

CIVICO PLANETARIO di MILANO
in collaborazione con CISE 2007



Atomi a Milano

i pionieri della ricerca

23 ottobre 2014

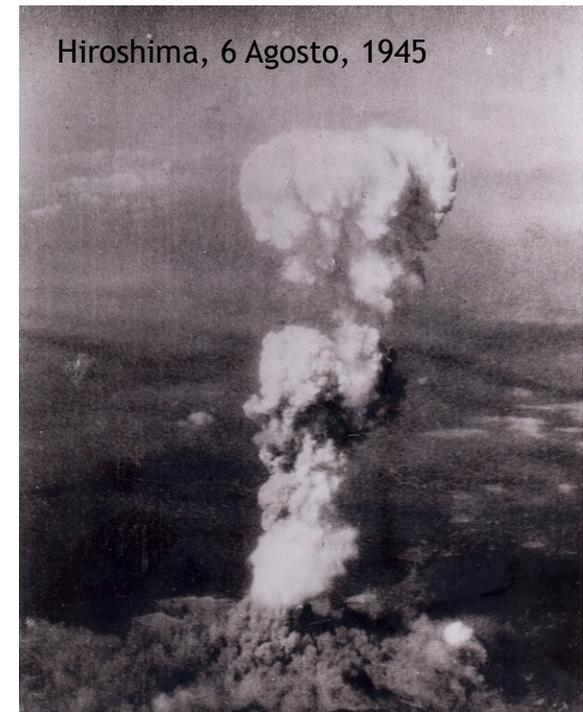
RISCHIO DI PROLIFERAZIONE

Franco Polidoro

Associazione CISE2007 (Centro Italiano per la Sostenibilità e l'Energia)

Contesto storico

- Dopo il lancio delle due atomiche sul Giappone (**Agosto 1945**), il presidente USA Truman, si adopera per imporre il controllo internazionale all'uso dell'energia atomica.
- Nel giugno del **1946**, il diplomatico americano Bernard Baruch presenta alle Nazioni Unite, un piano per l'**eliminazione delle armi nucleari**.
- L' **URSS** respinge il piano Baruch e nel frattempo entra fra le potenze nucleari con l'esplosione della sua prima atomica (**Agosto 1949**).



- Nel frattempo la “Guerra Fredda”, l’esplosione della prima atomica inglese (1952), e della prima **bomba all’idrogeno** (Mike Test, 1952), spinge il presidente americano Eisenhower nel 1953, a sostenere, nell’ambito delle Nazioni Unite, il progetto **Atomi per la Pace** per:
 - *uso pacifico dell’energia atomica;*
 - *abbandono di ogni applicazione militare;*
- L’URSS aderisce all’iniziativa.
- Nel 1957 viene istituita **l’Agenzia Internazionale per l’Energia Atomica** (IAEA).
- Nel frattempo Francia (1960) e Cina (1964) entrano nel “club” degli stati dotati di armi nucleari (“Nuclear Weapon States” - NWSs).



Mike test, Isole Marshall, 1952

- Nel **1968**, USA, URSS, UK (NWSs) e altri stati non dotati di tali armi (“Non-Nuclear-Weapon States” - NNWSs), spingono per l’adozione del **Trattato di Non Proliferazione sulle Armi Nucleari (NPT)**, a cui aderisco ad ora 189 stati.
- Il Trattato entrò in vigore nel **1970**, nonostante **Cina, Francia**, India, Pakistan, Israele, Argentina, Brasile e Sud Africa, non l’avessero ratificato.

- Il Trattato si base su tre “pilastri”:

1) Non-proliferazione

*Tutti NWSs si impegnano a **non** trasferire o assistere altri stati nell’acquisizione di “know-how” nucleare a fini bellici (**Articolo I**),*

e...

*tutti gli NNWSs si impegnano a **non** produrre armi nucleari, e a **non** ricevere o trasferire il relativo “know-how” (**Articolo II**).*



International Atomic Energy Agency
INFORMATION CIRCULAR

INF/CIRC/140
22 April 1970

GENERAL Distr.
ENGLISH

TREATY ON THE NON-PROLIFERATION OF NUCLEAR WEAPONS

Notification of the entry into force

1. By letters addressed to the Director General on 5, 6 and 20 March 1970 respectively, the Governments of the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics, which are designated as the Depository Governments in Article IX, 2 of the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, informed the Agency that the Treaty had entered into force on 5 March 1970.
2. The text of the Treaty, taken from a certified true copy provided by one of the Depository Governments, is reproduced below for the convenience of all Members.

TREATY

ON THE NON-PROLIFERATION OF NUCLEAR WEAPONS

The States concluding this Treaty, hereinafter referred to as the “Parties to the Treaty”,

Considering the devastation that would be visited upon all mankind by a nuclear war and the consequent need to make every effort to avert the danger of such a war and to take measures to safeguard the security of peoples,

Believing that the proliferation of nuclear weapons would seriously enhance the danger of nuclear war,

In conformity with resolutions of the United Nations General Assembly calling for the conclusion of an agreement on the prevention of wider dissemination of nuclear weapons,

Undertaking to co-operate in facilitating the application of International Atomic Energy Agency safeguards on peaceful nuclear activities,

Expressing their support for research, development and other efforts to further the application, within the framework of the International Atomic Energy Agency safeguards system, of the principle of safeguarding effectively the flow of source and special fissionable materials by use of instruments and other techniques at certain strategic points,

Affirming the principle that the benefits of peaceful applications of nuclear technology, including any technological by-products which may be derived by nuclear-weapon States from the development of nuclear explosive devices, should be available for peaceful purposes to all Parties to the Treaty, whether nuclear-weapon or non-nuclear-weapon States,

Convinced that, in furtherance of this principle, all Parties to the Treaty are entitled to participate in the fullest possible exchange of scientific information for, and to contribute alone or in co-operation with other States to, the further development of the applications of atomic energy for peaceful purposes,

Declaring their intention to achieve at the earliest possible date the cessation of the nuclear arms race and to undertake effective measures in the direction of nuclear disarmament,

Urging the co-operation of all States in the attainment of this objective,

Prima pagina del Trattato

2) Uso pacifico

*L'Articolo IV consente a tutti i paesi membri firmatari del Trattato di impiegare l'energia atomica a pacifici in conformità con gli **Articoli I e III.***

3) Disarmo

*Ogni stato membro si impegna a sostenere azioni volte a favorire la fine della corsa agli armamenti nucleari e il disarmo (**Articolo VI**).*

- Sulla base dell'Articolo IX.3 del Trattato, **USA, Russia, UK, Francia e Cina** sono da ritenersi **NWSs** e tutti gli altri NNWSs.
- Alcuni successi del Trattato: Brasile, Argentina, Sud Africa rinunciano ai loro programmi nucleari militari.

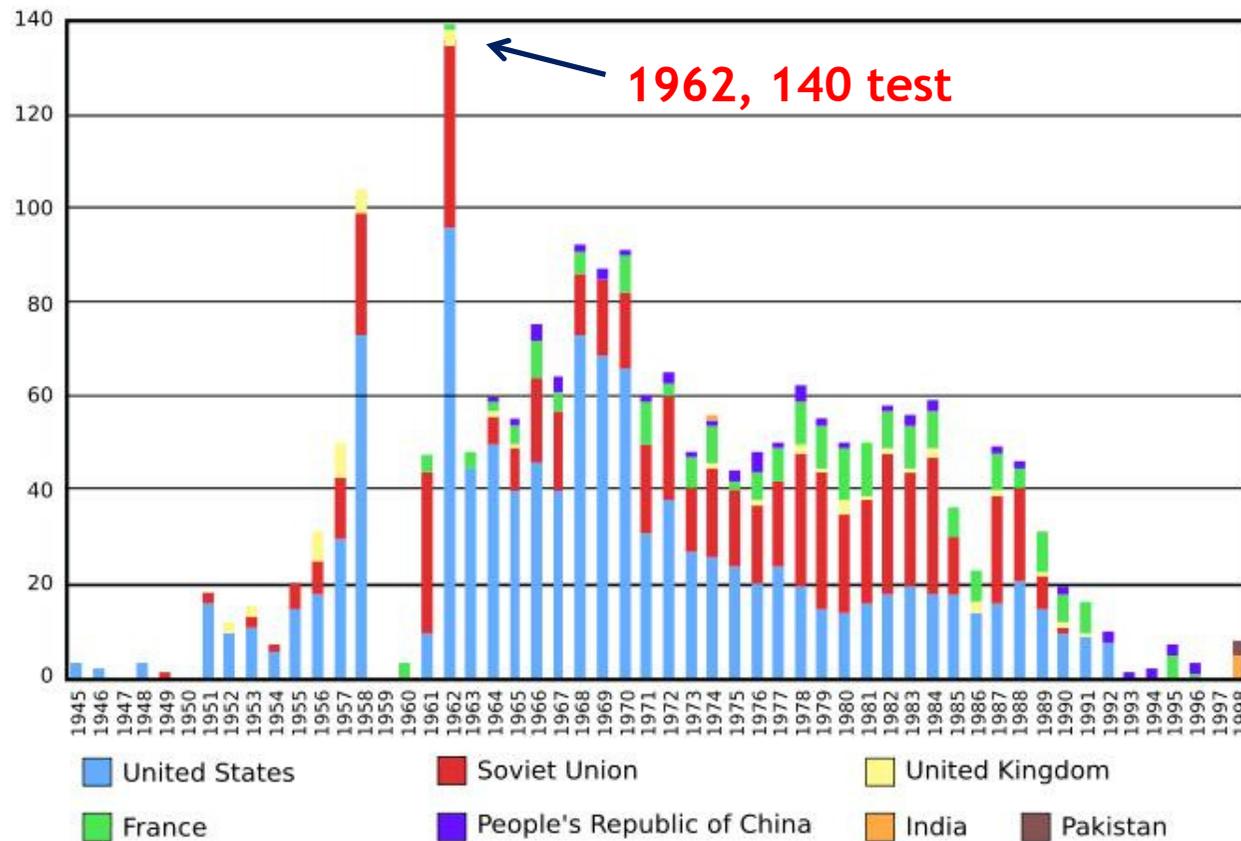
Comunque.....

- Altri 5-6 stati entrarono in possesso di armi nucleari: India (**1974**), Pakistan (**1998**), North Korea (**2006**), Israel, Iran (?).

Test nucleari e “fallout” radioattivo

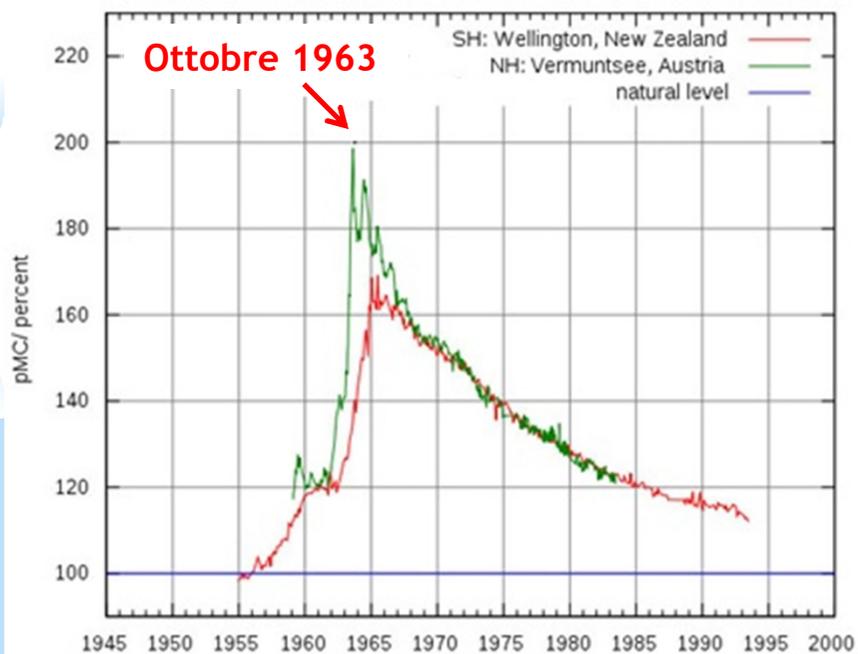
Nonostante il Trattato di non Proliferazione, più di **2000 test nucleari** sono stati eseguiti dal **1945**, provocando un significativo “fallout” radioattivo a livello mondiale.

Worldwide nuclear testing, 1945-1998

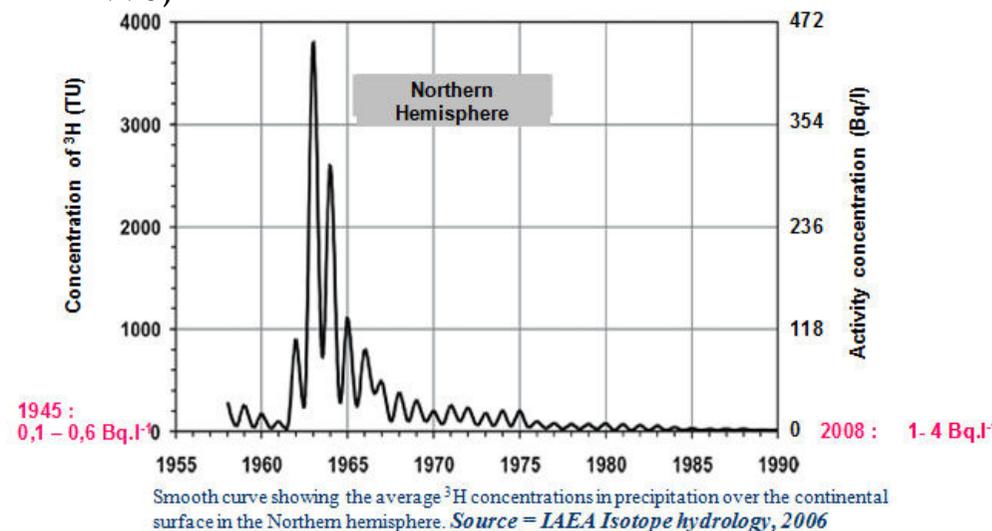


- Durante il 1962, ogni 2-3 giorni si realizza un test nucleare!

Concentrazioni dell'isotopo ^{14}C in atmosfera (1955 - 1994)



Concentrazioni di **trizio** nelle precipitazioni (1958 - 1990)

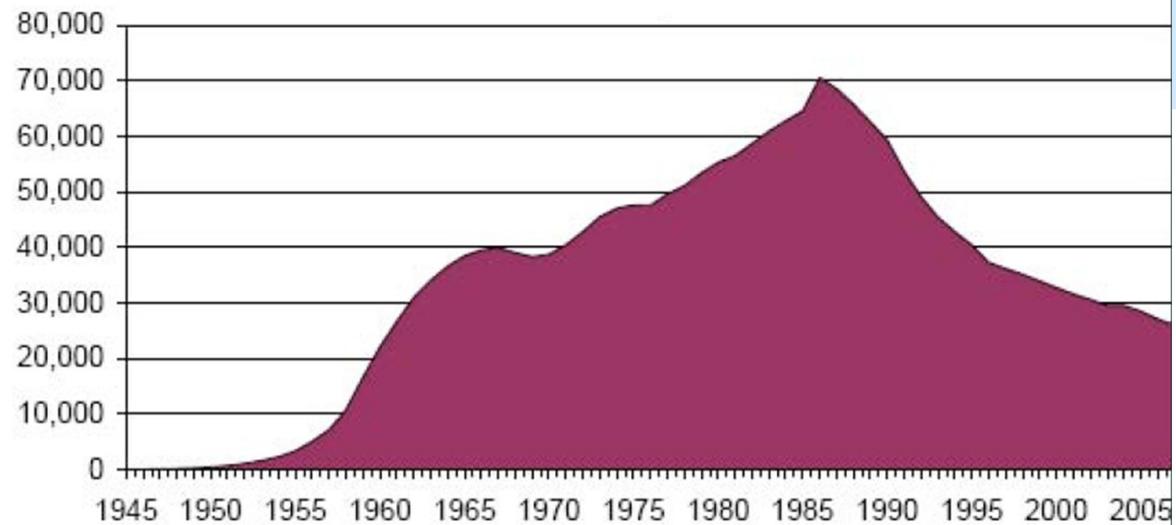


Proveniente dalla detonazione di bombe H.

Arsenali nucleari esistenti

Gestione di decine di migliaia di testate nucleari da parte US/Russia in perenne stato di allerta (pronte al lancio entro 15 min)

Estimated nuclear warheads inventory - period: 1945 -2008



1970 ~ 38000

1986 ~ 70000

Oggi ~ 23000

USA : 10 000

Federazione Russa: 11 000

Regno Unito: 275

Francia: 450

Cina: 550

India: 60 - 90

Israele: 80 - 100

Pakistan: 24 - 48

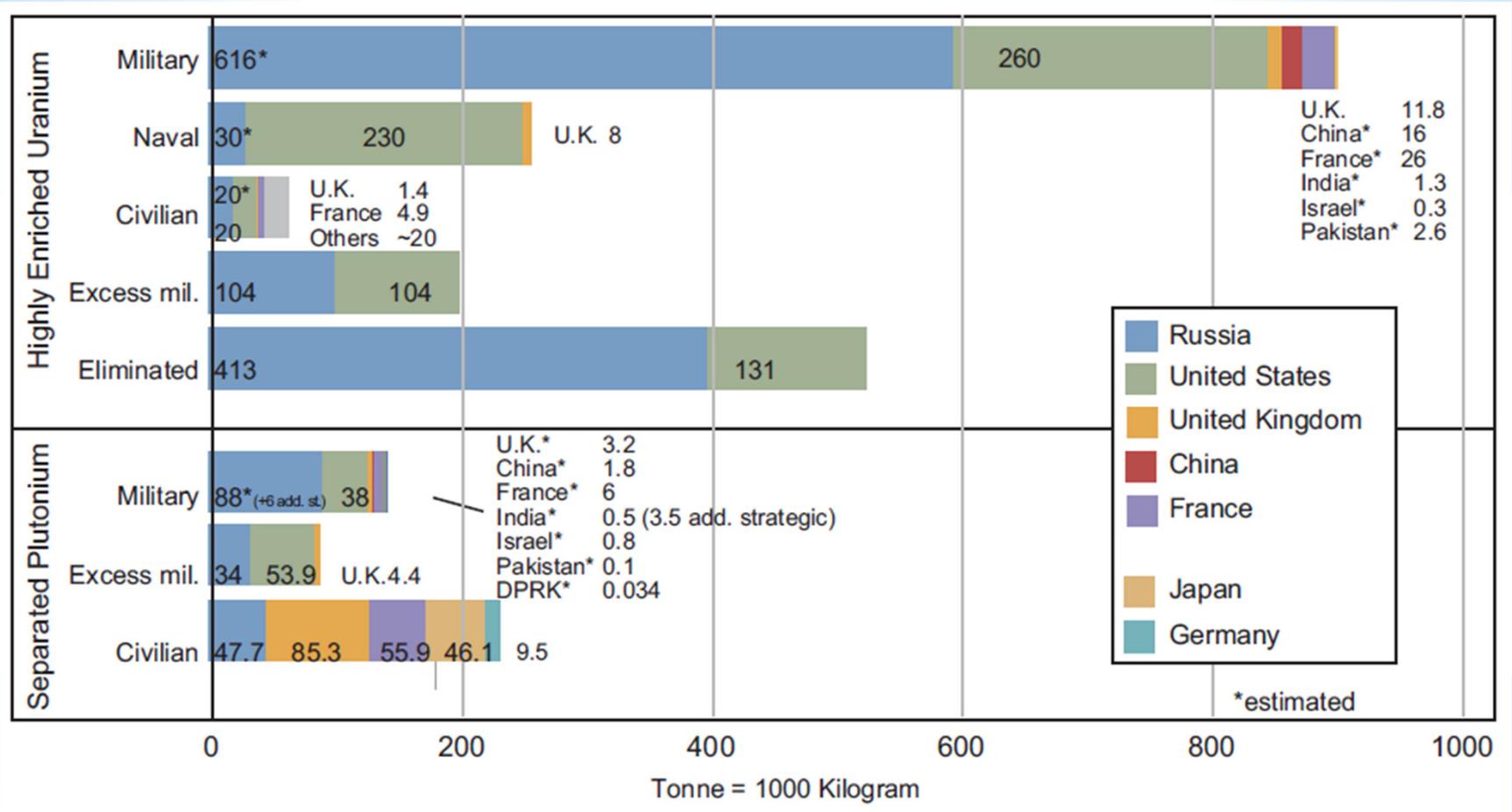
Corea del Nord: 2 - 15

Materiale fissile rilevante ai fini del rischio di proliferazione

- La IAEA definisce **quantità significativa** (SQ) come la quantità di materiale nucleare per la quale la realizzazione di ordigni nucleari può **non** essere esclusa.
- Per il **plutonio** questa quantità ammonta a **8 kg** con <80% di ^{238}Pu , causa l'elevato calore generato nel decadimento radioattivo (radiazione α).
 - *Plutonio "weapon-grade"*: miscela di isotopi del plutonio con $^{239}\text{Pu} > 93 \%$.
 - *Plutonio "reactor-grade"*: miscela di isotopi del plutonio con ^{239}Pu e $^{241}\text{Pu} < 50 \%$.
- Per **l'uranio altamente arricchito** ($^{235}\text{U} > 20\%$) questa quantità è **25 kg**.
 - *Uranio "weapon-grade"*: contenuto dell'isotopo $^{235}\text{U} \sim 90 \%$.
- La IAEA definisce **8 kg** di ^{233}U come 1 SQ. ^{237}Np , ^{241}Am e ^{243}Am , presenti nel combustibile esausto, sono qualche volta indicati come "materiali nucleari alternativi", **potenzialmente utili** alla realizzazione di armi nucleari.

Quantitativi di plutonio e uranio altamente arricchito stimati nel mondo (2011)

Provenienza militare: circa 1100 ton HEU, e 210 ton Pu weapon-grade

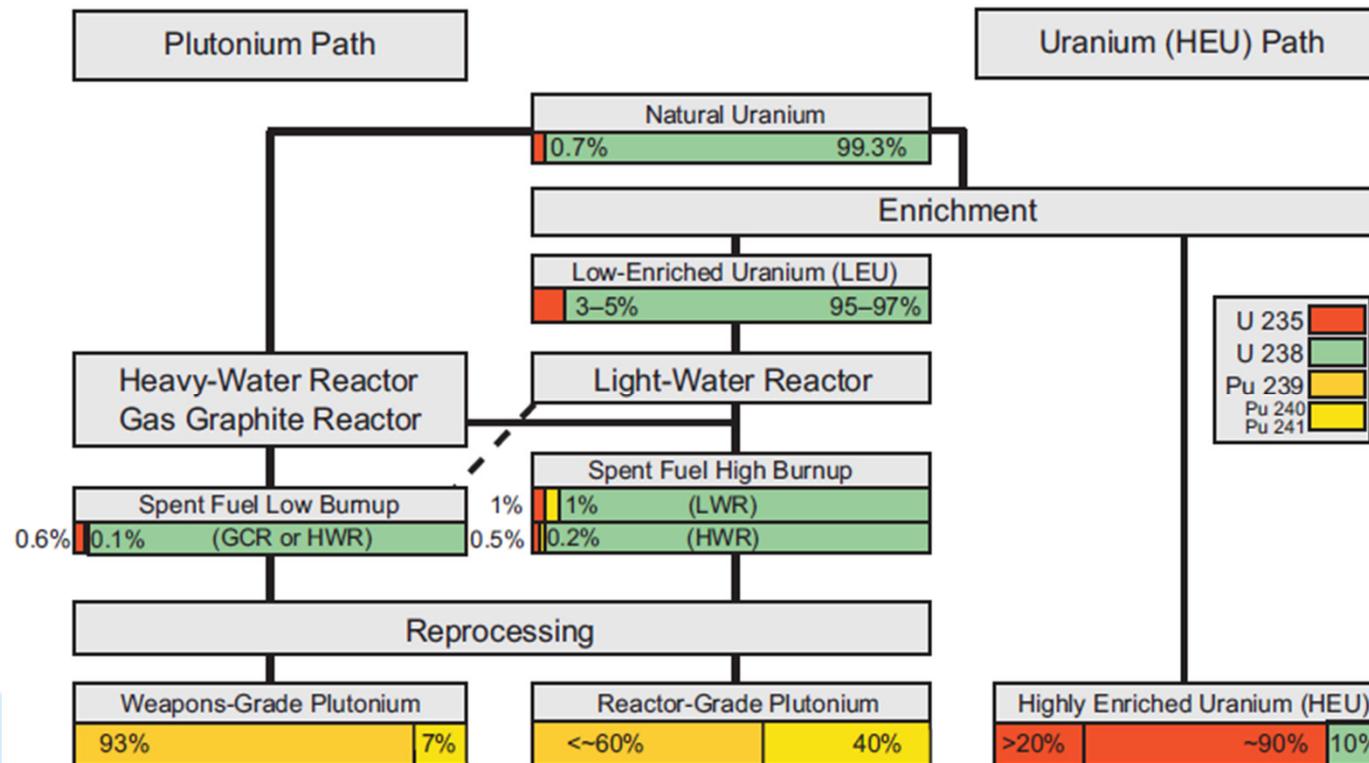


Riferimenti: S. Hecker et. al., *Nuclear non-proliferation*, Cambridge University Press (2011).

Possibili vie per la produzione di materiale fissile

Sono disponibili due possibili modi:

- A) **Arricchimento dell'uranio** (uranium-route)
- B) Costruzione di **reattori ad-hoc** e **riprocessamento** del combustibile esausto (plutonium-route)

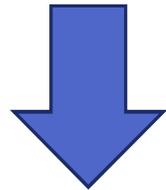


A) Arricchimento dell'uranio

Richiede uso “**centrifughe**” in cascata, nella quale l'isotopo più leggero ^{235}U , nella forma gassosa di UF_6 , è separato dall'isotopo più pesante ^{238}U .

L'arricchimento dell'uranio da impiegarsi nelle centrali nucleari commerciali (LWRs) avviene tipicamente fino al: **3-5% in ^{235}U**

Potenziali implicazioni sulla proliferazione



Non vi è nessun limite tecnologico ad arricchire l'uranio fino al livello “**weapon-grade**” (90% in ^{235}U).



Gruppi di centrifughe per l'arricchimento

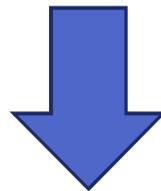
B₁) Riprocessamento del combustibile nucleare esaurito

- ^{239}Pu è prodotto nel combustibile nucleare per conversione dell'isotopo ^{238}U .
Il combustibile esaurito contiene di norma plutonio “**reactor- grade**”
(contenuto di $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu} < 50\%$ del Pu totale).
- Il plutonio può essere ri-processato, ossia separato dal combustibile esausto, ed utilizzato come nuovo combustibile (ciclo del combustibile “chiuso”).
- Il ciclo del combustibile “aperto” è generalmente considerato **resistente alla proliferazione**:
 - *Il plutonio **non** viene separato dal resto del combustibile irraggiato (altamente radioattivo) ➔ stoccaggio.*

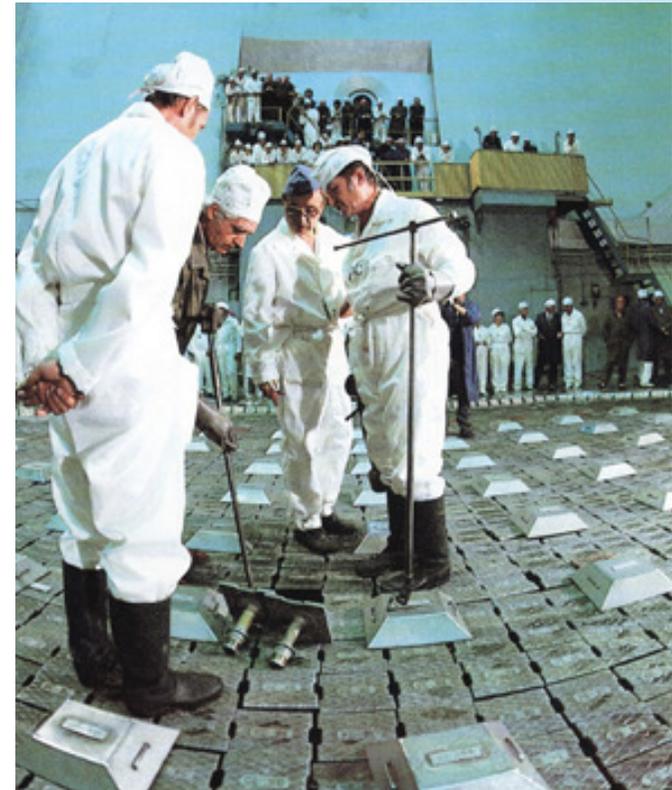
B₂) Impiego di reattori ad-hoc

In alcune tipologie di reattori ad acqua pesante e refrigerati a gas, il combustibile può essere rimosso dal nocciolo **senza l'arresto dell'impianto** (eludendo eventuali controlli).

Dopo un **breve tempo** di permanenza nel nocciolo, il combustibile contiene una **alta concentrazione di ²³⁹Pu** (in confronto con altri isotopi del plutonio).



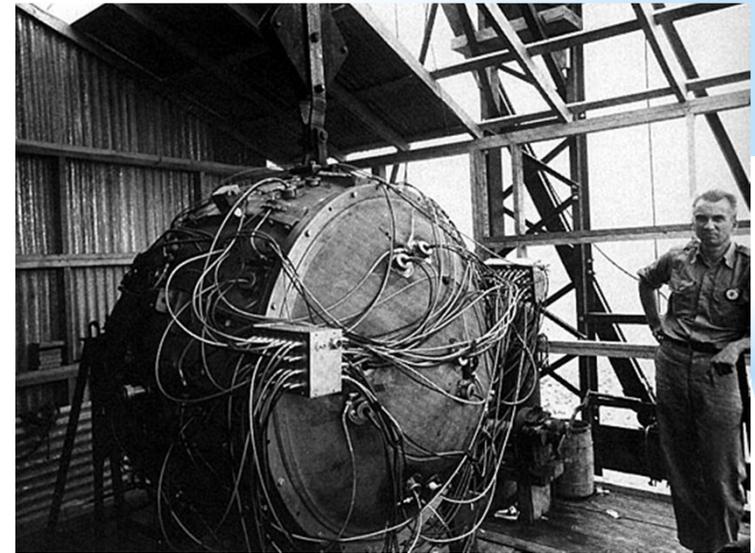
Plutonio **“weapon-grade”** può essere estratto dal combustibile.



Vista superiore di un reattore RBMK

Dal materiale fissile alle armi nucleari

- Informazioni basilari sul design degli ordigni nucleari → **disponibili**
- Comunque, **specifiche competenze** sono richieste per la loro realizzazione:
 - *Esperienza nella metallurgia U e Pu met.;*
 - *Disponibilità di apparecchiature di precisione per la manifattura;*
 - *“Expertise”: esplosivi, detonatori, sorgenti di neutroni;*
 - *Capacità di calcolo e simulazione.*



Trinity test, New Messico, luglio 1945: “The Gadget”

- La realizzazione di bombe tipo quelle esplose sul Giappone nel 1945 è potenzialmente nelle capacità tecnologiche di paesi in grado di dotarsi di materiale fissile (es. Pakistan, Nord Corea e Sud Africa).

Rischio di acquisizione di materiale fissile

- Esistono molti programmi nucleari civili che impiegano piccoli reattori e sistemi sotto-critici per:
 - *ricerca;*
 - *produzione di radioisotopi per applicazioni commerciali;*
- Alla fine del 2003, quasi 100 reattori di ricerca usavano uranio arricchito al 90% e circa 20 con arricchimento fra il 50% e il 90% (*)
- Il rischio di acquisizione di materiale fissile altamente arricchito “weapon-usable”, al di fuori del contesto militare, **esiste**.

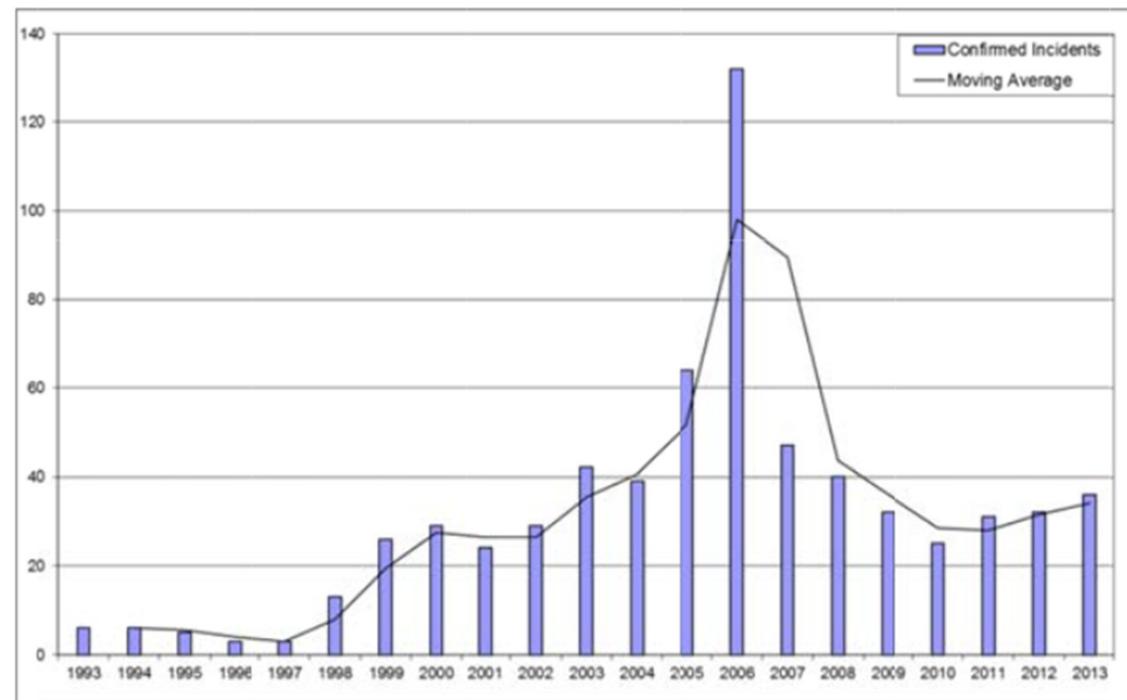


Disco di plutonio

(*) Riferimento: World Nuclear Association, *Research Reactors*, August 2003.

Possesso illegale e movimentazione di materiale nucleare

Incidenti registrati dall'IAEA relativi alla sottrazione e/o perdita di materiale nucleare 1993-2012 (*)



- Tra il 1993-2012, sono stati registrati 419 casi di sottrazione e/o perdita (**16 casi** di possesso non autorizzato di **uranio arricchito o plutonio** - in generale dell'ordine di **qualche kg**)

(*) Riferimento: 2013 Fact Sheet, *IAEA Incident and Trafficking Database (ITDB)*, 2013.

Il ruolo dell'IAEA

- In accordo con NPT, tutti gli stati non dotati di armi nucleari (NNWSs), hanno l'obbligo di concludere **accordi con la IAEA** al fine di introdurre specifiche salvaguardie sul materiale nucleare in loro possesso (*Article III*).
- IAEA ha la responsabilità di fornire alla comunità internazionale **assicurazioni** circa l'impiego per usi pacifici di tale materiale.
- IAEA è responsabile di **verificare** che tutto il materiale nucleare in possesso degli stati venga dichiarato.
- Attraverso **ispezioni**, la IAEA verifica la correttezza e la completezza delle informazioni fornite dagli stati circa l'impiego del materiale nucleare.



Sede IAEA di Vienna

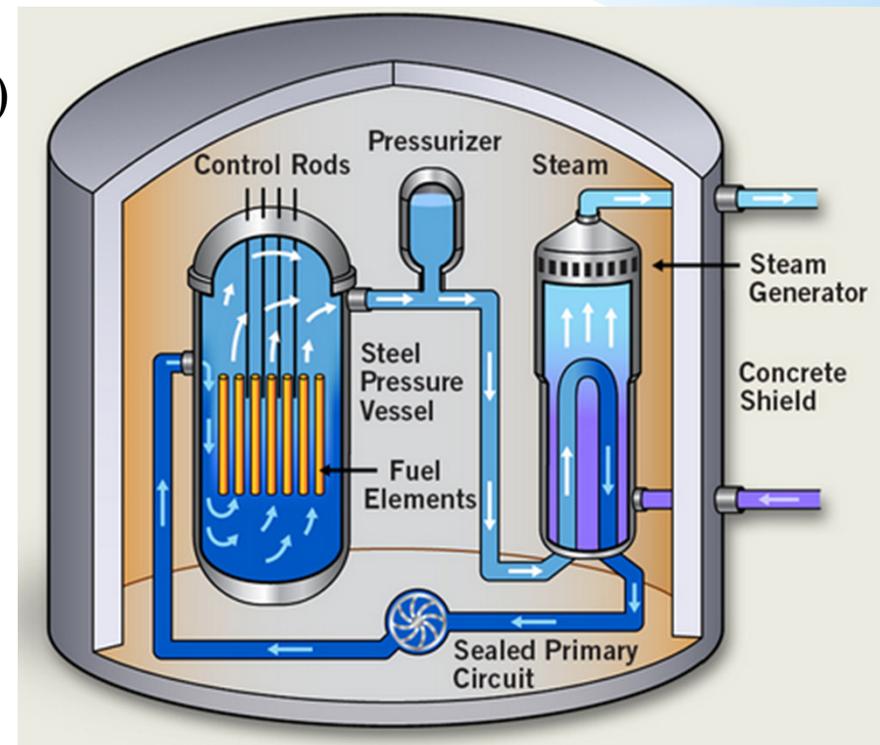
Azioni per ridurre il rischio di proliferazione del combustibile nucleare

- L'obiettivo è di dare al materiale fissile delle proprietà fisiche tali da **impedire**, in caso di sottrazione illecita, la realizzazione di esplosivi nucleari.
- Possibili azioni:
 - **Diluizione** con isotopi non-fissili (es. aggiungendo ^{238}U al fissile ^{235}U);
 - Rendere **inefficiente** la detonazione nucleare favorendo la “pre-ignizione”
➔ riduzione dell'energia rilasciata (alta concentr. di ^{232}U e ^{240}Pu nel U e Pu);
 - Creazione di una **barriera radiologica** (es. alta concentr. nel U di ^{232}U i cui prodotti di decadimento sono forti emettitori γ);
 - Rendendo tecnologicamente **impossibile la manifattura** dell'ordigno (es. alto livello di ^{238}Pu nel Pu ➔ instabilità dell'esplosivo chimico impiegato per l'innesco).

Uso del plutonio quale combustibile nelle centrali nucleari

Plutonio proveniente dal **riprocessamento** del combustibile esausto dei reattori commerciali e dallo **smantellamento** delle testate nucleari può essere usato per produrre nuovo combustibile:

- Combustibile denominato **MOX** ($\text{Pu} + {}^{238}\text{U}$) è attualmente utilizzato sia nei reattori commerciali (reattori termici) sia in quelli di nuova concezione (reattori veloci).
- Attualmente, MOX costituisce circa **2%** del combustibile impiegato nelle centrali nucleari in esercizio in Europa e Giappone.



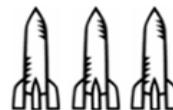
Schema di funzionamento di un reattore ad acqua leggera in pressione

Programma “Megatons per Megawatts”

- Accordo USA - Russia per il riutilizzo dell' **uranio weapon-grade** (HEU) proveniente dallo smantellamento delle testate nucleari (**1993**).
- Con questo accordo la Russia ha convertito **500 tons** di **HEU** militare (equivalente a **20000 testate**) in **uranio a basso arricchimento** (LEU) ➔ impiegato in reattori USA per la produzione di energia elettrica.

- Programma concluso nel **2014**.

80 nuclear
warheads



2 ton HEU



Nuclear power plant
(1000 MWe)



21 TWh

3 years of operation

- Con questa iniziativa, circa **10%** dell'energia elettrica USA, **negli ultimi 15 anni**, è stata prodotta dallo smantellamento delle testate nucleari !

Contributi di CISE2007 in ambito rischio di proliferazione

Studi teorici su:

- Eliminazione del plutonio militare nei reattori commerciali;
- Nuovi combustibili nucleari a basso rischio di proliferazione;
- Sostenibilità della fonte nucleare, alla luce di nuovi sviluppi (es.: SMRs, GenIV).



Parco Heysel, Bruxelles: Atomium