nucleari» di procurarsi armamenti atomici e a quelle «nucleari» di fornire loro tecnologie per impieghi militari. In pratica, con questo trattato viene riconosciuta una supremazia da parte delle grandi potenze vincitrici della seconda guerra mondiale che hanno sviluppato per prime la tecnologia della bomba atomica (Stati Uniti, Russia, Regno Unito, Francia e Cina).

Gli arsenali atomici statunitensi e russi che erano rimasti fortunatamente inutilizzati divennero oggetto di trattative per una loro progressiva e bilaterale riduzione. Dietro la facciata di lodevole pacifismo, gli obiettivi erano indubbiamente anche il contenimento dei costi per mantenere operative decine di migliaia di testate atomiche di vario tipo, prima o poi da sostituire per motivi di obsolescenza e di degrado.

### Le limitazioni agli armamenti

Anche se oggi Israele, India, Pakistan e Corea del Nord possono contare sulla tecnologia nucleare militare pur non aderendo al TNP, tra i successi della politica di contrasto alla diffusione delle armi nucleari va menzionata la restituzione di quelle ereditate dall'ex Unione Sovietica da parte di Ucraina, Kazakistan e Bielorussia e la rinuncia ai programmi di sviluppo di Brasile, Argentina e Sudafrica. L'arsenale atomico mondiale, che aveva raggiunto un massimo di circa 70.000 ordigni nel 1986, si stima che oggi sia sceso a meno di 15.000 testate, di cui oltre 5000 in attesa di smantellamento (si veda il box nella pagina a fronte).

Negli anni novanta la paura di un conflitto tra il blocco occidentale e quello comunista, in grado di innescare una terza guerra mondiale si spense via via. L'attenzione del mondo si spostò su altre minacce: degrado dell'ambiente, esaurimento delle risorse o catastrofi naturali. Il terrore per la guerra atomica arretrò in secondo piano, seguendo lo stesso destino degli entusiasmi per le missioni spaziali che avevano caratterizzato i decenni precedenti.

I problemi aperti sono ancora tanti. Gli Stati non procedono tutti insieme e con la stessa velocità verso il progresso e la democrazia e l'armamento nucleare è ancora visto, purtroppo, come strumento d'ascesa al potere internazionale da parte di nazioni emergenti. Ciò che è cambiato con l'invenzione della bomba atomica è che anche un paese piccolo, nel relazionarsi con gli altri pae-

**Flavio Parozzi** è ingegnere nucleare, ha lavorato in programmi di ricerca nazionali, europei e statunitensi sulla sicurezza degli impianti nucleari sin dai primi anni ottanta.



**Franco Polidoro** è ingegnere nucleare, ricercatore impegnato da molti anni in programmi di ricerca internazionali nel campo della fisica dei reattori nucleari. Entrambi gli autori svolgono indagini documentaristiche e studi tramite l'associazione CISE2007 di Milano, che riunisce ricercatori e tecnici con lo scopo di promuovere la cultura scientifica e la sostenibilità in ambito energetico e ambientale.



si, può essere indotto a dotarsi di armi nucleari anziché preferire lo sviluppo di normali rapporti diplomatici indirizzati a una politica di pace. A questo va aggiunto il rischio del terrorismo, che opera decisamente fuori dagli schemi tradizionali e potrebbe accedere a ordigni sfuggiti ai controlli dei singoli paesi nuclearizzati.

Mentre nel luglio 2017 l'Assemblea generale delle Nazioni Unite ha ratificato il bando totale delle armi nucleari, il presidente statunitense Donald Trump ha manifestato l'intenzione di procedere in senso opposto, promuovendo una nuova pericolosa escalation nucleare che non sembra limitata alla questione nord-coreana e che potrebbe estendersi coinvolgendo altre grandi potenze. È un gioco d'azzardo molto pericoloso. Alla luce della situazione politica mondiale, il bando totale delle armi nucleari lanciato dalle Nazioni Unite appare come un miraggio, ma è auspicabile che le nazioni «nuclearmente mature» procedano con fermezza verso il ridimensionamento dei propri arsenali e continuino a scoraggiare l'acquisizione di armamenti del genere da parte dei paesi desiderosi di ritagliarsi il loro orticello di potere.

Un buon esempio dei percorsi fatti è stato dato dall'accordo Megatons to Megawatts tra Stati Uniti e Russia, con cui nel periodo 1993-2013 sono state convertite in combustibile per le centrali di generazione elettrica 20.000 testate nucleari, equivalenti a circa 500 tonnellate di uranio altamente arricchito. Un programma in cui anche l'Italia ha svolto un ruolo diplomatico grazie all'appoggio politico del Vaticano e al supporto tecnico e scientifico di militari, di tecnici dell'industria e della ricerca. La strada è sicuramente in salita, ma è l'unica realisticamente percorribile.

### Gli esplosivi delle bombe

La realizzazione della prima bomba atomica avvenne nel contesto del secondo conflitto mondiale dopo la scoperta che con l'isotopo 235 dell'uranio o con altri isotopi artificiali come il plutonio-239 è possibile realizzare una velocissima reazione di disintegrazione

### IN BREVE

**Le centrali nucleari** per la produzione di energia elettrica, sia quelle in funzione che quelle di futura generazione, usano la scissione di nuclei atomici pesanti. Il loro combustibile è dunque

costituito da uranio e, in alcuni casi, anche da una certa quantità di plutonio.

**Nelle centrali** poste sotto il controllo internazionale, le precauzioni prese sulla gestione del combustibile

impediscono o rendono molto difficili le applicazioni militari.

**Questi impianti**, concepiti solo per uso civile, ben si prestano alla distruzione degli esplosivi degli arsenali nucleari in disarmo,

convertendoli in energia elettrica.

**Nel caso del plutonio**, che non può essere smaltito o confinato senza alcun rischio di un suo recupero a scopi bellici, i reattori sono una possibile via per la sua eliminazione.

## Un mondo ancora pericoloso

Il numero esatto di armi nucleari in mano a ciascuna nazione è di norma tenuto segreto. Mettendo insieme le informazioni pubblicamente disponibili, i dati storici e le informazioni raccolte occasionalmente, la Federation of American Scientists (FAS) degli Stati Uniti ha tuttavia formulato una stima degli arsenali atomici mondiali a fine 2017.

Nonostante i progressi nel ridurre gli arsenali nucleari della guerra fredda, l'inventario mondiale di testate nucleari rimane a un livello molto alto. Circa 4000 testate sono schierate con forze operative, pronte per l'uso. Stati Uniti, Russia e Regno Unito stanno riducendo gli inventari delle testate, sebbene il ritmo di riduzione stia rallentando rispetto agli ultimi 25 anni. Francia e Israele hanno scorte relativamente stabili, mentre Cina, Pakistan, India e Corea del Nord stanno aumentando i rispettivi

arsenali atomici. In generale, tutti gli Stati che hanno armamenti atomici continuano a modernizzare le loro forze nucleari e sembrano impegnati a conservarle per un futuro indefinito.

È inoltre da notare che le riserve di uranio altamente arricchito (o HEU, da *Highly Enriched Uranium*), ovvero con percentuali elevate (tra 20 e 80 per cento) dell'isotopo uranio-235 che può generare la reazione di fissione nucleare, e di plutonio disponibili nelle riserve delle varie forze armate sono molto maggiori dei quantitativi attualmente impegnati nelle bombe, e permetterebbero un rilancio della corsa agli armamenti. Si calcola infatti che le attuali riserve militari di uranio altamente arricchito e di plutonio militare sarebbero sufficienti per realizzare 100.000 nuove testate nucleari.

Nazione	Testate impegnate su missili e bombardieri	Testate a disposizione e riserva	Testate in fase di smantellamento	Testate totali	Riserve di HEU militare (tonnellate)	Riserve di plutonio militare (tonnellate)
Stati Uniti	1800	2200	2600	6600	317	92
Russia	1710	2590	2500	6800	616	128
Francia	280	20	?	300	26	6
Regno Unito	120	95	?	215	107	32
Israele	?	80	?	80	0,2	0,86
Cina	?	270	?	270	115	1,8
Pakistan	?	140	?	140	3,1	0,19
India	?	130	?	130	3,2	5
Corea del Nord	?	10-20	?	10-20	?	0,03
	~4000	~5500	~2600	~12100	~1000	~250

dei nuclei in grado di autosostenersi e di liberare un'enorme quantità di energia. (I nuclei sono composti da protoni e neutroni; il numero di protoni definisce l'elemento chimico, e uno stesso elemento può avere versioni diverse tra loro caratterizzate da numeri differenti di neutroni e chiamate isotopi). Questa reazione è chiamata «fissione a catena» e l'isotopo 235 dell'uranio è l'unico disponibile in natura in grado di realizzarla, se posto in opportuna concentrazione e configurazione (si veda il box a p. 34).

La reazione non è di per sé esplosiva, e fu sperimentata per la prima volta nel 1942 a Chicago dal fisico italiano Enrico Fermi con un'apposita pila. Non molto tempo fa è stato anche scoperto che un reattore nucleare funzionante in modo naturale ebbe una sua vita autonoma circa 1,7 miliardi di anni fa in un giacimento di uranio nel Gabon, in Africa. Si è stimato che il reattore naturale funzionò per alcune centinaia di migliaia di anni con una potenza di circa 15 gigawatt termici: la potenza di una centrale nucleare equipaggiata con quattro grandi reattori di attuale generazione.

Nelle centrali nucleari destinate alla generazione elettrica, a seconda delle tipologie di impianto adottate, la reazione a catena può funzionare anche con uranio naturale, in cui l'isotopo fissile 235 è solo lo 0,72 per cento. Grazie al calore prodotto dalla reazione di fissione, nelle centrali nucleari è generato vapore per azionare una turbina, proprio come avviene nelle centrali convenzionali. Per motivi di carattere ingegneristico, nella maggior parte delle centrali elettriche l'uranio è arricchito nell'isotopo

235 in concentrazioni di qualche punto percentuale. Per la realizzazione di ordigni esplosivi, invece, è necessaria una reazione a catena in cui il materiale fissile deve reagire tutto insieme quasi istantaneamente e senza controllo, come succede negli ordigni convenzionali, ma con una potenza che, a parità di massa coinvolta, è milioni di volte quella degli esplosivi chimici (si veda il box a p. 34). Per questo è necessario impiegare uranio-235 quasi puro. Il processo per ottenerlo, denominato «arricchimento isotopico», è complicato e costoso, e solo alcune nazioni dispongono della tecnologia necessaria: ovviamente quelle già in possesso di armi nucleari e quelle che si teme possano acquisirle.

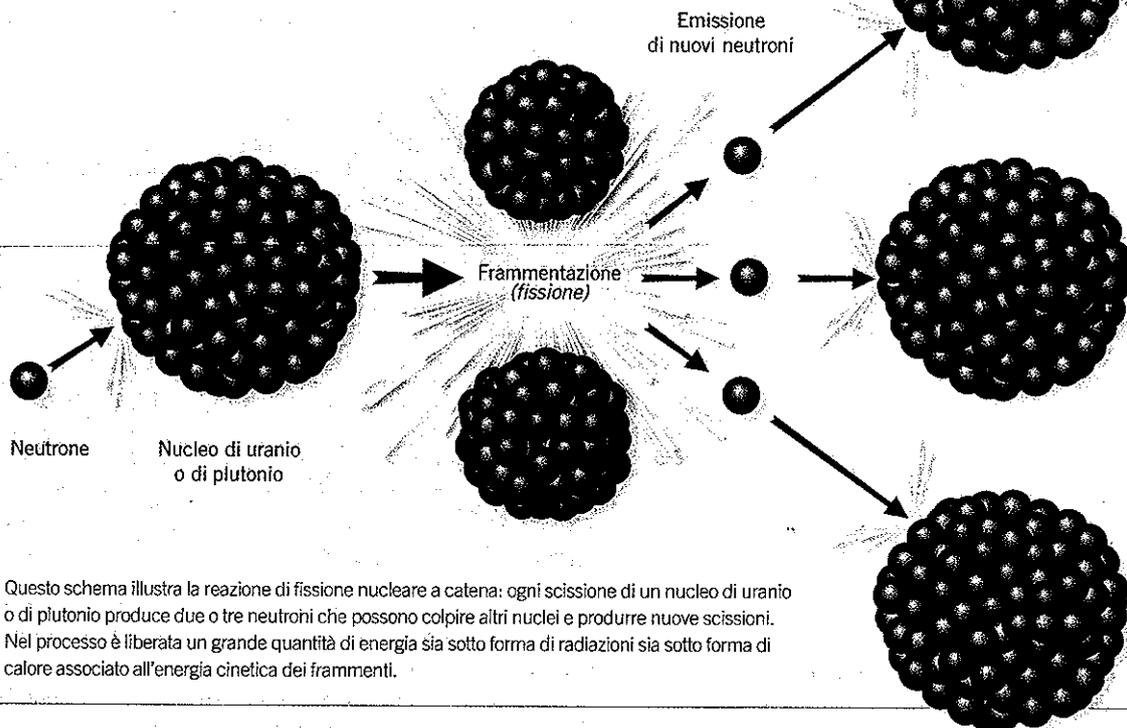
La reazione a catena è realizzabile anche con isotopi artificiali producibili con reattori nucleari appositamente progettati e gestiti, come nel caso del plutonio, anch'esso adatto alla fabbricazione di bombe (si veda il box a p. 35). Le bombe all'idrogeno, ancora più potenti, rappresentano poi un ulteriore passo: si basano sulla fusione di nuclei atomici leggeri, come appunto gli isotopi dell'idrogeno, innescata dall'altissima temperatura prodotta da una bomba a fissione.

### Fonte riciclata

Lo smaltimento dell'uranio altamente arricchito in isotopo 235 proveniente dalla dismissione delle testate nucleari è una strada già percorsa con successo: questo isotopo fissile naturale può infatti essere diluito con uranio naturale o a basso arricchimento,

## Spezzare atomi per ricavarne energia

La potenza degli esplosivi nucleari, se paragonata a quella degli esplosivi chimici, chiarisce il motivo dell'interesse militare: l'esplosione di un chilogrammo di tritolo sprigiona 4,18 megajoule di energia, quella ottenibile con un chilogrammo di uranio o di plutonio (*illustrazione*) può liberare  $8,3 \times 10^7$  megajoule. La fusione nucleare di un chilogrammo di idrogeno si spinge addirittura a  $3,4 \times 10^8$  megajoule. L'enorme potenza delle armi nucleari è quindi quantificata con riferimento a quella dell'esplosivo convenzionale, cioè in migliaia o in milioni di tonnellate di tritolo-equivalente, ossia chilotoni e megatoni. Le bombe lanciate su Hiroshima e Nagasaki, per esempio, erano rispettivamente di circa 15 e 20 chilotoni, mentre le attuali testate nucleari a fissione hanno una potenza di alcune centinaia di chilotoni. Quelle termonucleari a fusione collaudate fino a oggi raggiungono le decine di megatoni.



Questo schema illustra la reazione di fissione nucleare a catena: ogni scissione di un nucleo di uranio o di plutonio produce due o tre neutroni che possono colpire altri nuclei e produrre nuove scissioni. Nel processo è liberata un grande quantità di energia sia sotto forma di radiazioni sia sotto forma di calore associato all'energia cinetica dei frammenti.

fabbricando così combustibile adatto alle centrali elettriche. L'uranio così diluito non può essere direttamente usato per nuove bombe se non mediante il processo di arricchimento isotopico, ripartendo quindi da zero.

A oggi i reattori nucleari funzionanti nel mondo sono 450, per una potenza elettrica complessiva che sfiora i 400 gigawatt e una conseguente produzione di energia elettrica di circa 2500 terawattora all'anno. Altri 54 reattori di grande potenza sono in costruzione, per ulteriori 56 gigawatt. Poiché questi livelli di produzione energetica richiedono un consumo mondiale di uranio-235 che supera le 400 tonnellate annue, la graduale diluizione delle centinaia di tonnellate di questo isotopo proveniente dalle ex-bombe appare confrontabile con questi consumi.

A titolo di esempio, una proposta elaborata dagli stessi autori di questo articolo è stata presentata al seminario *Progetto di pacificazione dell'area coreana* tenutosi nell'ottobre 2017 presso il Sacro Convento di San Francesco ad Assisi. In quella occasione è stata resa pubblica una stima dell'energia elettrica ricavabile dalla distruzione di un lotto-campione di 4000 testate in disarmo, che potrebbe essere oggetto di un nuovo trattato internazionale. L'analisi ha assunto che fra 20 e 25 chilogrammi di uranio arricchito

to al 90-93 per cento nell'isotopo 235 siano disponibili per ogni testata del lotto (recuperando così, in totale, tra 70 e 90 tonnellate di uranio-235).

Lo studio ha considerato tre possibili casi di diluizione dell'uranio delle testate: con uranio naturale (in cui l'isotopo 235 è lo 0,72 per cento), con uranio residuo del processo di arricchimento (0,2 per cento di uranio-235), e con uranio recuperato dal combustibile «usato» (1,2 per cento di uranio-235). I quantitativi in gioco permetterebbero la fabbricazione di combustibile adatto a centrali attuali, dando in cambio un quantitativo di energia elettrica che potrebbe raggiungere i 900 terawattora, circa il triplo dei consumi italiani in un anno.

### Un primo accordo

I paesi maggiormente interessati al trattamento del plutonio militare, visti i loro enormi arsenali nucleari, sono Stati Uniti e Russia, e in misura ridotta Regno Unito, Cina e Francia. Nell'ipotesi di un disarmo significativo, qualche centinaio di tonnellate di plutonio *weapon-grade* (di qualità adatta all'uso militare) si renderebbero disponibili nel mondo, pur con le incertezze riguardo a questo tipo di informazioni spesso coperte da segreto militare.

## Tutti i gradi del plutonio

La realizzazione di una testata richiede l'impiego di una ventina di chilogrammi di uranio-235 oppure di pochi chilogrammi di plutonio-239. Questi, pressoché puri, sono classificati come *weapon-grade* (di qualità adatta per un'arma). Mentre l'uranio-235 può essere separato dall'uranio naturale (arricchimento), il plutonio non esiste in natura e deve essere prodotto nei reattori nucleari partendo dall'uranio-238.

A questo scopo, per ottenere una produzione efficace di plutonio *weapon-grade*, il combustibile nel reattore deve essere irraggiato per un breve periodo di tempo, di norma pochi mesi (contro una permanenza media nei reattori nucleari di 2-3 anni). In questo modo si evita che, oltre al plutonio-239, il combustibile nucleare si arricchisca di altri isotopi del

plutonio con numero di massa più elevato. L'isotopo plutonio-240, in particolare, essendo un forte emettitore di neutroni, degrada le proprietà del plutonio a fini bellici e, una volta accumulato nel combustibile, risulta difficilmente separabile dal plutonio-239.

In base alla percentuale di plutonio-240 presente, il plutonio è classificato in: *weapon-grade* se contiene meno del 7 per cento di plutonio-240, *fuel-grade* se ne contiene dal 7 per cento al 19 per cento e *reactor-grade* se il contenuto è superiore al 19 per cento. L'Agenzia internazionale per l'energia atomica (IAEA), cautelativamente, considera tutte le miscele di plutonio potenzialmente utili al fine della realizzazione di ordigni nucleari.



### Con uranio impoverito.

Il plutonio proveniente dal riprocessamento del combustibile nucleare esausto e l'uranio impoverito, ossia con una concentrazione di uranio-235 inferiore allo 0,72 per cento, miscelati insieme costituiscono il cosiddetto combustibile MOX, che può essere impiegato in reattori ad acqua leggera.

Ma veniamo ai fatti. Nel 2000, nell'ambito degli accordi per la riduzione delle armi nucleari, Stati Uniti e Russia siglavano il *Plutonium Management and Disposition Agreement* (PMDA) con cui si accordavano per smaltire 34 tonnellate di plutonio *weapon-grade* ognuno entro il 2014. Gli Stati Uniti si impegnavano ad autofinanziare un programma per lo stoccaggio del plutonio come scoria e la produzione di combustibile MOX, cioè Mixed OXide, (costituito da uranio impoverito, ossia con una concentrazione di uranio-235 inferiore allo 0,72 per cento, e da plutonio proveniente dal riprocessamento del combustibile nucleare esausto) da destinare ai reattori nucleari ad acqua leggera (LWR). Analogamente la Russia, con il supporto economico dei paesi del G-7, si impegnava a trattare il proprio plutonio di provenienza militare per produrre combustibile MOX da impiegare all'inizio nella propria flotta di reattori nucleari (LWR).

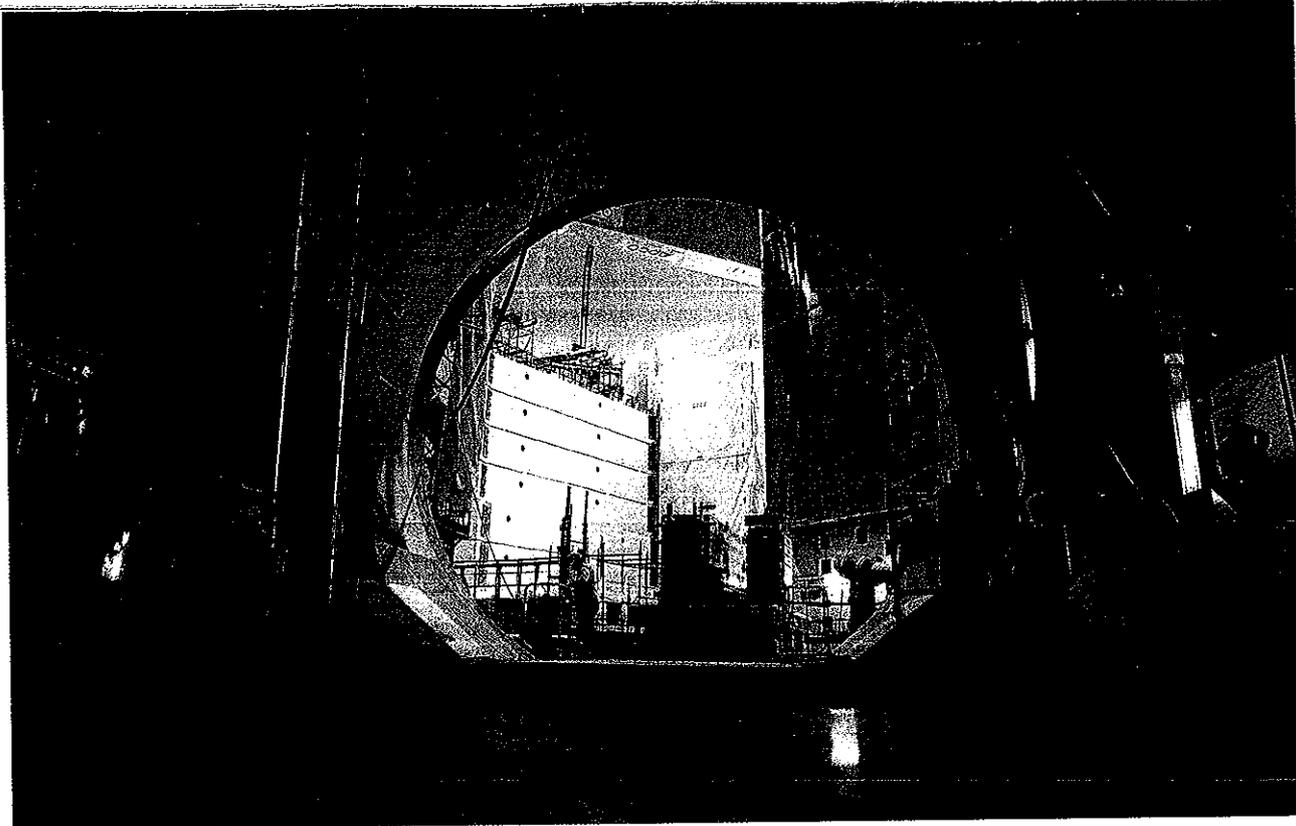
In seguito, un emendamento del 2011 agli accordi del 2000 ratificava per la Russia l'uso del plutonio militare nei suoi reattori veloci BN-600 e BN-800 (che impiegano neutroni ad alta energia per la fissione), visti gli alti costi che l'impiego del MOX avrebbe comportato in quanto non coerente con il ciclo del combustibile

adottato dai russi. Per entrambi i paesi era anche specificato l'obiettivo di smaltimento di 1,3 tonnellate all'anno a partire dal 2018. Tuttavia, mentre l'impianto russo di produzione del combustibile MOX venne completato, il programma statunitense fu oggetto di ritardi e forti ripensamenti. Nel 2016 questo fece recedere unilateralmente la Russia dall'accordo, anche a seguito della crisi nei rapporti internazionali fra Russia e comunità internazionale, sfociati nell'applicazione di sanzioni commerciali.

Oltre ai grossi quantitativi di Stati Uniti e Russia, si stima che Regno Unito e Francia posseggano a tutt'oggi quasi 10 tonnellate di plutonio militare, alle quali si aggiungono quasi due tonnellate della Cina e alcune tonnellate fra India, Israele, Pakistan e Corea del Nord.

### Le opzioni attuali e quelle future

È difficile confrontare le diverse opzioni tecnologiche per il trattamento del plutonio proveniente dallo smantellamento delle testate nucleari. Se per alcuni ci si dovrebbe limitare a renderlo inutilizzabile a fini militari, per altri il materiale fissile delle testate costituisce di fatto un «bene materiale» del paese, quindi la ricerca deve cercare di ottenere i massimi benefici sfruttandolo come



**In costruzione.** A Flamanville, nel nordovest della Francia, è in fase di completamento il nuovo reattore EPR (European Pressurised Water), costruito da Areva. Il reattore è stato progettato per impiegare, se richiesto, solo combustibile MOX, e sarà gestito dall'azienda francese EDF.

combustibile nei reattori nucleari. Queste opposte visioni determinano differenti approcci al problema.

Nella prima via, quella dello stoccaggio, il plutonio verrebbe prima diluito con un materiale inerte, denominato *stardust*, che ne renderebbe molto difficile la separazione e la cui composizione chimica è segreta. Verrebbero così preparate miscele con concentrazioni di plutonio inferiori al 10 per cento da confinare in depositi geologici. Con questa soluzione, pur risultando difficile da riestrarre dalla matrice, il plutonio manterrebbe però intatta la propria composizione isotopica.

Alcuni esperti hanno quindi proposto di ovviare al problema miscelando plutonio weapon-grade con plutonio *reactor-grade* di provenienza civile, che ha un'elevata percentuale di plutonio-240, un isotopo fastidioso per possibili impieghi bellici (*si veda il box a p. 35*), con il vantaggio di modificare la composizione isotopica di questo elemento senza ricorrere a reazioni nucleari con un reattore. La sostenibilità di questa strategia è però messa in discussione osservando che l'isotopo 240, così come tutti gli isotopi fortemente radioattivi, ha un decadimento più rapido del plutonio-239 e, se si deve ragionare su scale temporali di qualche decina di migliaia di anni, il plutonio-240 sparirebbe, permettendo di recuperare ancora l'indesiderato plutonio-239.

Sempre con l'obiettivo dello stoccaggio in depositi geologici per un tempo indefinito, il plutonio potrebbe essere mescolato con scorie ad alta radioattività, in una forma che renda impraticabile la sua estrazione e un nuovo uso come materiale bellico. A questo proposito, all'inizio degli anni duemila il Department of Energy (DOE) statunitense ha studiato un sistema di trattamento del plutonio weapon-grade denominato Can-in-Canister (CIC), che prevede l'immobilizzazione del plutonio mediante il suo incapsulamento in dischi ceramici o di matrice vetrosa. I dischi verrebbero collocati in speciali contenitori (*can*), a loro volta disposti su una struttura metallica (*canister*); a questi verrebbero aggiunti

elementi vetrificati contenenti scorie radioattive ad alta attività, in modo da costituire un deterrente alla sottrazione indebita di plutonio (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*).

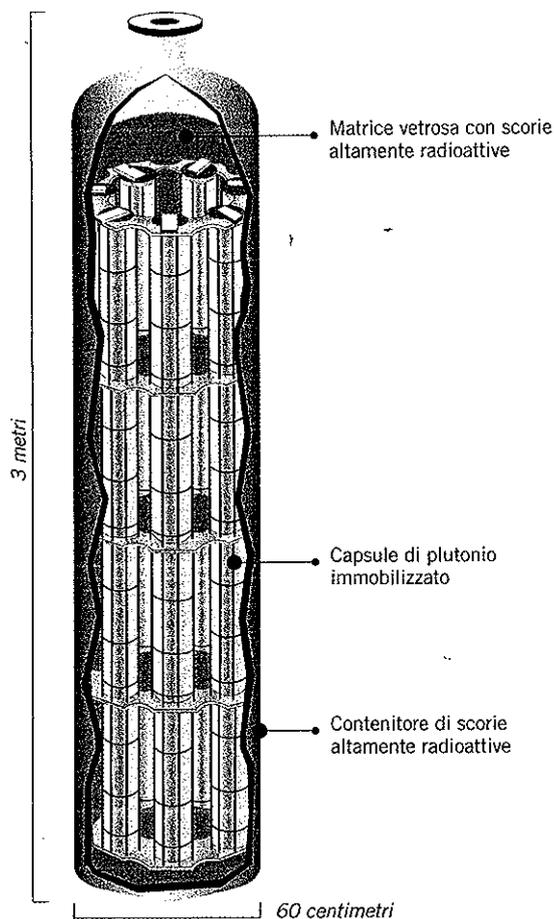
Puntando invece alla distruzione definitiva del plutonio delle bombe, questa deve necessariamente avvenire provocandone la fissione mediante reattori nucleari. A questo scopo, la produzione di combustibile MOX dal plutonio weapon-grade impone la riduzione della concentrazione di plutonio-239 dal 93 al 5 per cento mediante diluizione con uranio impoverito. Nel MOX, il plutonio-239 ha in pratica il compito di sostituire l'uranio-235 nella funzione di «frazione fissile» del combustibile.

Proprio per questo, nel 2007 gli Stati Uniti, nell'ambito dell'accordo PMDA con la Russia, avevano iniziato a costruire un impianto a Savannah River, in South Carolina, per convertire 3,5 tonnellate all'anno di plutonio weapon-grade. L'impianto sarebbe dovuto diventare operativo nel 2016, data poi posticipata al 2019. Ma problemi tecnici, ripensamenti del DOE sulla strategia di trattamento del plutonio, insieme agli alti costi del processo, cresciuti negli anni per l'adozione di misure di contrasto al rischio di proliferazione, hanno di fatto messo in discussione il progetto.

Diversamente, Europa, Russia e Giappone hanno sviluppato una buona esperienza nell'uso del combustibile MOX proprio per chiudere il ciclo del ritrattamento del combustibile esausto. Si pensi che 40 reattori nucleari in Europa hanno ottenuto l'autorizzazione a impiegare combustibile MOX. In particolare, a 30 reattori nucleari francesi è permesso inserire nel reattore fino al 30 per cento di MOX, mentre il nuovo reattore EPR di AREVA è progettato per impiegare, se richiesto, solo combustibile MOX. Attualmente, in Francia circa il 10 per cento dell'elettricità è prodotta impiegando combustibile MOX in 24 centrali nucleari.

Tuttavia bisogna tenere presente che l'impiego del MOX nei reattori tradizionali a neutroni lenti fornisce un tasso di riduzione del plutonio piuttosto modesto. Questo perché più del 90 per

**Can-in-Canister.** Questa tecnologia prevede che 28 contenitori (*can*), ognuno contenente un chilogrammo di plutonio weapon-grade in matrice ceramica o vetrosa, siano disposti in un contenitore più grande (*canister*). I contenitori verrebbero poi circondati da altri contenitori contenenti scorie radioattive ad alta attività sotto forma di matrice vetrosa.



cento del combustibile in questi reattori è costituito da uranio-238 che, catturando i neutroni, produce nuovo plutonio.

Molta ricerca si sta orientando verso lo sviluppo di nuovi combustibili che permettano di chiudere il ciclo, bruciando il plutonio più efficacemente.

Oltre alla conversione del plutonio militare in combustibili MOX per le centrali, per esempio, l'Istituto Kurchatov di Mosca, con il sostegno del governo degli Stati Uniti, ha portato avanti un programma per l'uso nei propri reattori VVER (versione russa degli LWR) di un combustibile a ossidi misti plutonio-torio. Questo tipo di combustibile usa l'isotopo torio-232 al posto dell'uranio-238, e presenta alcuni vantaggi rispetto al MOX: è capace di bruciare più efficacemente il plutonio e permette di impiegare un quantitativo maggiore di plutonio nel reattore rispetto al MOX. L'uso del torio al posto dell'uranio-238 sembrerebbe offrire anche una maggiore resistenza alla proliferazione perché la generazione dell'isotopo fissile uranio-233, dovuto alla cattura di un neutrone da parte del torio-232, produce anche piccole quantità di uranio-232; la catena di decadimento radioattivo di questo isotopo comporta forti emissioni di radiazione gamma, così penetranti da scoraggiare l'eventuale recupero del plutonio.

In futuro la distruzione del plutonio militare potrebbe interes-

sare anche le tecnologie della cosiddetta «IV Generazione», che in buona parte punta sui reattori a neutroni veloci sia per poter produrre proprio plutonio sia per bruciare le scorie a vita lunga.

Per quanto riguarda il plutonio, questa strada potrebbe apparire come un percorso in senso opposto. Ma, dal punto di vista dello sfruttamento della fonte nucleare per tempi molto lunghi, il plutonio rappresenterebbe non un rifiuto scomodo bensì una risorsa. L'efficienza dello sfruttamento dell'uranio permessa dai reattori veloci di IV Generazione si basa sulla trasformazione (trasmutazione) dell'uranio-238, poco coinvolto nella fissione, in plutonio-239.

Questo plutonio non è utilizzabile a fini militari, e potrebbe essere sfruttato per diluire il plutonio weapon-grade proveniente dallo smantellamento delle testate, trasformandolo in combustibile. Riguardo l'eliminazione delle scorie, il flusso di neutroni elevato tipico dei reattori veloci si presterebbe bene anche per la distruzione delle scorie radioattive che hanno maggiore impatto, riducendone il volume e il tempo di stoccaggio nei depositi.

### Scenari e prospettive per il nucleare da fissione

L'entrata in commercio degli impianti a fusione nucleare è rimandata ad almeno la seconda metà di questo secolo e con costi attualmente indefinibili; il ricorso agli impianti a fissione è quindi una realtà mondiale.

Non ci si può girare dall'altra parte o sognare scenari lontani dalla concretezza. È richiesta molta attenzione da parte dell'ingegneria e della ricerca nell'affrontare il problema della sicurezza di questi impianti e della produzione delle scorie. Da questo punto di vista, l'impiego dell'energia da fissione può svolgere un ruolo determinante nell'eliminazione del plutonio proveniente dallo smantellamento delle testate nucleari nonché degli isotopi radioattivi a lunga vita prodotti nel processo di fissione.

Una compagnia elettrica che oggi decidesse di diversificare il proprio parco di impianti per la generazione di elettricità ricorrendo anche alla fonte nucleare non troverebbe alcun modello di reattore veloce di IV Generazione nel catalogo dei costruttori. I primi prototipi dimostrativi sono attesi nel giro di un decennio, mentre l'entrata in commercio dei primi esemplari da collegare a una rete elettrica può essere proiettata verso il 2030, a condizione che siano raggiunti livelli di economicità, sicurezza e sostenibilità paragonabili a quelli degli attuali reattori a neutroni lenti.

Non ci sarà da stupirsi se le migliori soluzioni per affrontare i problemi di cui si è parlato in questo articolo saranno quelli raggiunti dalle nazioni e dalle industrie che continueranno a investire sia nella realizzazione del nucleare di oggi sia nella ricerca di quello di domani. ■

### PER APPROFONDIRE

**Status of World Nuclear Forces.** Kristensen H.M. e Norris R.S., Federation of American Scientists, 2017. <https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-world-nuclear-forces>.

**Combustibile ricavabile da testate nucleari in disarmo.** Parozzi F., Polidoro F., memoria presentata al seminario *Progetto di pacificazione dell'Area Coreana*, organizzato da Civiltà dell'Amore presso il Sacro Convento di San Francesco, Assisi, 28 ottobre 2017.

**The Database on Nuclear Power Reactors.** International Atomic Energy Agency, 2018. <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>.

Il sito web dell'International Panel on Fissile Materials: <http://fissilematerials.org>.

**Settant'anni con la bomba.** Parozzi F. e Polidoro F., in «Le Scienze» n. 563, luglio 2015.