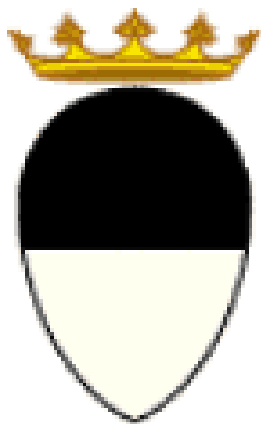


Verso la IV Generazione

ovvero

Il sogno possibile di un nucleare senza scorie



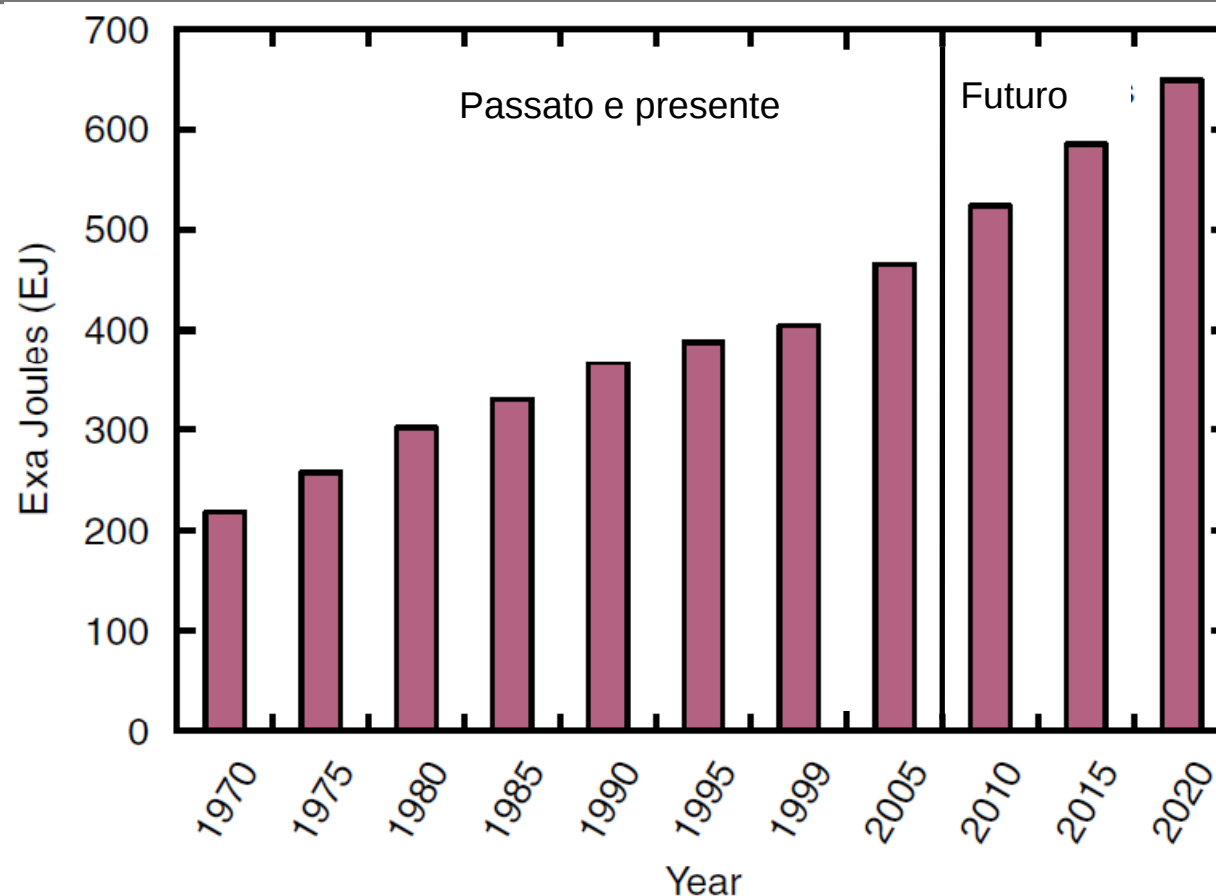
N. Colonna
INFN - Sezione di Bari



Outline

- **Il problema dell'energia**
- **Vantaggi e limiti dei reattori attuali**
- **Come realizzare un ciclo di combustibile chiuso**
- **I reattori di IV Generazione**
- **Gli Accelerator Driven Systems**
- **Il ciclo Th/U**
- **Conclusione**

La richiesta di energia nel mondo

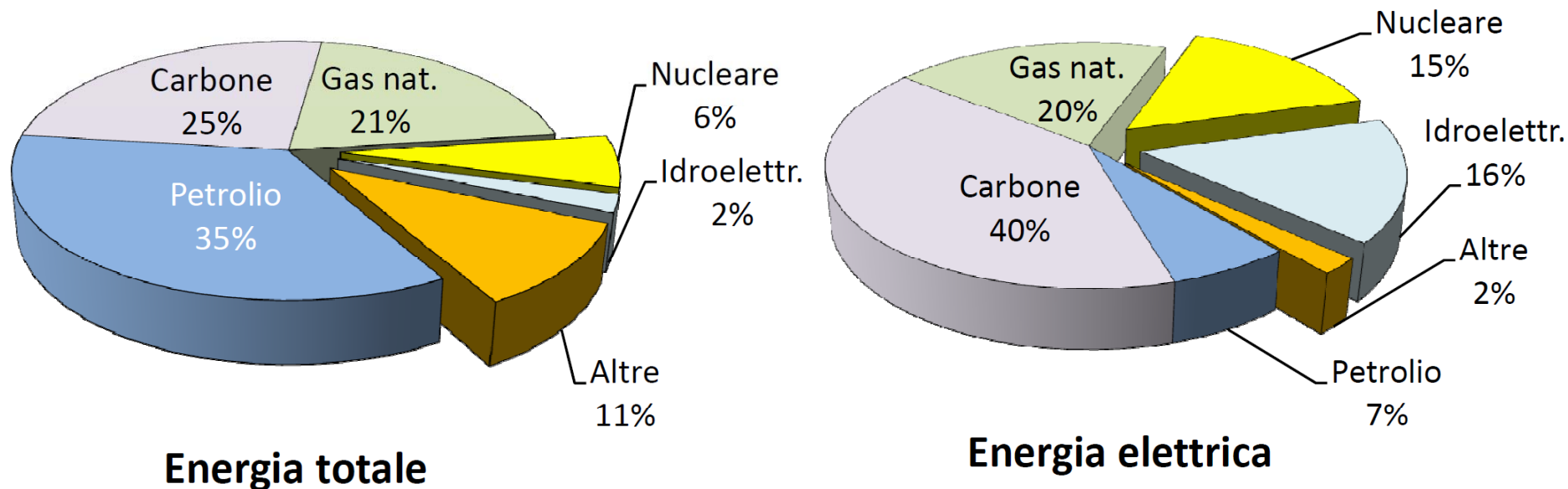


- Aumento della popolazione mondiale (10 miliardi nel 2050)
- Miglioramento generale degli standard di vita (soprattutto nell'area BRIC)



Aumento costante del consumo di energia nel mondo (+ 50 % nel 2020):

La produzione di energia nel mondo

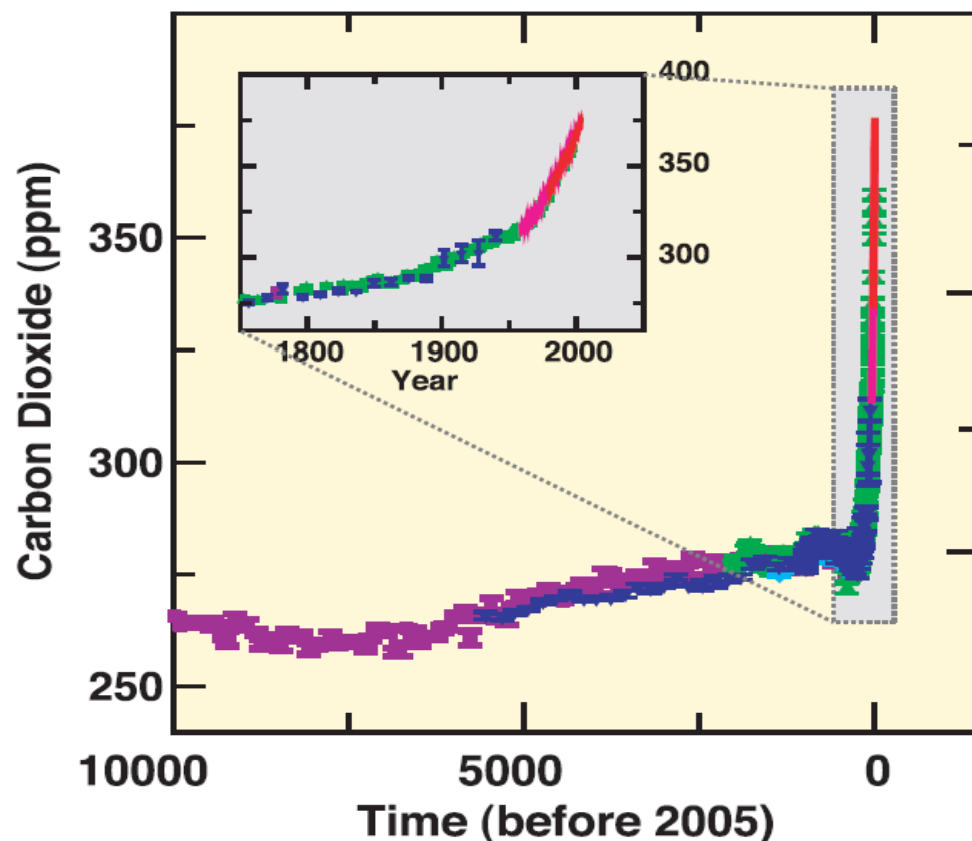


L'80 % dell'energia attualmente consumata nel mondo è prodotta **da combustibili fossili**

Problemi associati allo sfruttamento dei combustibili fossili:

- approvvigionamento (picco di produzione entro 2020);
- ambientali (cambiamenti climatici in genere per CO₂ + inquinamento atmosferico).

La produzione di CO₂



Warming of the climate system is unequivocal, as is now evident from observations of increases in global average air and ocean temperatures, widespread melting of snow and ice, and rising global average sea level (see Figure SPM.3). {3.2, 4.2, 5.5}

Report of the Intergovernmental Panel on
Climate Changes (IPCC), 2007

www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/wg1-ar4.html

L'aumento di CO₂ nell'atmosfera dovuta all'attività umana è innegabile.

Very high confidence che CO₂ ed altri gas serra responsabili dei cambiamenti climatici.

The Eu Climate and Energy package

Entro il 2020:

- riduzione dell'emissione di **gas serra** del **20%** rispetto al livello del 1990;
- riduzione del **consumo di energia** del **20%** (rispetto al 1990);
- aumento del **20%** delle **fonti rinnovabili** nel mix energetico della EU;
- aumento del **10% dei biocombustibili** nel trasporto.

L'energia del futuro

Necessario (e sempre più urgente) sviluppare fonti di energia **pulita, sicura e a basso costo**. La parola d'ordine è **diversificare**:

- **risparmio** e maggiore efficienza energetica (fondamentale nel breve termine)
- fonti **rinnovabili**: solare, eolico, biomasse, etc... (sviluppo nel medio termine)
- **NUCLEARE** (fissione e fusione)

Attualmente, il nucleare contribuisce con il 6 % all'energia totale consumata, e per il 15 % all'energia elettrica:

- 439 centrali, per un totale di 356 Gwe (in media 800 MWe per reattore).
- 13623 reattori-anno (ad oggi)

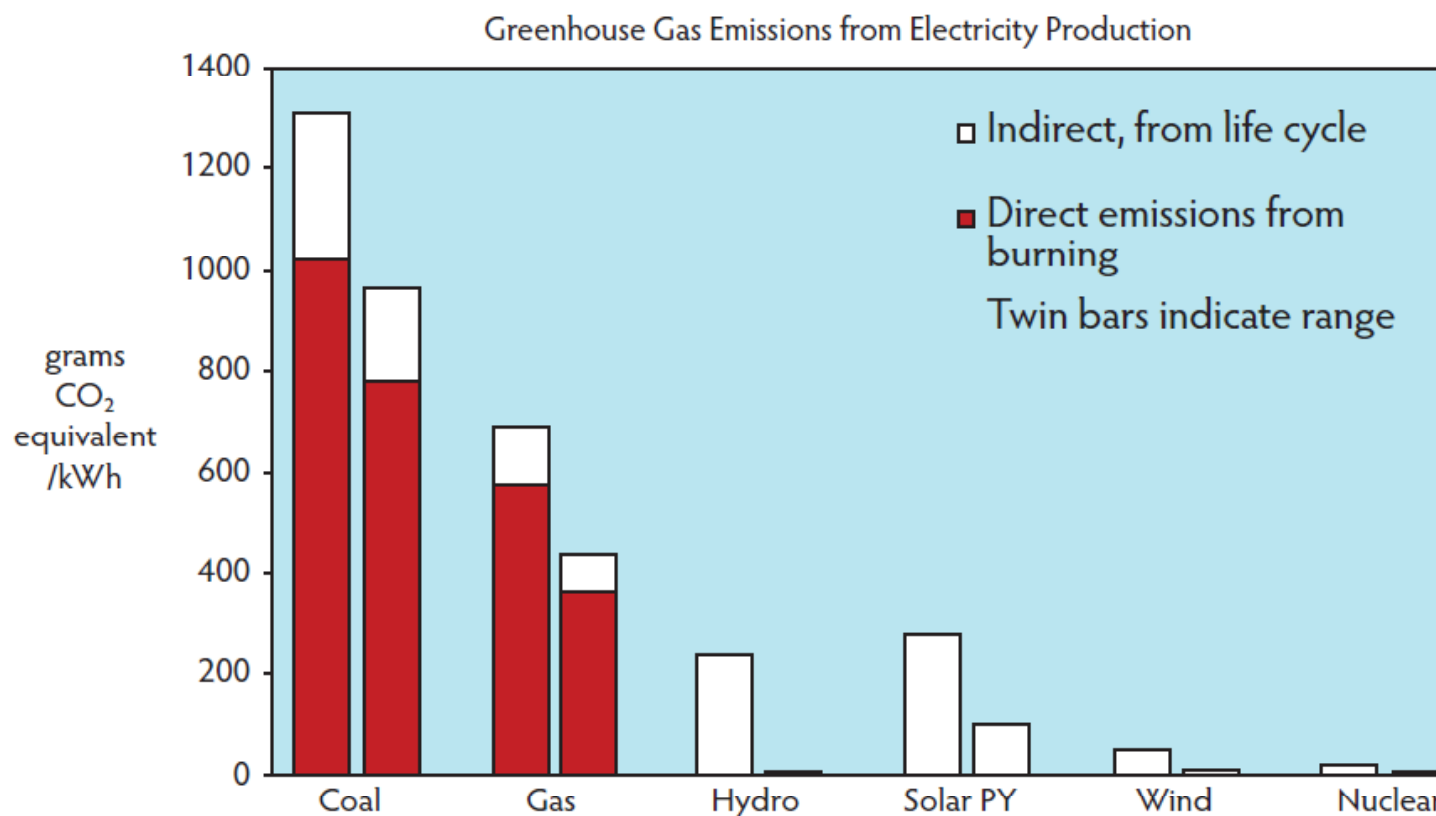
Il nucleare potrebbe portare ad un **sistema energetico a bassa emissione di CO₂**, senza mettere a repentaglio il progresso economico e sociale, soprattutto nei paesi in via di sviluppo.

Tuttavia alcuni **problemi frenano una maggiore diffusione** dell'utilizzo di questa fonte: abbondante produzione di scorie e utilizzo inefficiente delle risorse di U.

Un **nucleare "rivoluzionario"** ha le potenzialità per soddisfare la richiesta di energia nel lungo periodo (decine di secoli), minimizzando l'impatto sull'ambiente.

Vantaggi del nucleare: i gas serra

Il vantaggio principale è la **bassa emissione di CO₂** o di altri inquinanti (SO₂, polveri sottili, ...)



Source: IAEA 2000

Per soddisfare la domanda energetica mondiale (in particolare quella dei paesi emergenti), minimizzando le conseguenze sul clima, è necessario un mix di fonti che includa **anche l'energia nucleare** (Intergov. Panel on Climatic Change, IPCC-ONU, Valencia, 17 Nov. 2007).

Vantaggi del nucleare

Principali vantaggi del nucleare:

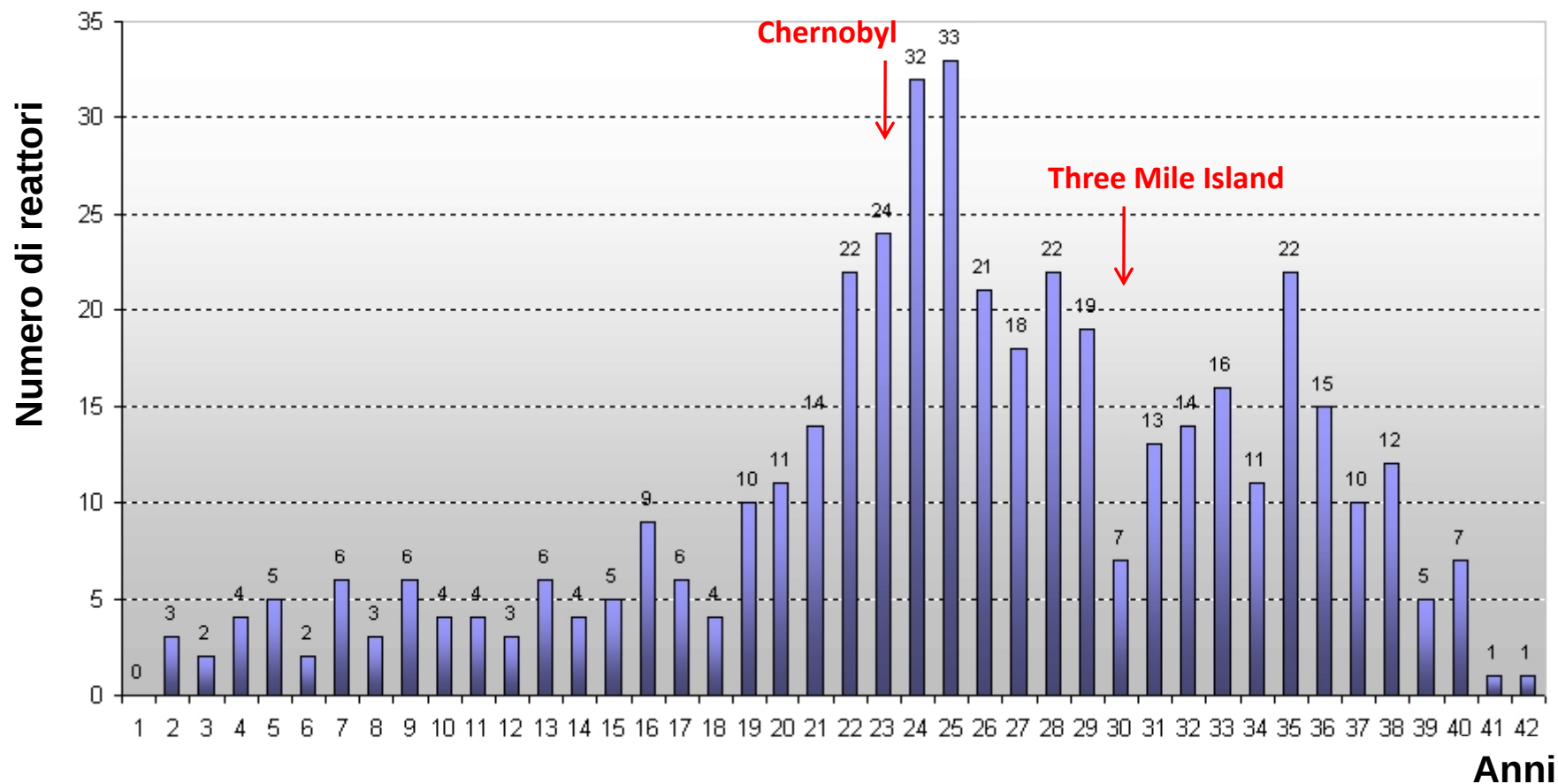
- Bassa emissione di **CO₂** o altri inquinanti
- riduce dipendenza dai combustibili fossili

Altri aspetti positivi:

- **disponibilità del combustibile**
 - ✓ le principali miniere di uranio si trovano in Canada e Australia
 - ✓ indipendenza da aree soggette a **turbolenze** politiche (paesi arabi produttori di petrolio)
- **bassa incidenza** del combustibile sul costo del kWh
 - ✓ il raddoppio del prezzo dell'uranio si traduce in un aumento del 10% sul kWh (mentre il raddoppio del petrolio produce un 70% di aumento).
- in futuro potrebbe essere usato per produrre idrogeno, sostituendo il petrolio anche nei **trasporti**
 - ✓ l'idrogeno e' un vettore (e non una fonte) di energia, e per produrlo (per esempio dalla dissociazione dell'acqua) occorre spendere energia.

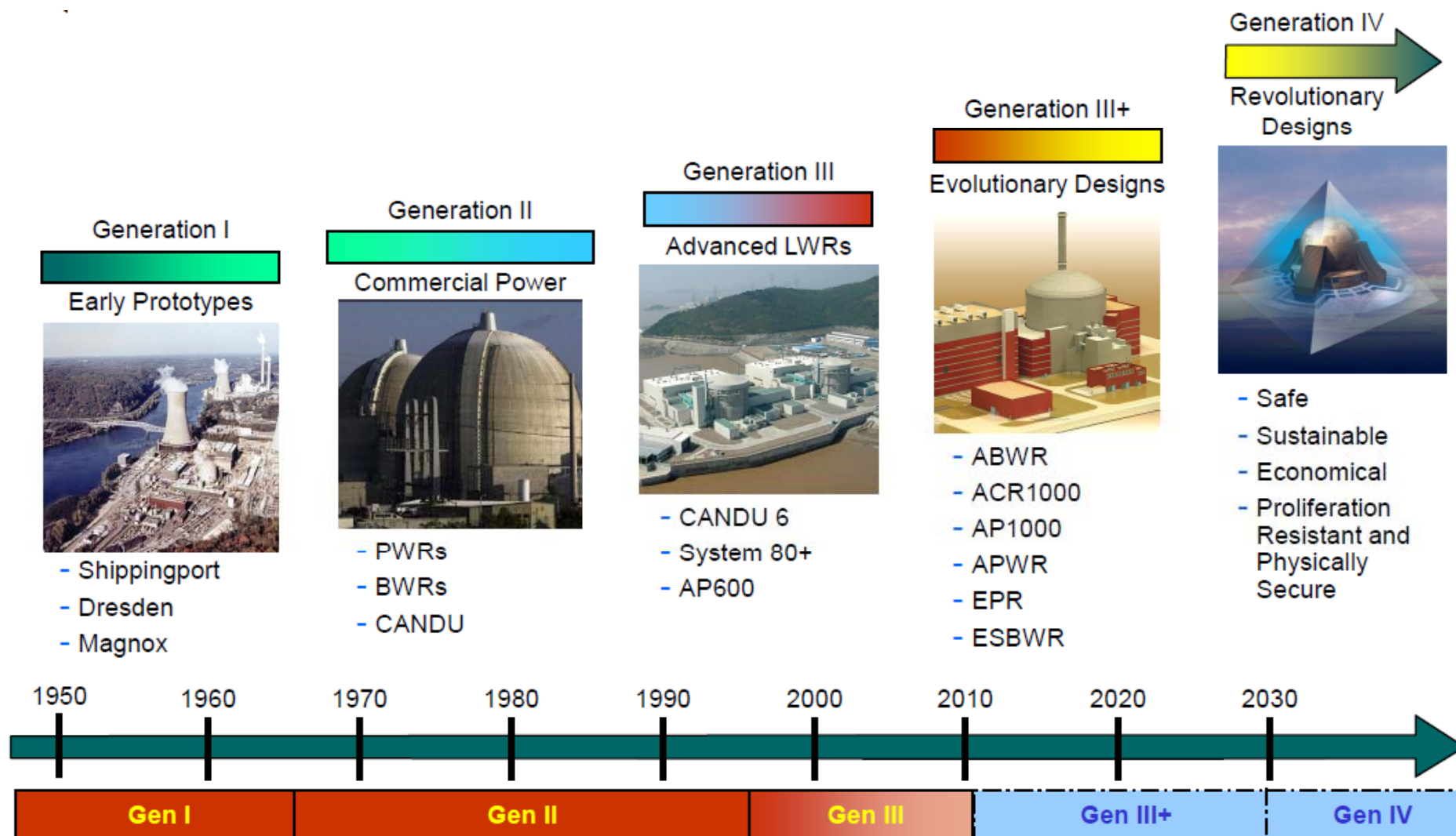
Il nucleare può svolgere un **ruolo importante nel medio termine** per ridurre le emissioni di gas serra (CO₂). In Europa, “contributo fondamentale del nucleare per ragioni economiche ed ambientali” (Parlamento Europeo, ottobre 2007).

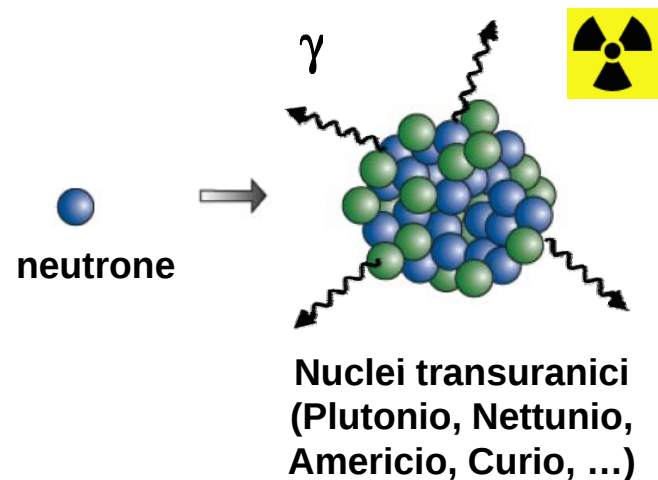
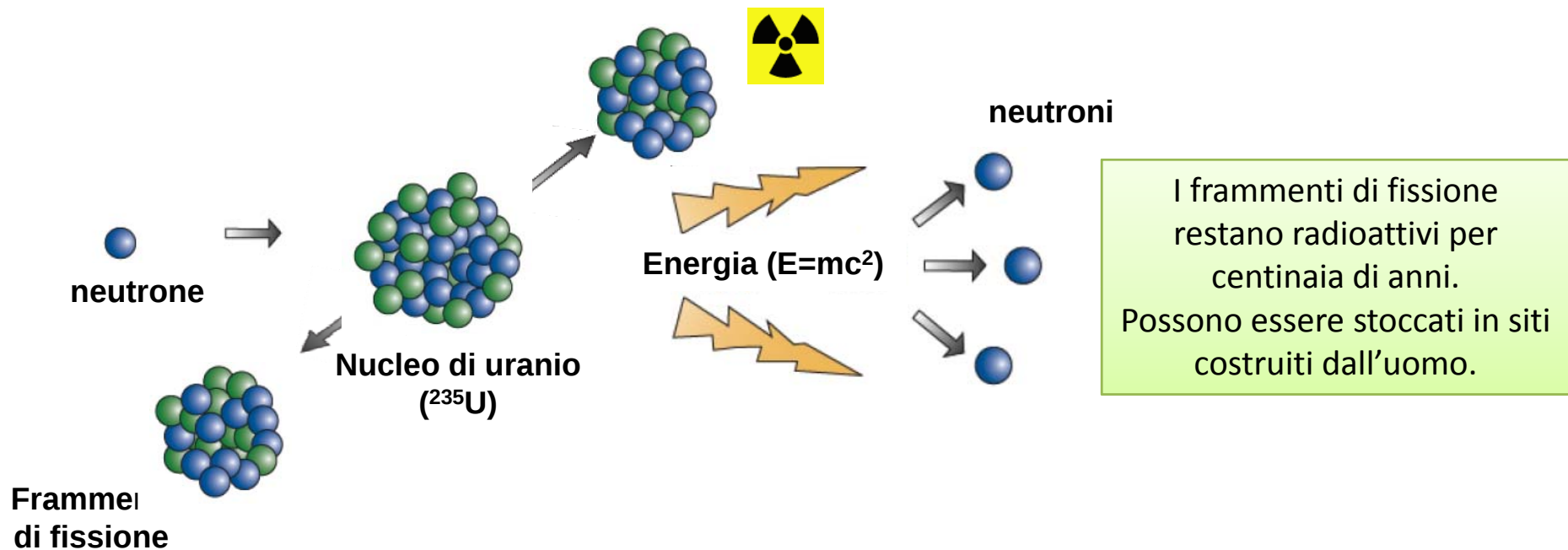
L'età dei reattori nucleari attualmente operativi



Entro 20-30 anni, una grossa parte dei reattori attualmente in funzione dovranno essere dismessi e sostituiti, possibilmente da reattori di nuova concezione.

Le generazioni passate e ... future





I nuclei transuranici restano radioattivi per centinaia di migliaia di anni (emettono particelle α).

Rappresentano la parte più pericolosa delle scorie nucleari, da smaltire in "depositi geologici" (siti stabili per milioni di anni, tipo miniere di sale).

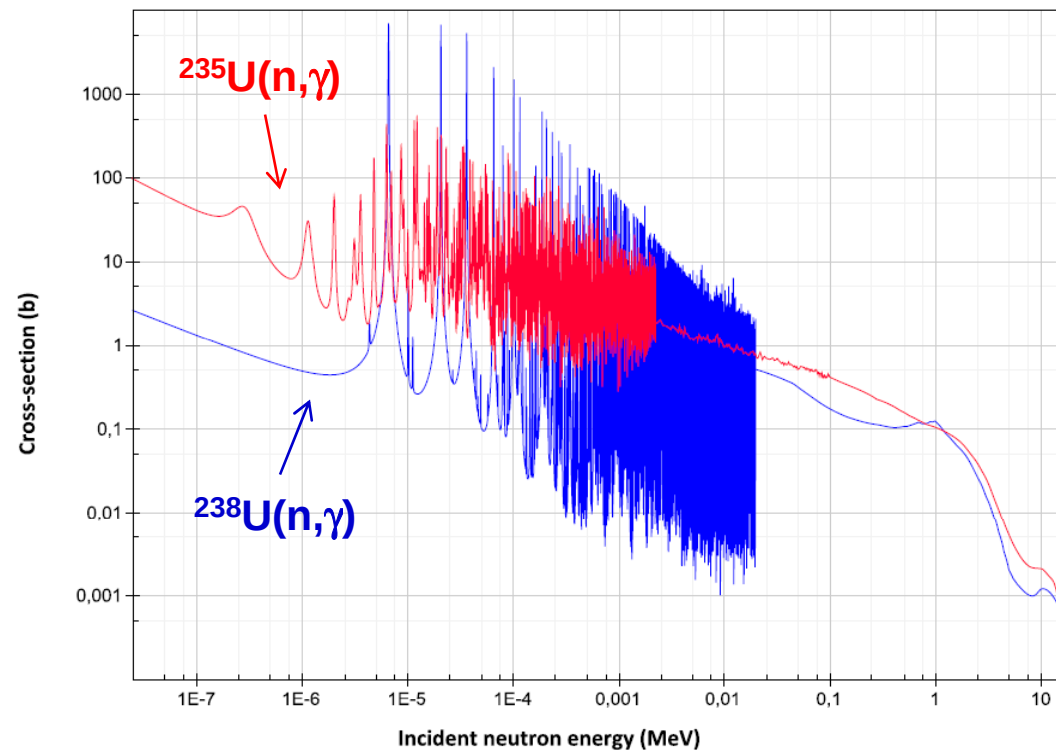
L'idea "rivoluzionaria" dei reattori di IV Generazione è utilizzare i **transuranici** come combustibile

Le reazioni principali

In un reattore, le **reazioni nucleari** che hanno luogo sono principalmente:

- **cattura** neutronica (n,γ): prodotto nucleo più pesante (e raggi γ)
- **fissione** indotta da neutroni (n,f): prodotti frammenti di fissione, neutroni, raggi γ , $\bar{\nu}$

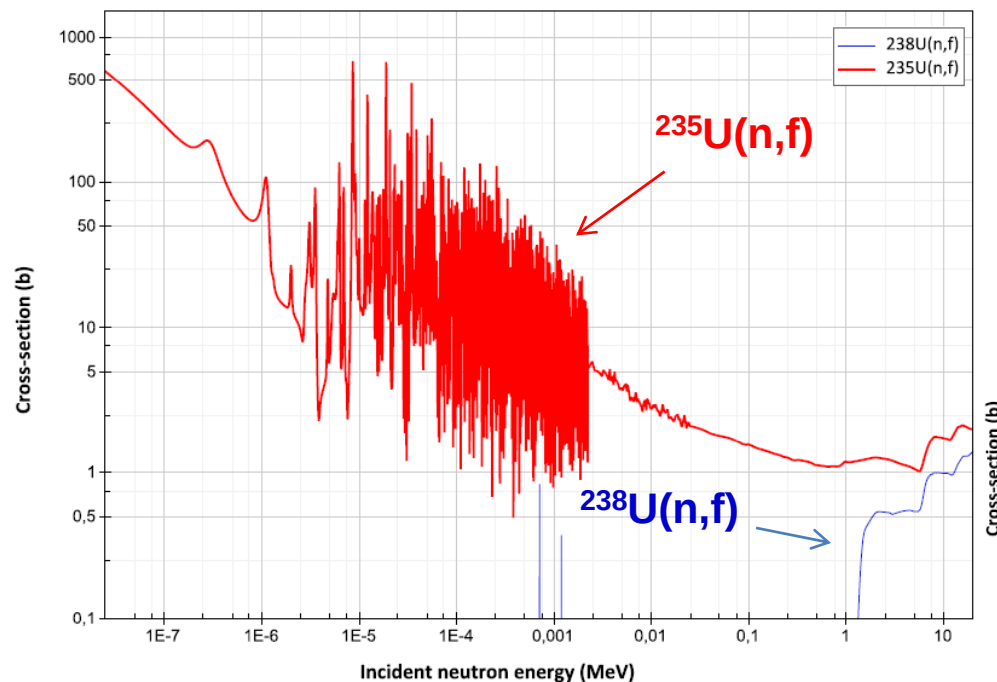
Un neutrone può dar luogo ad una reazione di cattura **qualunque sia la sua energia**



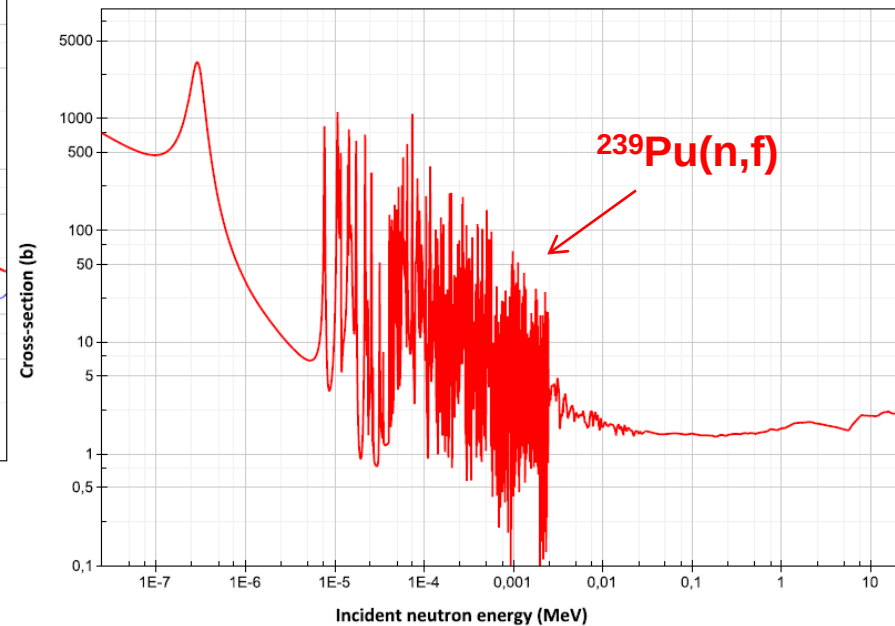
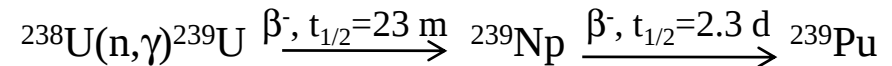
La fissione

Isotopo fissile: fissiona **qualunque** sia l'energia del neutrone

Isotopo fertile: non fissiona o fissiona con neutroni di energia al di sopra di un certo valore, tipicamente qualche MeV (**soglia di fissione**). Tuttavia, a seguito della cattura neutronica produce isotopi fissili.

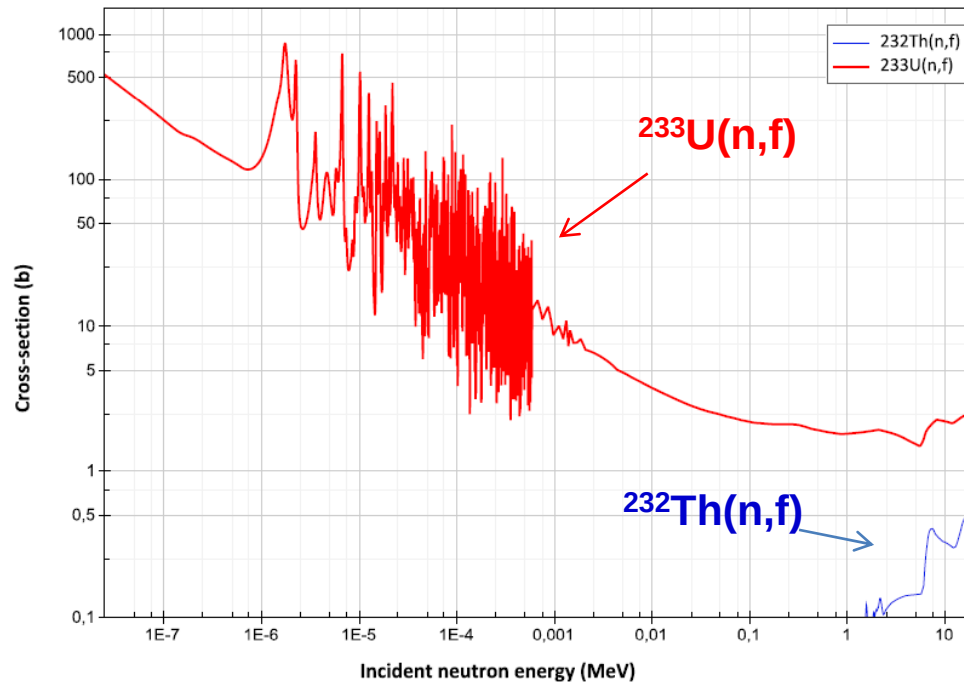


^{235}U isotopo **fissile**, il ^{238}U no.

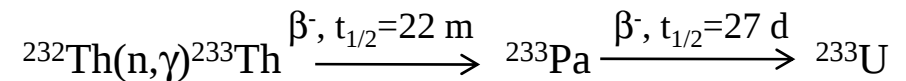


^{238}U isotopo **fertile**, produce ^{239}Pu , che è fissile

Il combustibile Th/U



^{233}U isotopo **fissile** (però non esiste in natura)
 ^{232}Th isotopo **fertile**, produce proprio ^{233}U



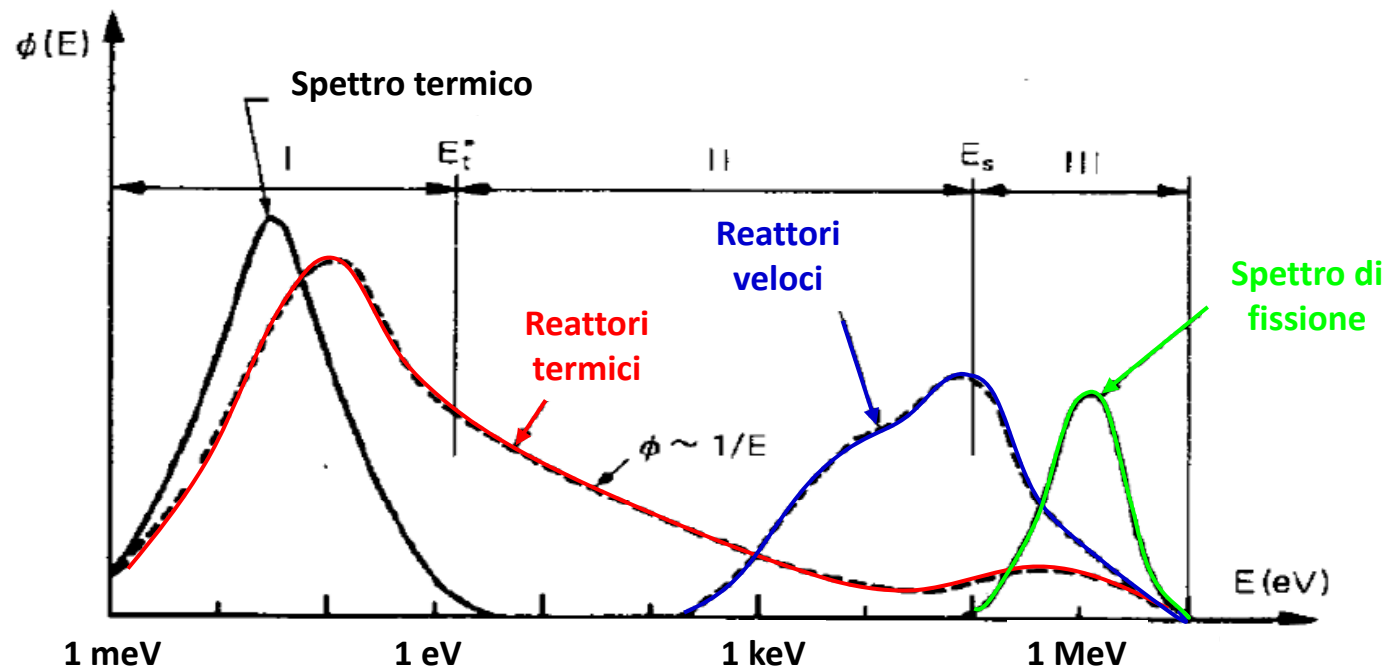
Il ciclo Th/U è una interessante alternativa al ciclo U/Pu, perché il Th è tre volte **più abbondante** dell'U e soprattutto perché **produce meno scorie**.
Attualmente considerato come opzione principale per il **futuro in India**.

Lo spettro neutronico

I **neutroni emessi** nella reazione di fissione hanno **energia del MeV**.

In un **reattore termico**, i neutroni sono moderati o rallentati, in genere con acqua (o grafite), ad un'energia prossima a quella termica (qualche decina di **meV**).

In un **reattore veloce**, i neutroni non sono moderati, e mantengono un'energia relativamente alta (**da qualche keV a qualche MeV**).



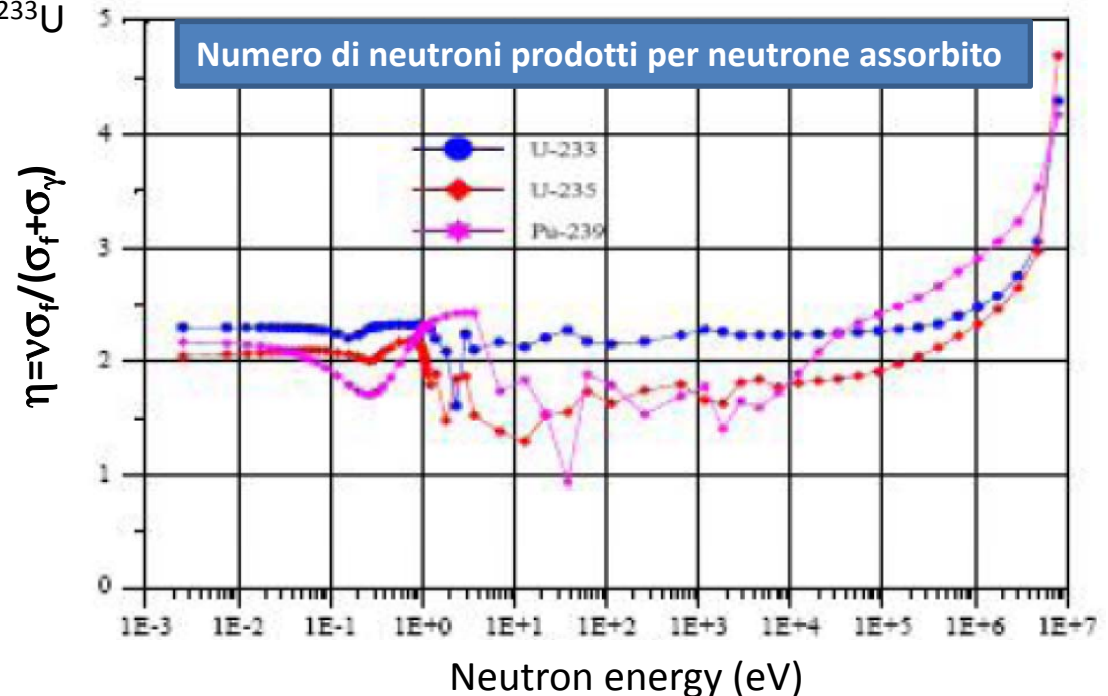
I “breeder reactors”

All'interno di un reattore si **brucia** e si **produce** materiale fissile:

- nel ciclo U/Pu, si brucia ^{235}U , si produce ^{239}Pu
- nel ciclo Th/U si brucia e si produce ^{233}U

Un reattore in cui si produce materiale fissile in quantità maggiore o uguale a quanto se ne brucia, è detto autofertilizzante, o “**breeder reactor**” (da breed=riprodurre).

A determinare se reattore può essere breeder o meno è la **molteplicità dei neutroni e le sezioni d'urto**.

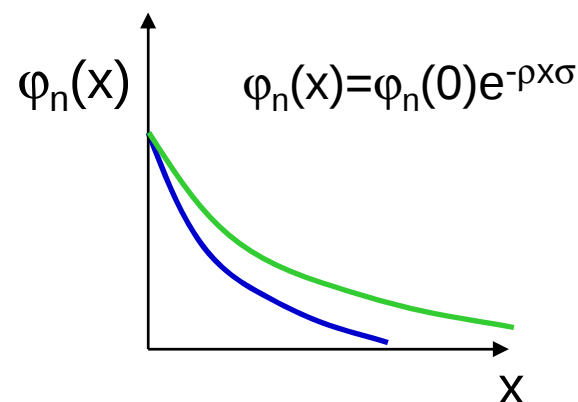
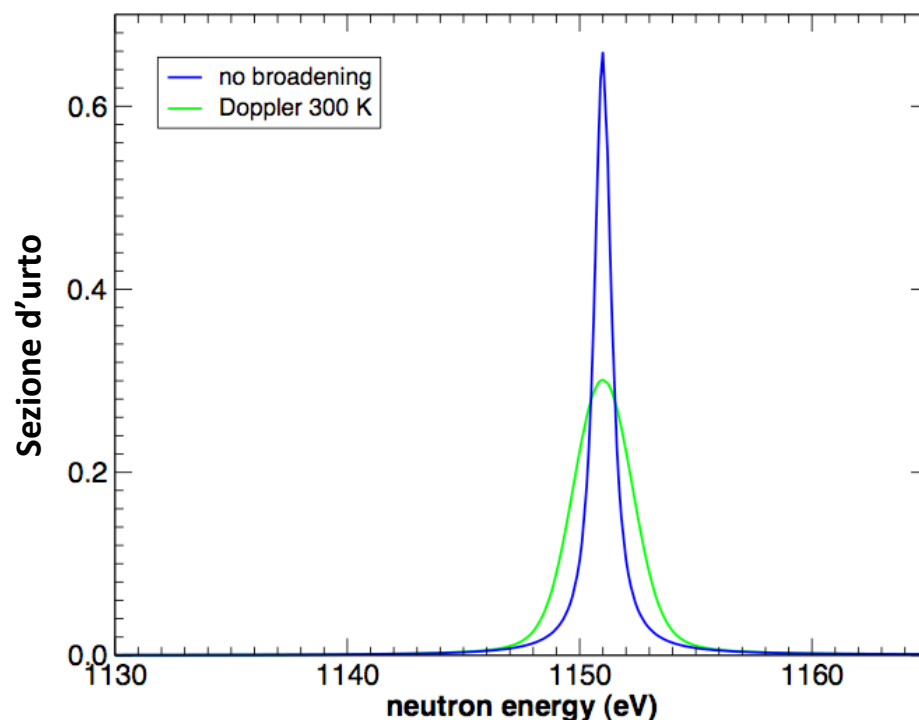


I reattori che sfruttano il **combustibile U/Pu** possono essere breeder solo se i neutroni non sono moderati: **fast breeder reactors**.

Utilizzando il ciclo **Th/U**, si possono costruire reattori breeder sia **termici che veloci**.

L'effetto Doppler e il self-absorption

Le sezioni d'urto sono spesso dominate da **risonanze**. Queste sono fondamentali nella fisica dei reattori, per l'effetto del **self-absorption** (attenuazione del flusso di neutroni all'interno della barra di combustibile).



La **forma delle risonanze** dipende dalla **temperatura**, a causa dell'effetto Doppler.

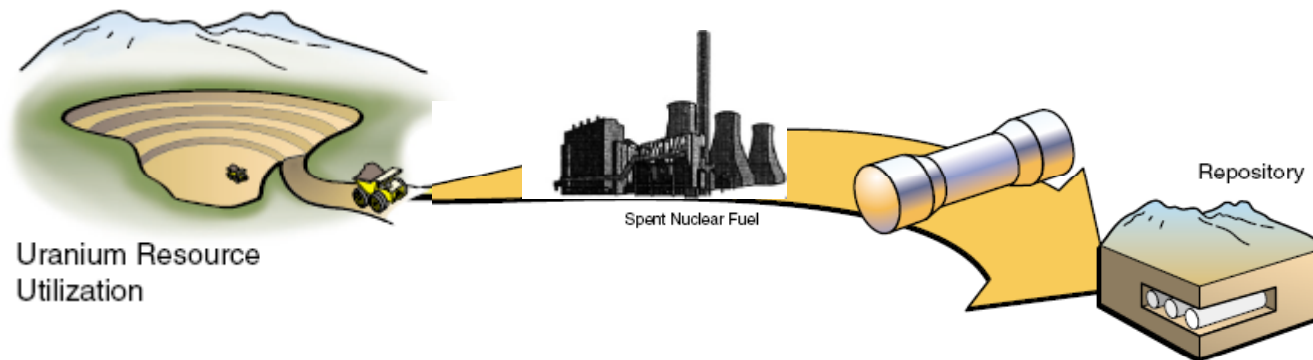
All'aumentare della temperatura, la risonanza diventa più bassa e più larga.

I neutroni penetrano maggiormente nelle barre di combustibile, "bruciandole" uniformemente.

L'efficienza di burn-up aumenta con la temperatura

I reattori attuali

I sistemi attuali sono **“once through”**: il combustibile, U o Pu, passa una sola volta attraverso il core del reattore



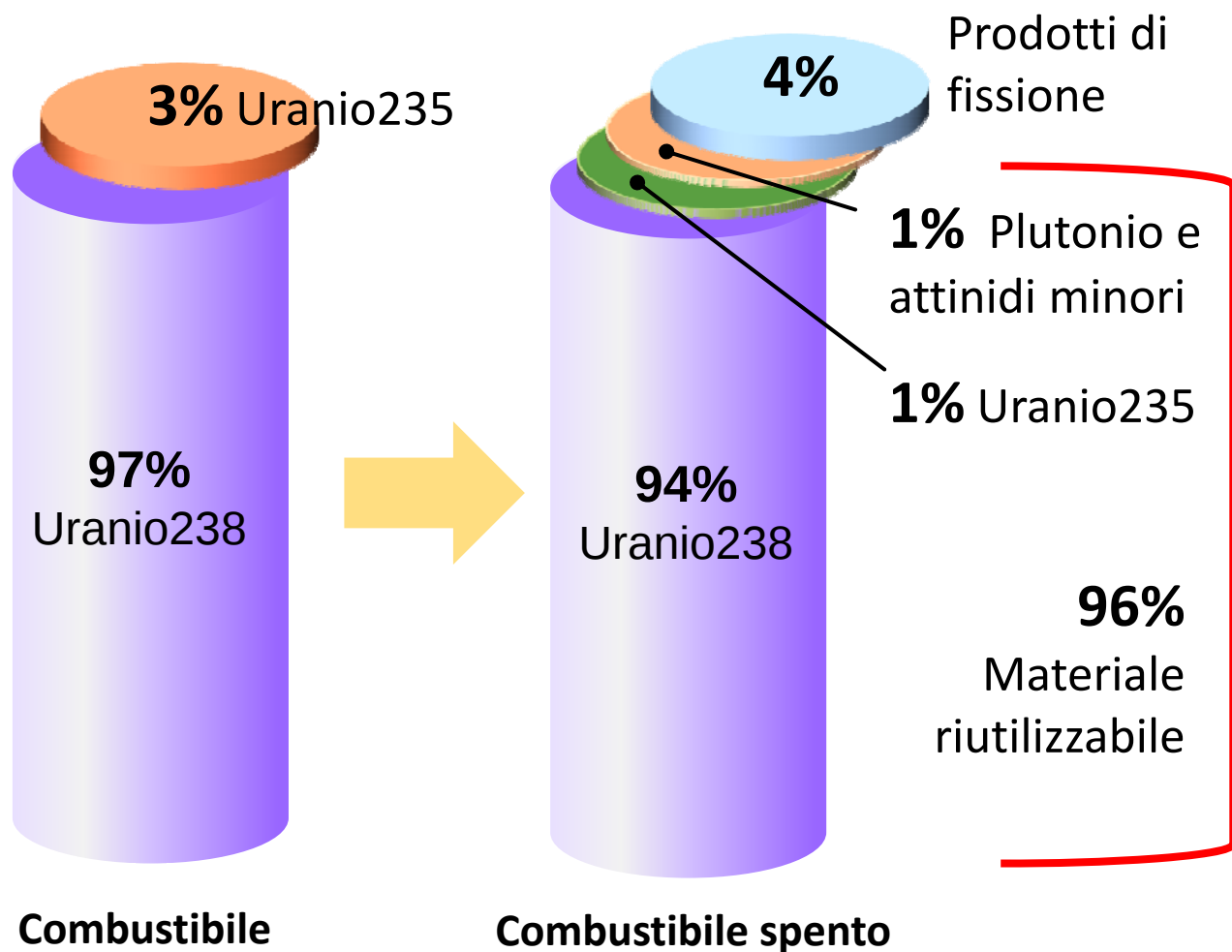
Problemi dei reattori attuali:

- bassa **efficienza di burn-up** e produzione di grandi quantità di **scorie radioattive** con tempi di decadimento molto lunghi.
- rischi di **incidenti**, soprattutto per i reattori più vecchi (e con il licensing esteso a 60 anni)
- necessità di grossi **investimenti** e lunghi **tempi** di costruzione.
- problemi di **proliferazione** (utilizzo di materiale fissile per scopi militari)

Nel breve periodo: **problema dello smaltimento delle scorie**

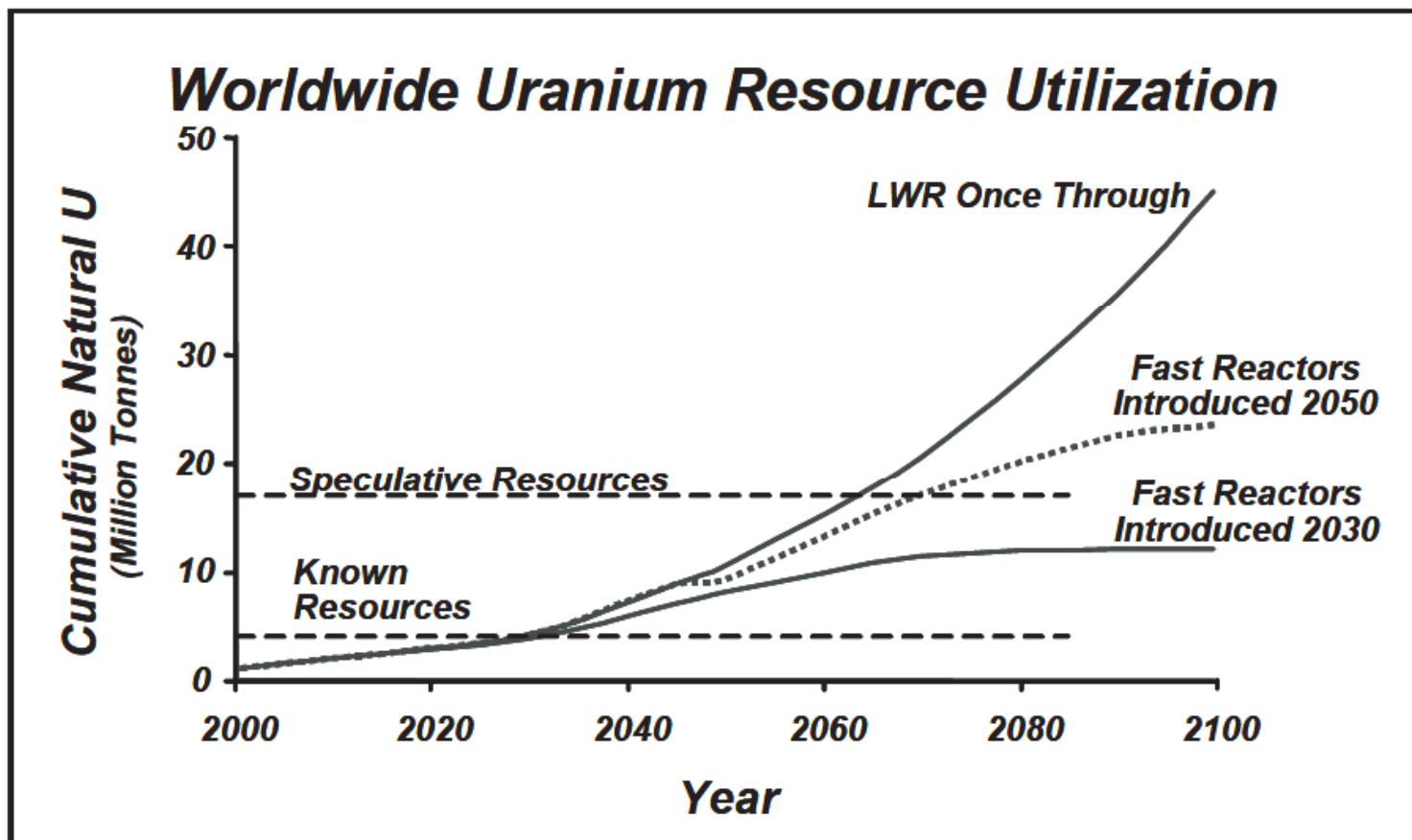
Nel lungo periodo (> 50 anni): **esaurimento disponibilità** di Uranio

L'utilizzo del combustibile



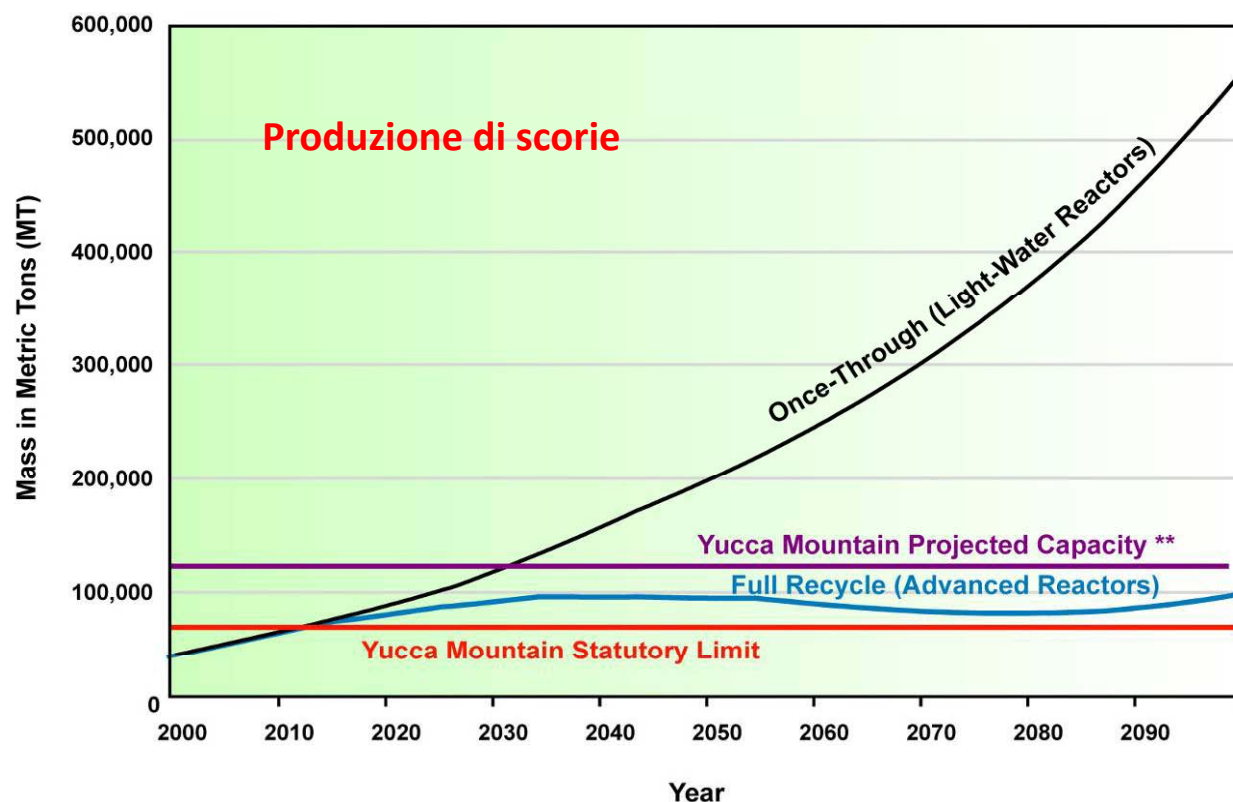
Se si utilizzasse ^{238}U per produrre energia, risorse sufficienti per 3000 anni !!

La richiesta di Uranio



Nel lungo periodo (50 anni a partire da ora), la **disponibilità** di uranio potrebbe diventare un problema (anche considerando risorse attualmente sconosciute).

Il problema delle scorie



Al rate attuale di crescita della produzione di energia elettrica, e con il nucleare al 20 % del totale, necessario approntare un deposito geologico tipo Yucca Mountain ogni 20 anni.

Le scorie nucleari nei reattori (1 GW_e LWR)

	Cm 238 2,4 h	Cm 239 3 h	Cm 240 27 d	Cm 241 32,8 d	Cm 242 162,94 d	Cm 243 29,1 a	Cm 244 18,10 a	Cm 245 8500 a	Cm 246 4730 a
Am 236 ? 3,7 m	Am 237 73,0 m	Am 238 1,63 h	Am 239 11,9 h	Am 240 50,8 h	Am 241 432,2 a	Am 242 141 a	Am 243 7370 a	Am 244 10,1 h	Am 245 2,05 h
Pu 235 25,3 m	Pu 236 2,858 a	Pu 237 45,2 d	Pu 238 87,74 a	Pu 239 2,411 · 10 ⁴ a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,750 · 10 ⁵ a	Pu 243 4,956 h	Pu 244 8,00 · 10 ⁷ a
Np 234 4,4 d	Np 235 396,1 d	Np 236 22,5 h	Np 237 2,144 · 10 ⁵ a	Np 238 2,117 d	Np 239 2,355 d	Np 240 7,22 m	Np 241 13,9 m	Np 242 2,2 m	Np 243 1,85 m
U 233 1,592 · 10 ⁵ a	U 234 0,0055	U 235 0,7200	U 236 2,342 · 10 ⁷ a	U 237 75 d	U 238 99,2745	U 239 23,5 m	U 240 14,1 h		U 242 16,8 m
Pa 232 1,31 d	Pa 233 27,0 d	Pa 234 1,17 m	Pa 235 24,2 m	Pa 236 9,1 m	Pa 237 8,7 m	Pa 238 2,3 m			
Th 231 25,5 h	Th 232 100	Th 233 22,3 m	Th 234 24,10 d	Th 235 7,1 m	Th 236 37,5 m	Th 237 5,0 m			

244, 245Cm
1.5 Kg/yr

241Am: 11.6 Kg/yr
243Am: 4.8 Kg/yr

239Pu: 125 Kg/yr

237Np: 16 Kg/yr

LLFP
76.2 Kg/yr

LLFP

Il ciclo Th/U

	Cm 238 2,4 h	Cm 239 3 h	Cm 240 27 d	Cm 241 32,8 d	Cm 242 162,94 d	Cm 243 29,1 a	Cm 244 18,10 a	Cm 245 8500 a	Cm 246 4730 a
Am 236 ? 3,7 m	Am 237 73,0 m	Am 238 1,63 h	Am 239 11,9 h	Am 240 50,8 h	Am 241 432,2 a	Am 242 141 a	Am 243 7370 a	Am 244 26 m	Am 245 2,05 h
Pu 235 25,3 m	Pu 236 2,858 a	Pu 237 45,2 d	Pu 238 87,74 a	Pu 239 2,411 · 10 ⁴ a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,750 · 10 ⁵ a	Pu 243 4,956 h	Pu 244 8,00 · 10 ² a
Np 234 4,4 d	Np 235 396,1 d	Np 236 22,5 h	Np 237 2,144 · 10 ⁵ a	Np 238 2,117 d	Np 239 2,355 d	Np 240 7,22 m	Np 241 13,9 m	Np 242 2,2 m	Np 243 1,85 m
U 233 1,592 · 10 ⁵ a	U 234 0,0055	U 235 0,7200	U 236 120 ns	U 237 4,75 d	U 238 99,2745	U 239 23,5 m	U 240 14,1 h		U 242 16,8 m
Pa 232 1,31 d	Pa 233 2,0 d	Pa 234 1,17 m	Pa 235 24,2 m	Pa 236 9,1 m	Pa 237 8,7 m	Pa 238 2,3 m			
Th 231 25,5 h	Th 232 1,405 · 10 ¹⁰ a	Th 233 22,3 m	Th 234 24,10 d	Th 235 7,1 m	Th 236 37,5 m	Th 237 5,0 m			



LLFP

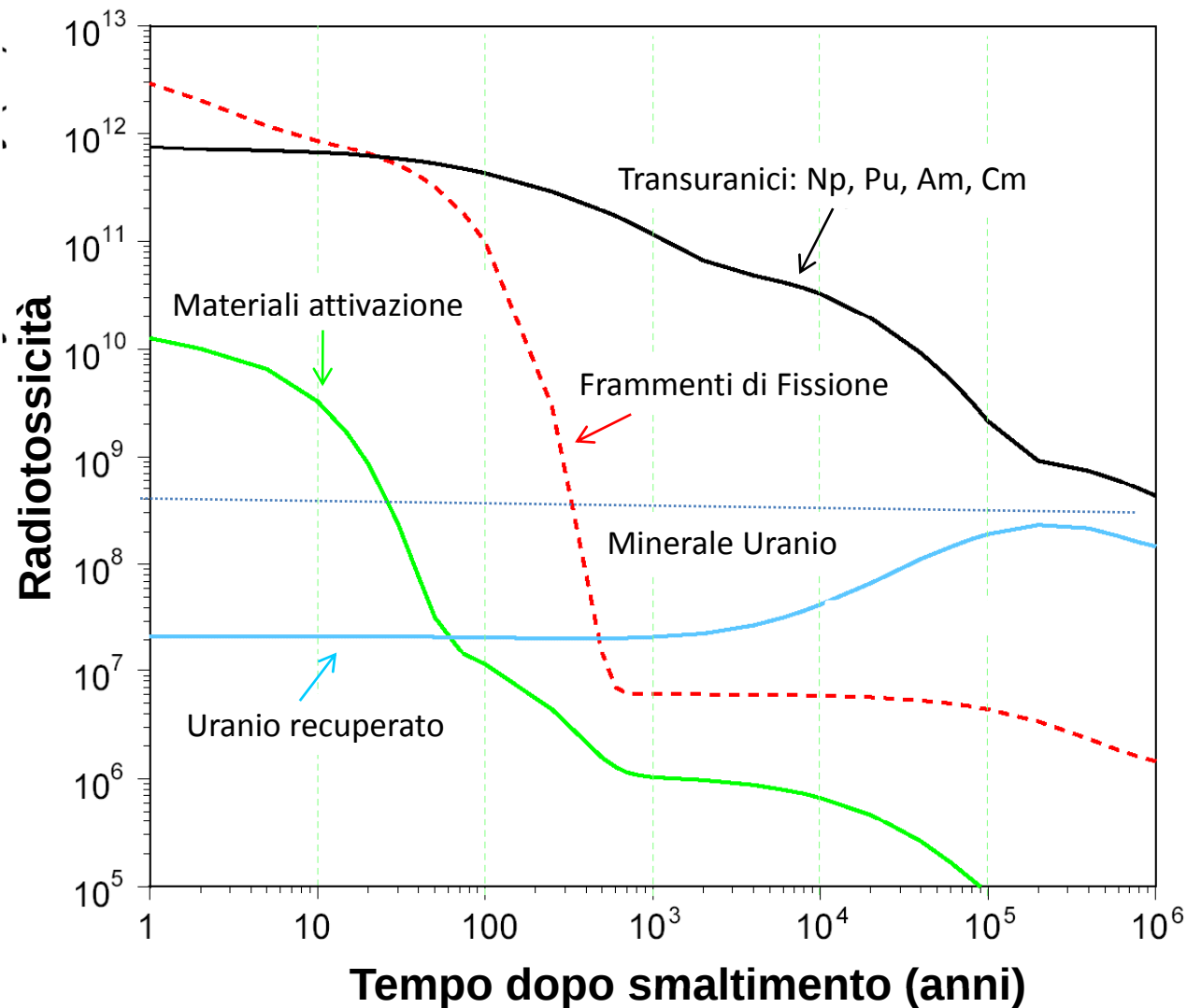
LLFP

Le varie componenti delle scorie nucleari

I **Frammenti di Fissione** decadono in poche **centinaia di anni** (a parte alcune eccezioni). Per il loro stoccaggio sono sufficienti **barriere ingegneristiche**.

Gli **attinidi** sopravvivono per **milioni di anni**, e richiedono siti di stoccaggio **geologici**.

Plutonio e attinidi minori rappresentano il problema principale per lo smaltimento delle scorie nucleari.



L'idea rivoluzionaria

La soluzione al duplice problema (scorie e utilizzo inefficiente dell'U) è il **riutilizzo del combustibile (ciclo chiuso)**.

Attualmente praticato in alcuni casi il **riprocessamento**, che consiste nel separare dal combustibile spento U e Pu, utilizzato per preparare nuovo combustibile.

- vantaggio -> riduzione del volume delle scorie;
- svantaggio -> al momento non è economicamente conveniente

Non è un vero ciclo chiuso (volume delle scorie prodotte è ancora significativo).

Il salto di qualità si avrebbe con sistemi che **riutilizzino** non solo U e Pu, ma anche una grossa parte delle **scorie** (soprattutto attinidi a lunga vita media). Semplificherebbe notevolmente il problema dello **stoccaggio**, grazie al ridotto volume e vita media delle scorie residue.

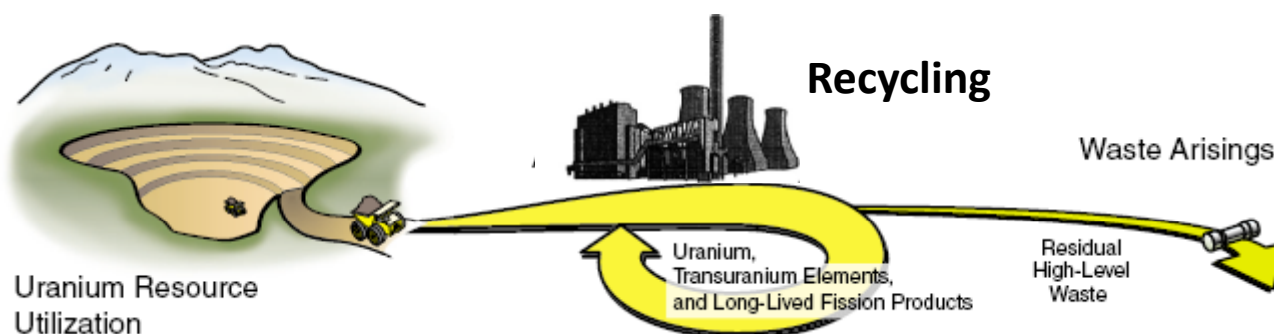
Inoltre, con riciclo, più **efficiente utilizzo** delle risorse di U:

- in un reattore tradizionale si produce qualche decina di MWh/kg di U
- in un reattore di IV Gen si produrrebbe qualche GWh/kg di U.

I reattori di nuova generazione

Allo studio reattori di **nuova generazione** che non presentino i problemi attuali (in particolare limitata disponibilità di U e produzione di scorie).

Principio fondamentale è il **riutilizzo** di una parte importante del combustibile spento.



Attualmente allo studio diversi sistemi nucleari innovativi:

- reattori di **IV Generazione** (critici), con scopo primario la produzione di energia;
- **Accelerator Driven Systems** (sottocritici), mirati per lo più alla trasmutazione delle scorie radioattive (LLFF e MA);
- Reattori basati sul **ciclo Th/U**
- Fusion-fission (fissione indotta da neutroni prodotti dalla fusione)

La trasmutazione delle scorie radioattive

Trasmutazione (o incenerimento nucleare) delle scorie radioattive



reazioni indotte da **neutroni** che trasformano isotopi radioattivi a lunga vita media in **isotopi stabili** o a vita media breve.

Element (quantity)	Isotope	Half-life (years)	Quantity (ton/year)
Plutonium (11.4 ton/year)	^{238}Pu	88	0.19
	^{239}Pu	2.4×10^4	6.53
	^{240}Pu	6.5×10^3	2.52
Minor actinides (1.1 ton/year)	^{237}Np	2.1×10^6	0.48
	^{241}Am	430	0.25
	^{243}Am	7.4×10^3	0.14
	^{245}Cm	8.5×10^3	0.001
Fission products (39 ton/year)	^{135}Cs	2.3×10^6	0.4
	^{99}Tc	2.1×10^5	1.0
	^{93}Zr	1.5×10^6	0.9
	^{129}I	1.0×10^7	0.2
	^{107}Pd	6.5×10^6	0.25

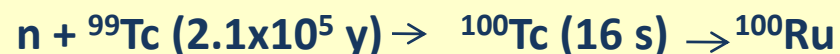
Reazioni di trasmutazione

Frammenti di fissione (LLFF)

^{151}Sm , ^{99}Tc , ^{121}I , ^{79}Se ...



cattura neutronica (n,γ)



Pu e attinidi minori

^{240}Pu , ^{237}Np , $^{241,243}\text{Am}$, $^{244,245}\text{Cm}$, ...



fissione indotta da neutroni (n,f)

cattura neutronica (n,γ)

I reattori veloci di IV Generazione

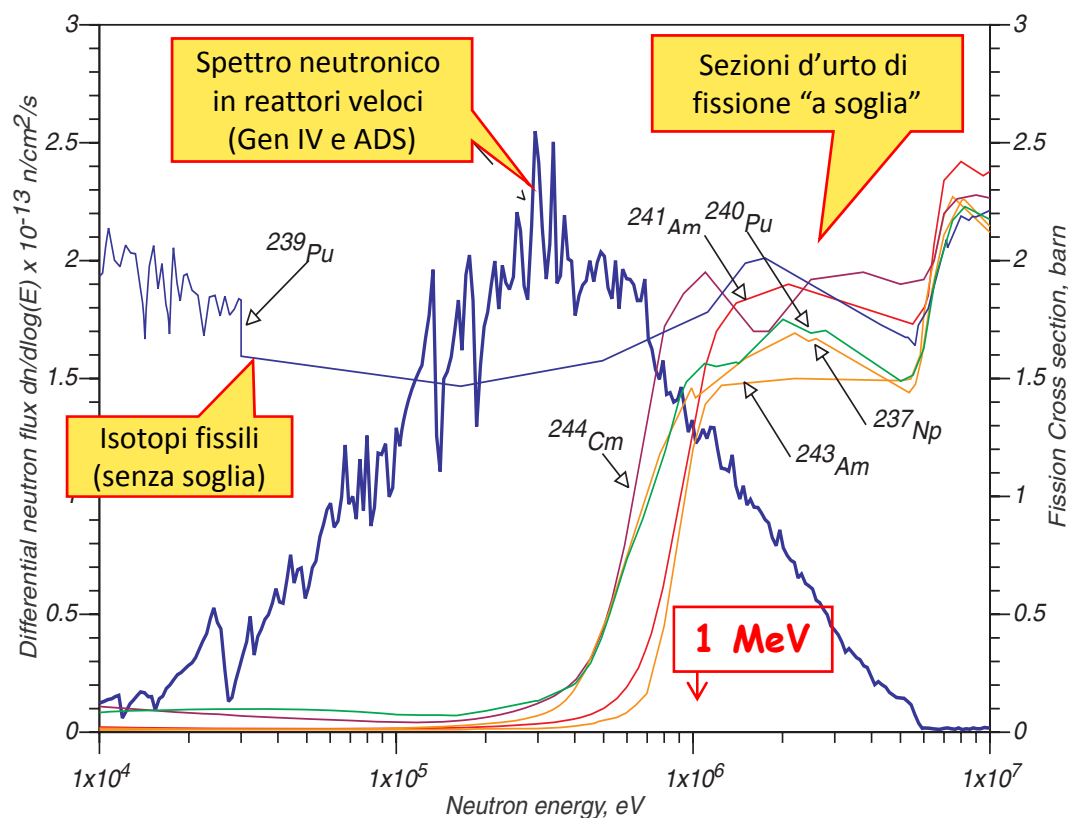
L'innovazione principale riguarda la possibilità di produrre energia bruciando le scorie a più alta radiotossicità: **Np, Am, Cm** (1 g di scoria produce stessa energia di 3 tonn di carbone).

A parte il ^{245}Cm , gli attinidi minori presentano una **soglia di fissione** intorno al **MeV**.

Per bruciare gli attinidi minori sono necessari **neutroni veloci** ($E_n > 500$ keV).

I reattori **veloci di IV Generazione** ("breeder") **producono e bruciano** attinidi (inclusi quelli minori):

- **utilizzo ottimale** delle risorse di Uranio
- **minore** produzione di scorie da smaltire in siti geologici.



Non tutti i reattori di IV Generazione sono **reattori veloci** autofertilizzanti.

Gli obiettivi della IV Generazione

Vantaggi per l'ambiente:

- zero emissione di CO₂, SO₂, etc... (**energia pulita**)
- minore produzione di **scorie**

Sostenibilità:

- maggiore efficienza di **burn-up** e maggiore efficienza **termica**
- disponibilità del combustibile nel **lungo termine**

Economicità:

- **tempi e costi** di costruzione (capital risk) confrontabili con altre fonti energetiche
- **costo del kWh** confrontabile o inferiore ad altre fonti (rinnovabili)

Sicurezza

- Bassissimo rischio di danno al **nocciolo** (inferiore a 10⁻⁷ per reattore-anno)
- Sicurezze passive
- Maggiore **protezione** contro attacchi terroristici (compreso impatto aereo)

Gli obiettivi della IV Generazione (2)

Non-proliferazione

- bassa convenienza o impossibilità di **furto di materiale fissile**
- impossibilità di utilizzo del combustibile per **scopi militari**

Possibilità di produrre idrogeno

- “estensione” del nucleare al settore dei **trasporti**

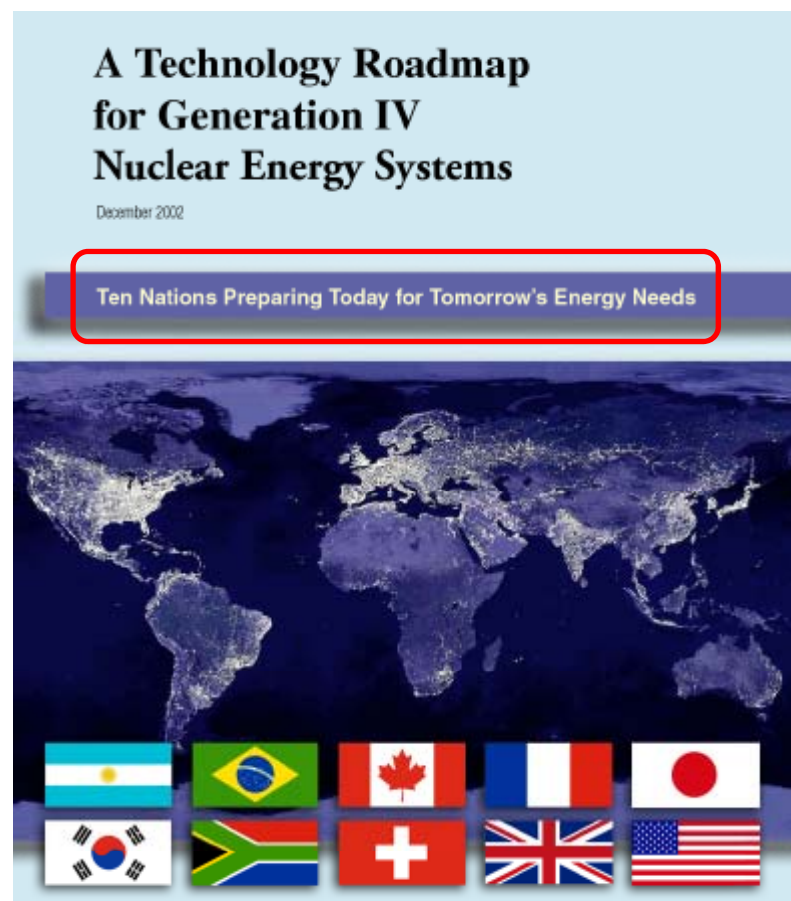
The Generation IV forum

Nel 2002 costituito un gruppo di lavoro (Generation IV International Forum, GIF) per lo sviluppo dei reattori di nuova generazione:

- studio di fattibilità
- Individuazione dei problemi tecnici
- suddivisione del lavoro

Al GIF per il momento aderiscono ufficialmente 10 nazioni, ma contributi importanti da enti di ricerca e industrie di altri paesi.

In Italia, l'Ansaldo Nucleare partecipa allo sviluppo dei reattori di IV Generazione. INFN coinvolta per i dati nucleari.



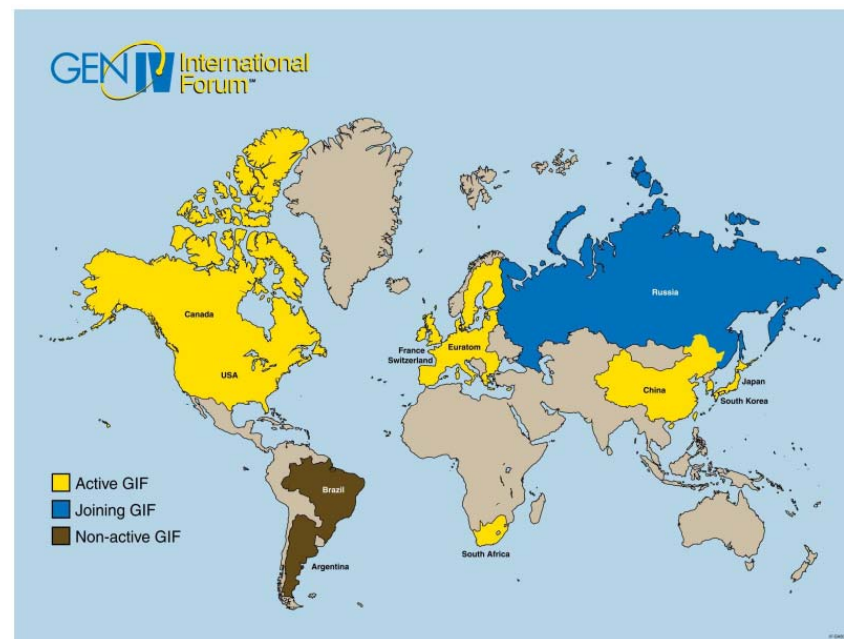
L'organizzazione del Gen IV Forum

Nel 2005 è stato firmato un accordo fra i principali Paesi afferenti per:

- rafforzare **collaborazione** per attività di ricerca e sviluppo
- individuare ministeri, agenzie e industrie competenti per finanziamenti e attività
- istituire comitati di indirizzo e controllo ("**steering committees**") per gestire attività e gruppi di lavoro
- supportare la stipula di **contratti multilaterali di R&D** per attirare nella collaborazione industrie, università e altri Paesi.

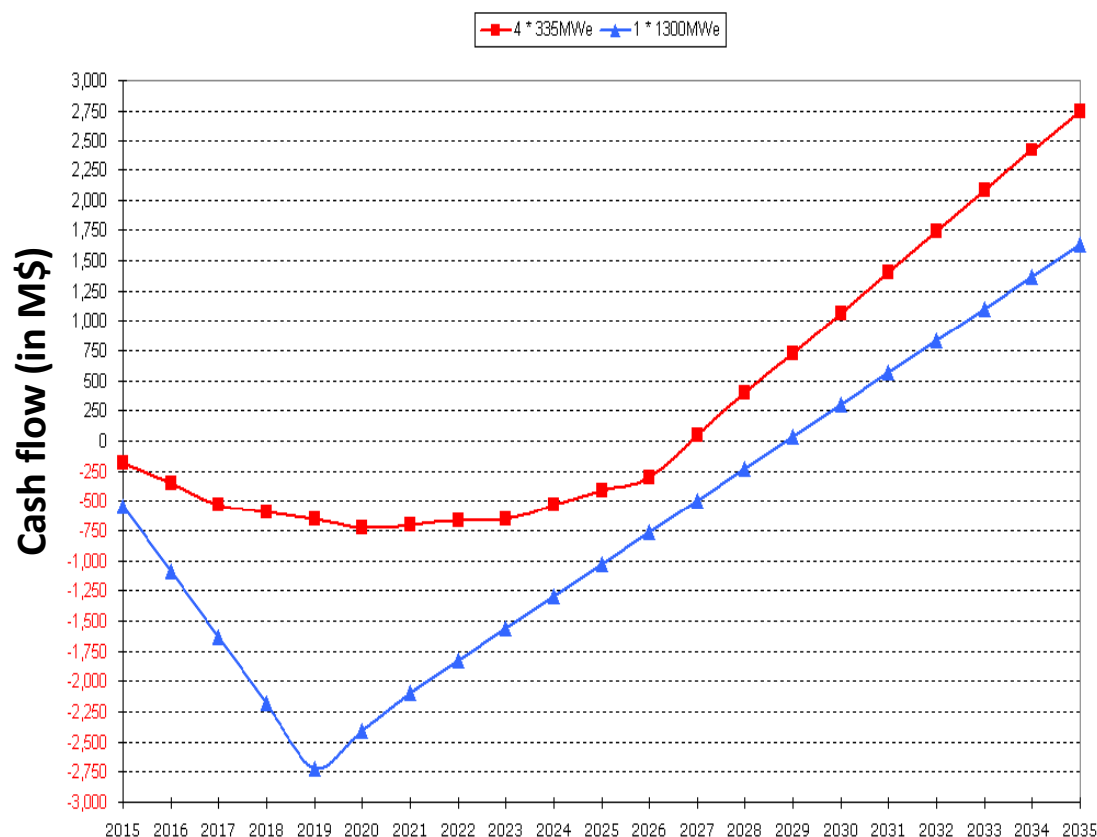
Attualmente in GIF:

Canada, Cina, Euratom, Francia, Giappone, Repubblica di Corea, Sud Africa, Svizzera, Stati Uniti, (Russia)



La convenienza dei reattori medio-piccoli

Non sempre si ha un vantaggio dall'economia di scala (ovvero costruire reattori grandi).



Può essere conveniente **costruire progressivamente** diversi reattori medio-piccoli, piuttosto che uno grande (a parità di potenza totale):

- ridotto investimento iniziale
- tempi di costruzione minori
- “learning curve”
- adattamento alle esigenze

La costruzione di reattori di dimensioni **medio-piccole** potrebbe essere una soluzione interessante per diversi casi:

- paesi con **reti elettriche** piccole (< 10 GW)
- posti **isolati** o lontani dalla rete elettrica (isole, Poli, etc...)
- paesi con **limitate** capacità di investimento.

I reattori di IV Generazione

Attualmente allo studio **sei tipi di reattori** di IV Generazione (di cui tre veloci)

Sistemi di IV Generazione	Acronimo
Gas-cooled Fast Reactors	GFR
Lead-cooled Fast Reactors	LFR
Sodium-cooled Fast Reactors	SFR
Molten Salt Reactors	MSR
Supercritical-Water-Cooled Reactors	SCWR
Very-High-Temperature Reactors	VHTR

E' probabile che alcuni siano abbandonati strada facendo, o che siano introdotte altre varianti.

Al momento quelli che hanno più possibilità di essere sviluppati sono il SFR e il GFR.

Le caratteristiche dei vari reattori sono studiate in modo da soddisfare diverse esigenze.

Per alcuni tipi di reattori esiste già esperienza negli anni passati a cui fare riferimento (Phenix, SuperPhenix, Peeble bed reactors, reattori raffreddati a Pb/Bi nei sottomarini russi classe Alpha, etc...)

I reattori di IV Generazione

Attività di **R&D necessaria** per lo sviluppo di reattori di IV Generazione:

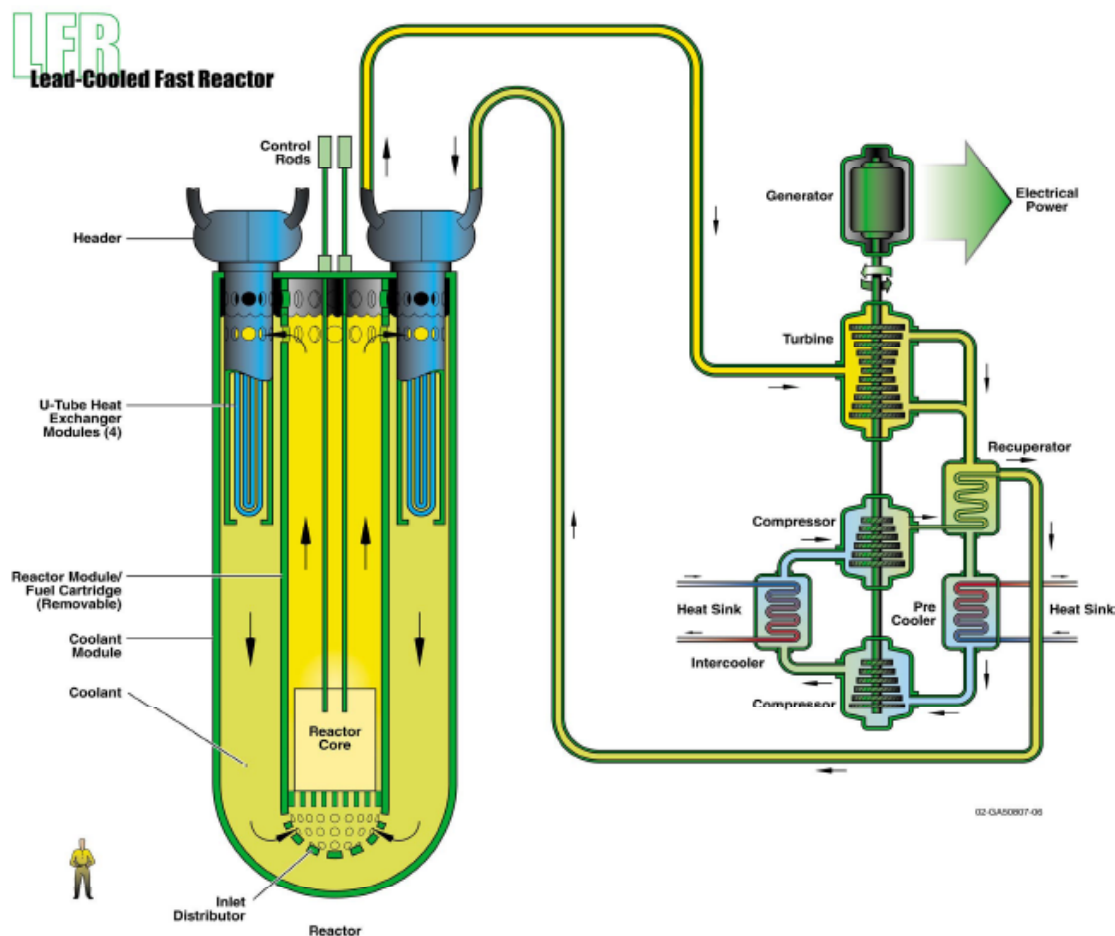
- ottimizzazione del combustibile: **U-Pu, U-Pu-MA, Th-Pu-MA, etc...**
- **tecnologia del riprocessamento**
- sistemi di raffreddamento (termoidraulica): **He, Pb/Bi, Na, Li, etc...**
- materiali strutturali: **nuovi acciai, composti di carbonio, etc...**

Quattro sistemi hanno già dei piani finali di sviluppo:

- **GFR, SFR, SCWR, VHTR**
- **LFR** è in fase di studio
- **MSR** è previsto per il futuro

Per il momento nella progettazione considerato solo il ciclo di combustibile U/Pu, ma potrebbero essere adattati per sfruttare il ciclo del Th/U.

Reattore veloce raffreddato a piombo (Lead-Cooled Fast Reactor, LFR)



Caratteristiche

- reattore **“breeder” a ciclo chiuso**
- **Pb liquido** (o miscela Pb/Bi) come refrigerante primario
- circolazione per **convezione**
- temperatura in uscita da 550 a 800C
- potenza da 50 a 1200 MWe (versione portatile da 50 a 150 MWe)

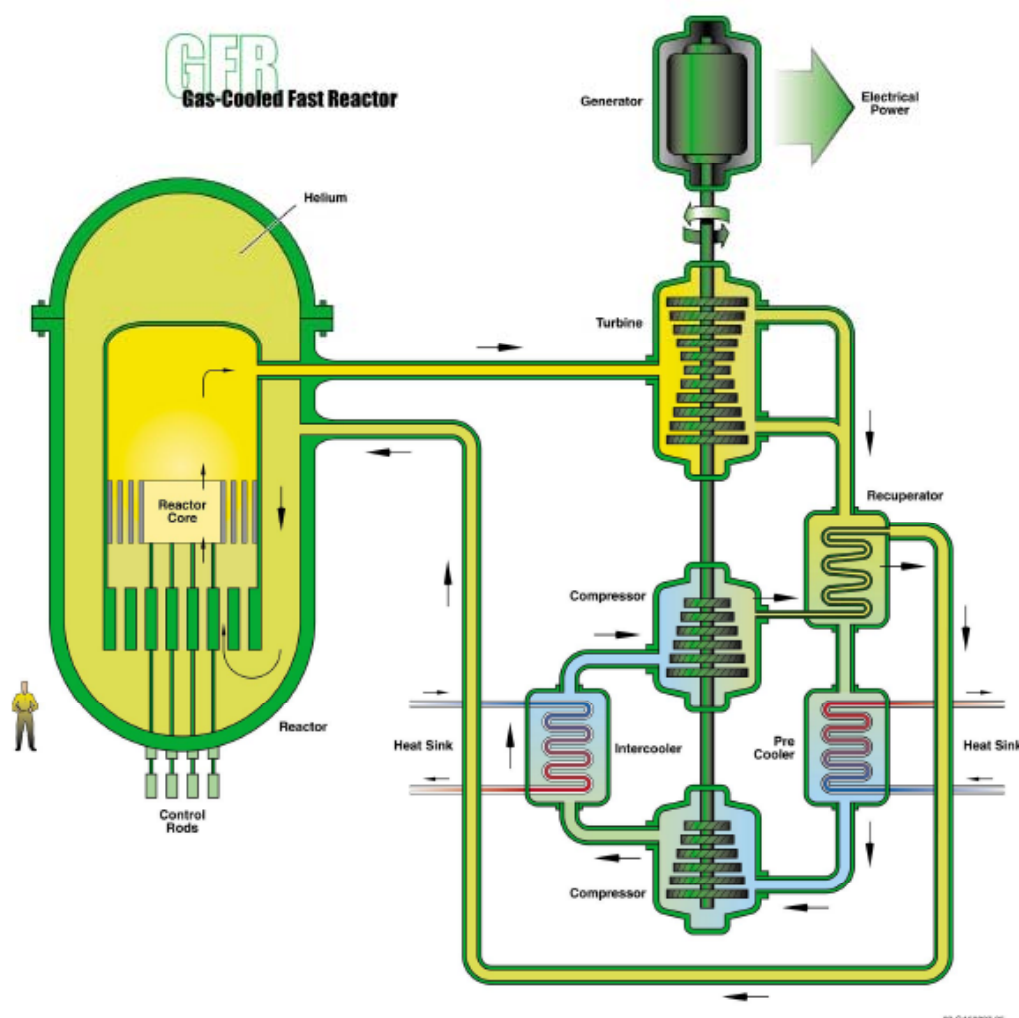
Vantaggi

- Produzione di elettricità, idrogeno, dissalazione.
- Alto grado di sicurezza passiva

Prototipo: 2025.

Allo sviluppo del Lead-Cooled Fast Reactor partecipa l'Ansaldo Nucleare

Reattore veloce raffreddato a gas (Gas-cooled Fast Reactor, GFR)



Caratteristiche

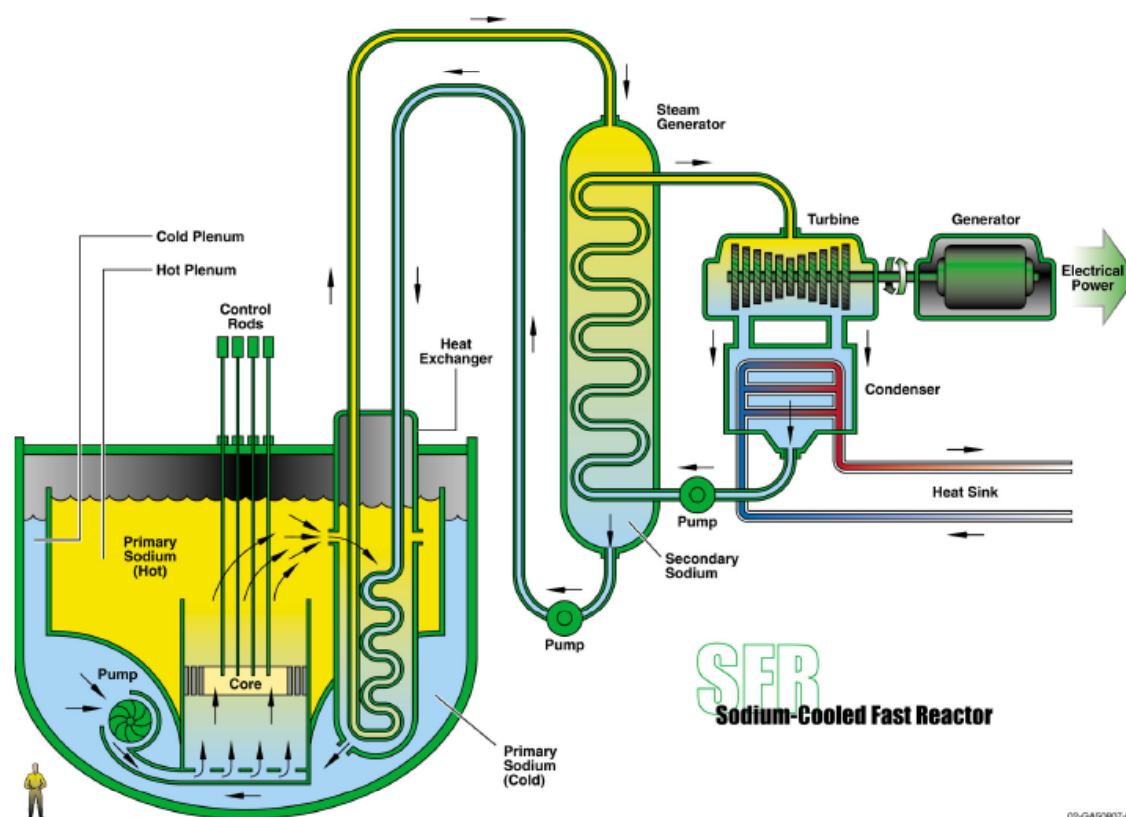
- reattore veloce “breeder” con riciclo completo degli attinidi
- **raffreddamento a He**
- temperatura in uscita 850 C
- dimensione : 1 GWe
- unico scambiatore
- **turbina a gas**

Vantaggi

- Alta efficienza termica (vicina al 50%)
- Economico
- Produzione elettricità e idrogeno
- minimizzazione delle scorie e uso efficiente di Uranio

Prototipo: 2020

Reattore veloce raffreddato a sodio (Sodium-Cooled Fast Reactor, SFR)



Caratteristiche

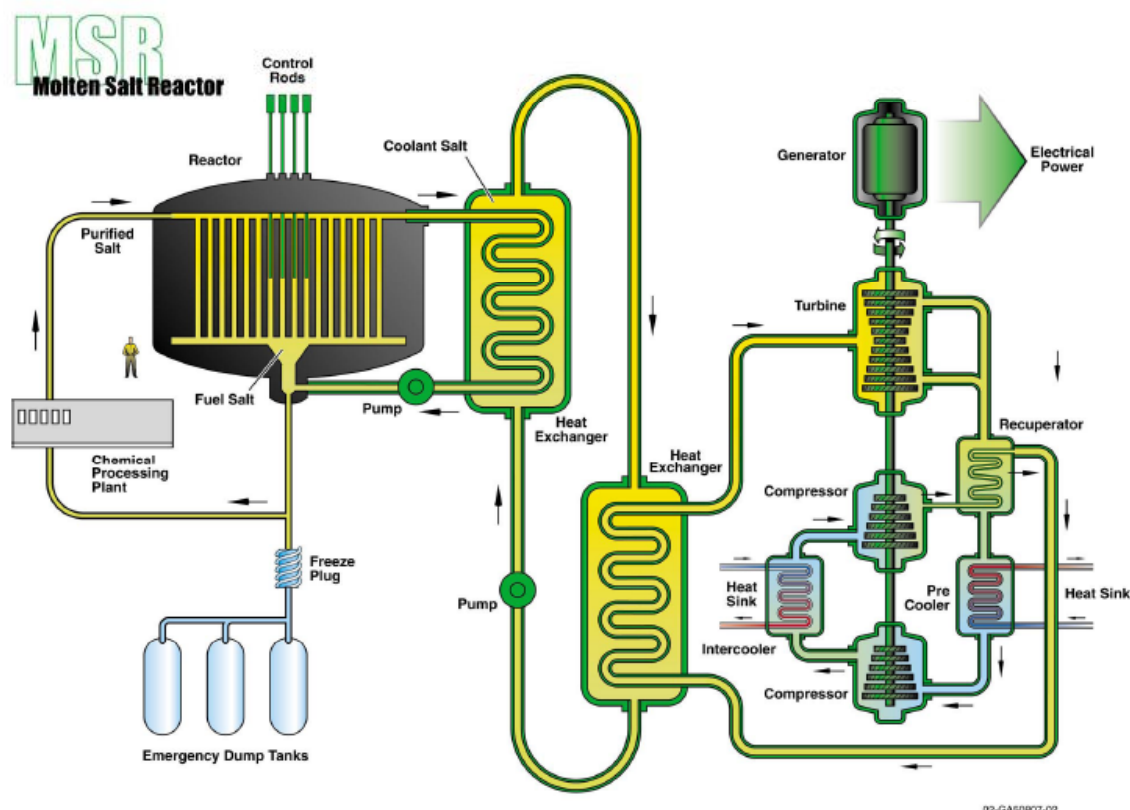
- reattore veloce “breeder” con riciclo attinidi
- **Sodio liquido** come refrigerante
- Temperatura in uscita 550C
- Dimensioni piccola (50 MWe), media (300-600 MWe) o grande (600-1500 MWe)
- Doppio scambiatore di calore per maggiore sicurezza

Vantaggi

- Alta efficienza termica
- Efficiente produzione di combustibile
- Incenerimento degli attinidi

Prototipo: 2020

Reattore a sali fusi (Molten-Salt Reactor, MSR)



Caratteristiche

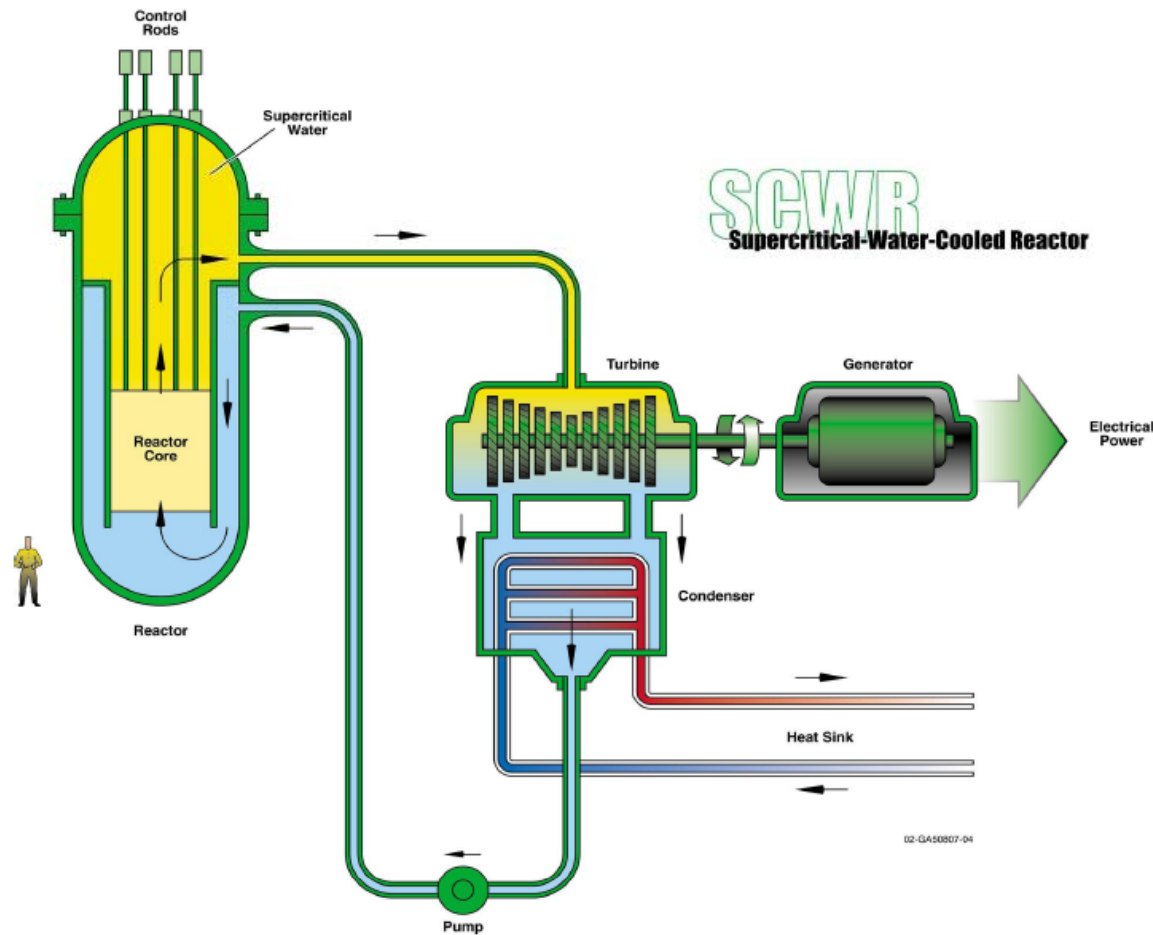
- reattore epitermico
- **combustibile liquido**: miscela di sodio, litio, berilio e fluoruro di uranio o plutonio
- temperatura in uscita 700-800C
- dimensione grande (1000 MWe)
- doppio scambiatore di calore per maggiore sicurezza

Vantaggi

- minima produzione di scorie
- **semplicità** **preparazione combustibile**
- **non-proliferazione**
- autofertilizzante con Th (spettro termico) e U (spettro veloce)

Prototipo: 2020

Reatt. acqua supercritica (Supercritical-Water-Cooled Reactor, SWCR)



Caratteristiche

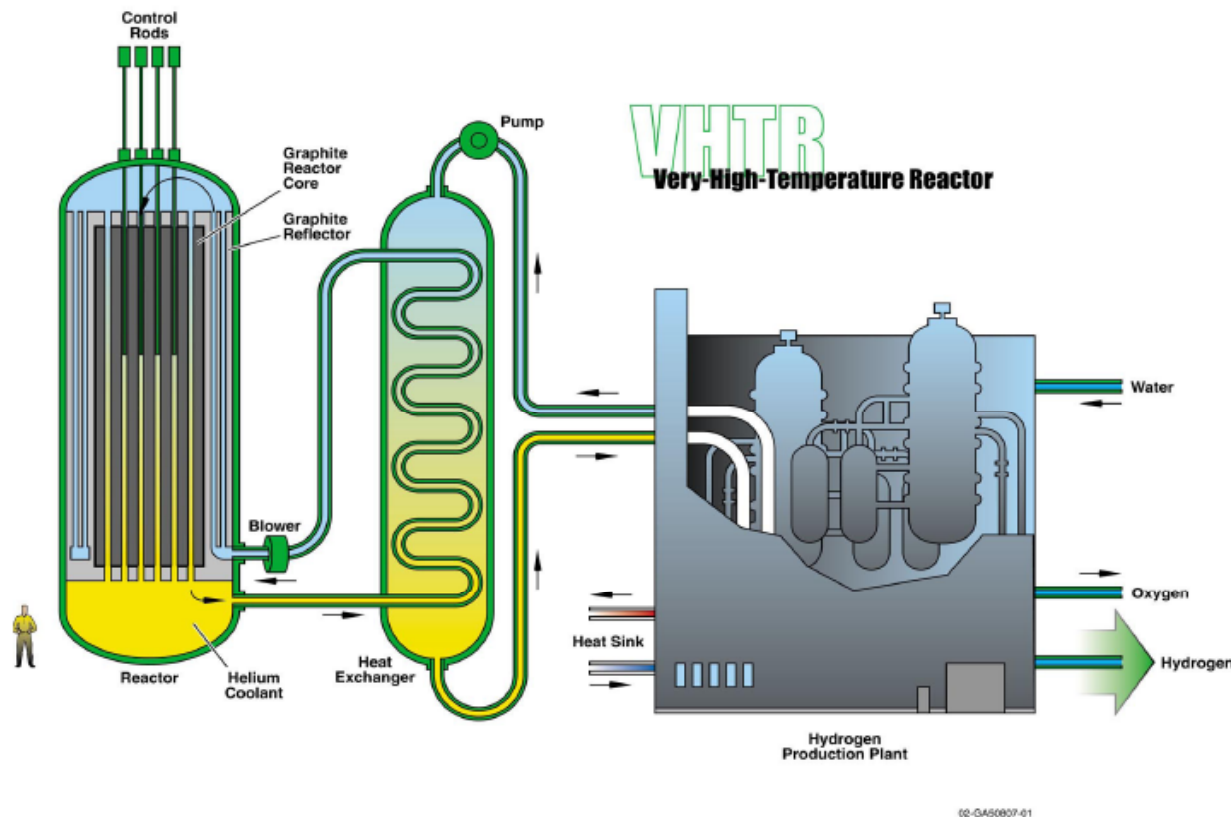
- acqua di raffreddamento in condizioni supercritiche, ciclo diretto (in pratica BWR unica fase).
- temperatura in uscita 510-625C
- Dimensione grande (1500 MWe)
- Unico scambiatore di calore

Vantaggi

- Alta efficienza termica (45%)
- Usa esperienza acqua supercritica nelle centrali a combustibile fossile
- Può essere termico o veloce

Prototipo: 2022

Reatt. altissima temperatura (Very-high-Temperature Reactor, VHTR)



Caratteristiche

- Raffreddamento a He
- temperatura in uscita **1000C** !!
- Reattore “once through” (tradizionale) con spettro termico (moderato a grafite).
- Dimensione piccola (250 MWe)

Vantaggi

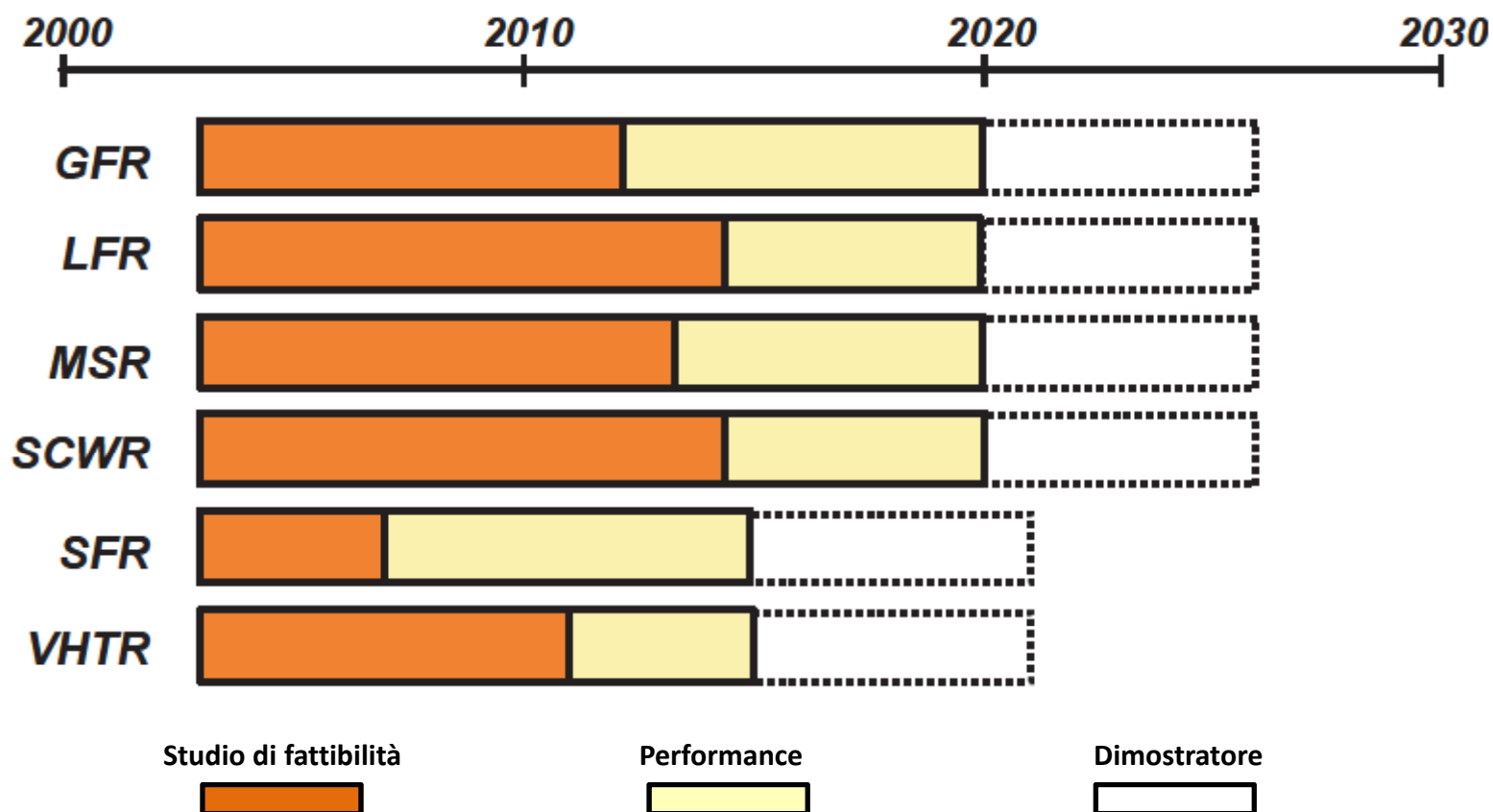
- Produzione di idrogeno (dissociazione termochimica dell'acqua)
- Alta efficienza termica
- Alto grado di sicurezze passive

Prototipo: 2022

Overview dei reattori di IV Generazione

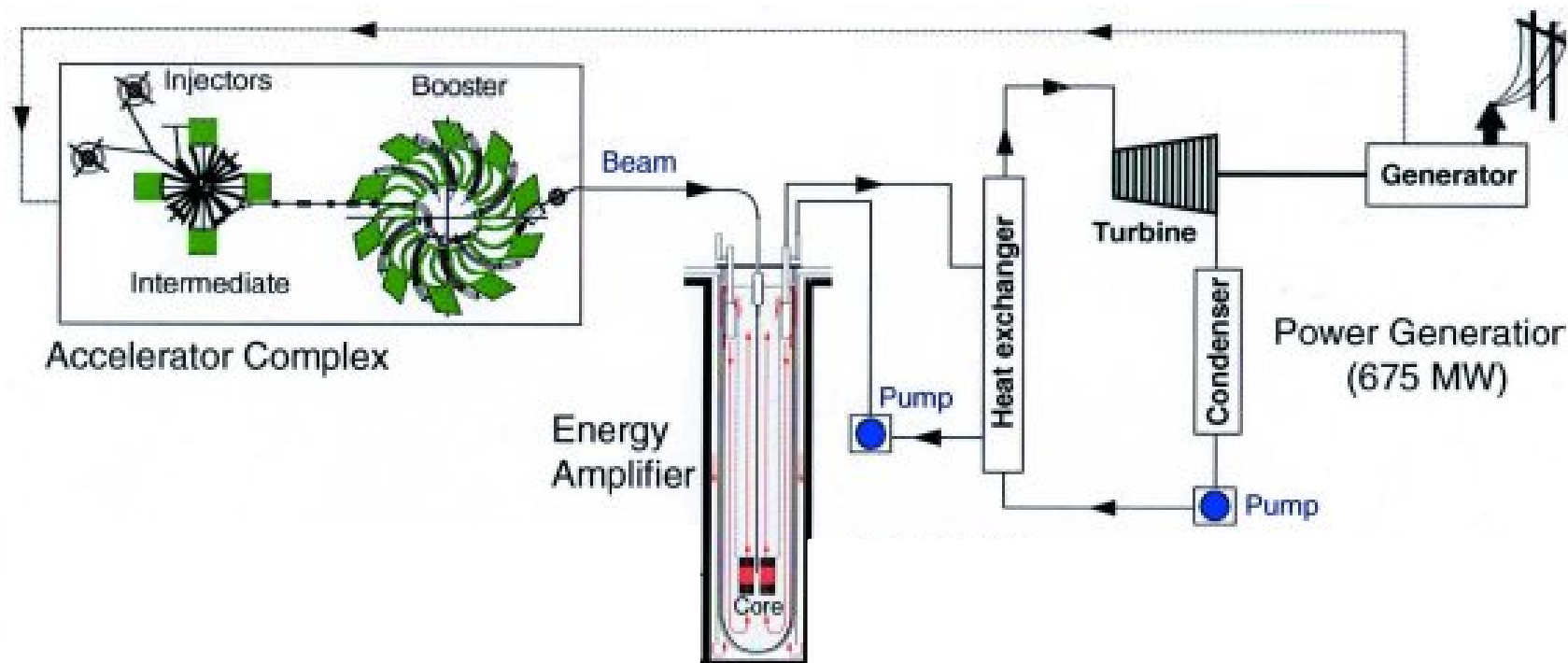
Tipo di reattore	Spettro neutronico	Ciclo di combustibile	Dimensione (MWe)	Utilizzo	Sviluppi richiesti
Reattore veloce raffreddato a gas (GFR)	Veloce	Chiuso (U, Pu, Att.)	200-1200	Elettricità, idrogeno, inc. scorie	Combustibile Materiali
Reattore veloce raffreddato a piombo (LFR)	Veloce	Chiuso	50-150 300-600 1200	Elettricità Idrogeno	Combustibile Materiali
Reattore veloce raffreddato a Sodio (SFR)	Veloce	Chiuso	300-1500	Elettricità Inc. scorie	Riprocess. combustibile
Reattore a sali fusi (MSR)	Epitermico	Chiuso	1000	Elettricità Idrogeno Inc. scorie	Combustibile Materiali Affidabilità
Reattore ad acqua supercritica (SCWR)	Termico / veloce	Aperto / Chiuso	1500	Elettricità	Materiali Termoidraulica
Reattore ad altissima temperatura (VHTR)	Termico	Aperto	250	Elettricità Idrogeno	Combustibile Materiali

La schedula dei reattori Gen IV



L'obiettivo è di fare in modo che i reattori di IV Generazione siano pronti per il 2030, quando starà per scadere la licenza della maggior parte dei reattori attuali.

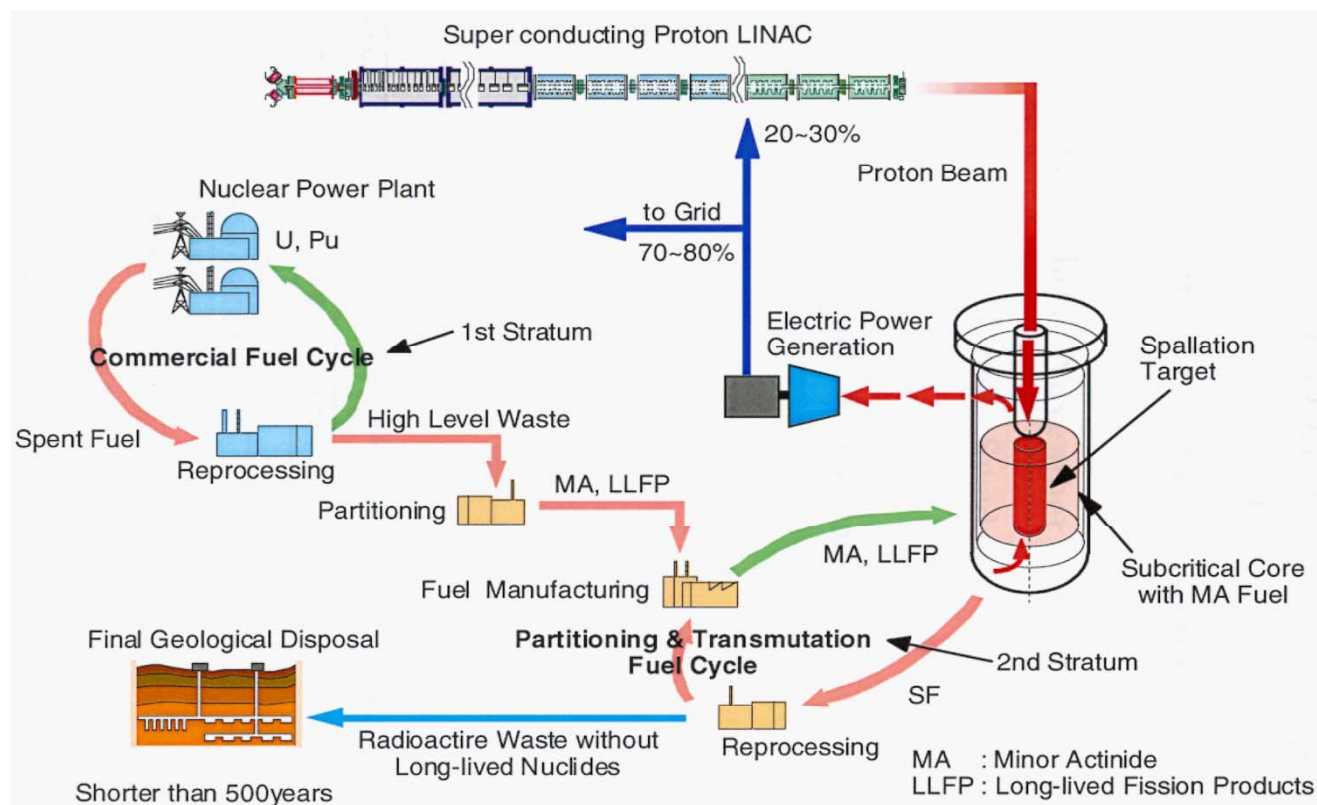
Accelerator Driven Systems



Accelerator Driven System: reattore **sottocritico** in cui i neutroni necessari a sostenere la reazione sono forniti dall'esterno per mezzo di un acceleratore (di protoni):

- sicurezza intrinseca
- possibilità di incenerire le scorie (sia frammenti di fissione che attinidi)
- una parte dell'energia per l'acceleratore viene fornita dal reattore

ADS per trasmutazione scorie



Il principale problema tecnologico riguarda acceleratori di p o d fino a 1 GeV, di alta intensità (diversi mA) ed in grado di lavorare con poche interruzioni.

Attualmente considerata come opzione soprattutto per “waste management”.

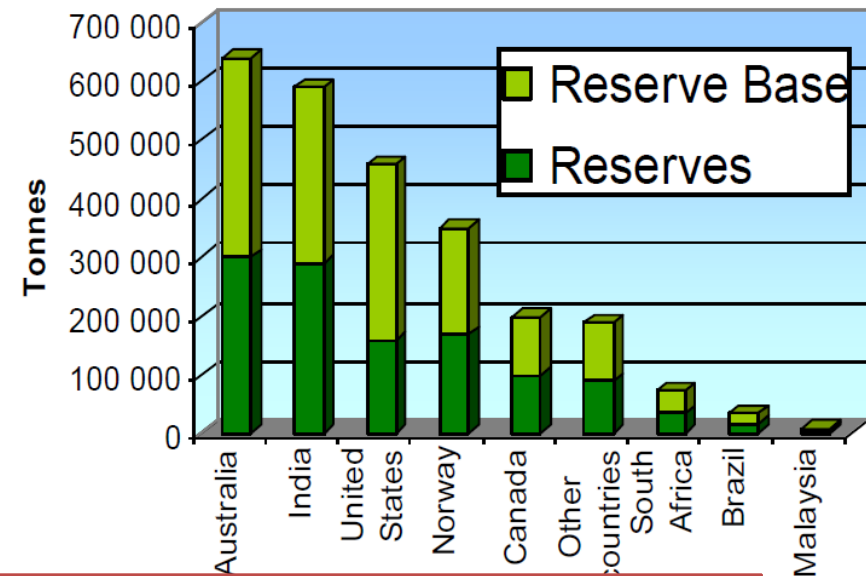
Il ciclo Th/U (India)

L'idea di utilizzare Torio (^{232}Th) per produrre energia è già stata considerata in passato, ma quasi tutti i **progetti si sono arenati** negli anni '80 perchè:

- dal punto di vista economico **non è competitivo** rispetto al ciclo U/Pu (non era);
- richiede uno **step intermedio** per la produzione di ^{233}U (che non esiste in natura);
- dopo Chernobyl, c'è stato un **minore impulso a sviluppi tecnologici** su nuovi reattori (sta riprendendo negli ultimi tempi);
- preoccupazioni per la **proliferazione** (uso di ^{233}U per scopi militari).

Per i motivi di cui sopra, il ciclo Th/U non ha ricevuto fin'ora un grosso **impulso** nel mondo, eccetto **in India**:

- grosse riserve di Th
- difficoltà di approvvigionamento di Uranio arricchito.

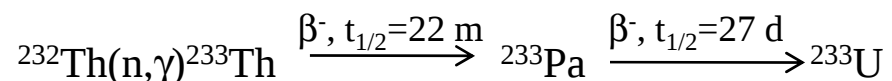


Potrebbe rivelarsi soluzione molto meno complessa e costosa dei Gen IV

La produzione di ^{233}U

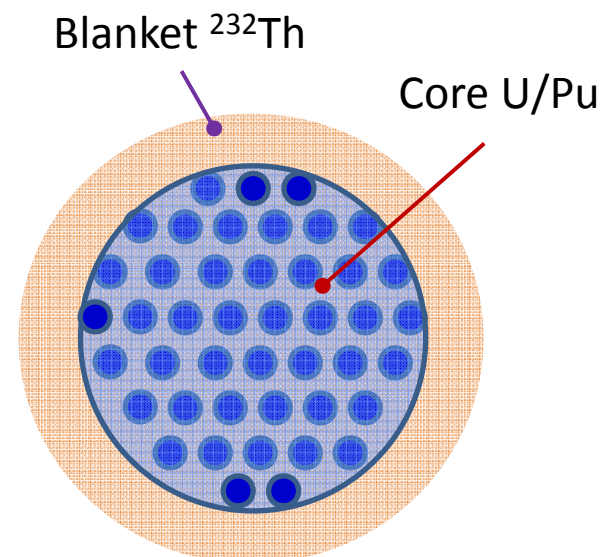
Il materiale fissile nel ciclo è l' ^{233}U , che ha una **alta sezione d'urto** di fissione e alta molteplicità di neutroni emessi nella fissione.

L' ^{233}U non esiste in natura, ma può essere **prodotto a partire dal ^{232}Th** per cattura neutronica.



Per produrne in quantità sufficiente per partire si pensa di utilizzare un **reattore veloce a U/Pu**, con rivestimento (“blanket”) di Torio intorno al nocciolo.

Una parte dei neutroni prodotti nel core vengono catturati nel blanket e producono ^{233}U .



Una volta prodotta una quantità sufficiente di ^{233}U , è possibile realizzare un **reattore autofertilizzante** basato interamente sul **ciclo Th/U** (può essere **termico o veloce**).

Allettante per la grande quantità di Torio in natura e perché produce una **bassa quantità di scorie**.

Il programma per l'energia nucleare in INDIA

L'India sta puntando sullo sviluppo del **ciclo Th/U** per la sua **sicurezza energetica**. Previsto un programma in tre fasi che ha come obiettivo la realizzazione di impianti nucleari che usino solo Torio.

Fase I (attuale):

- reattori PHWR (15 operativi + 3 in costruzione)
- reattori BWR (ad acqua leggera)
- reattori VVER (reattori PWR russi)

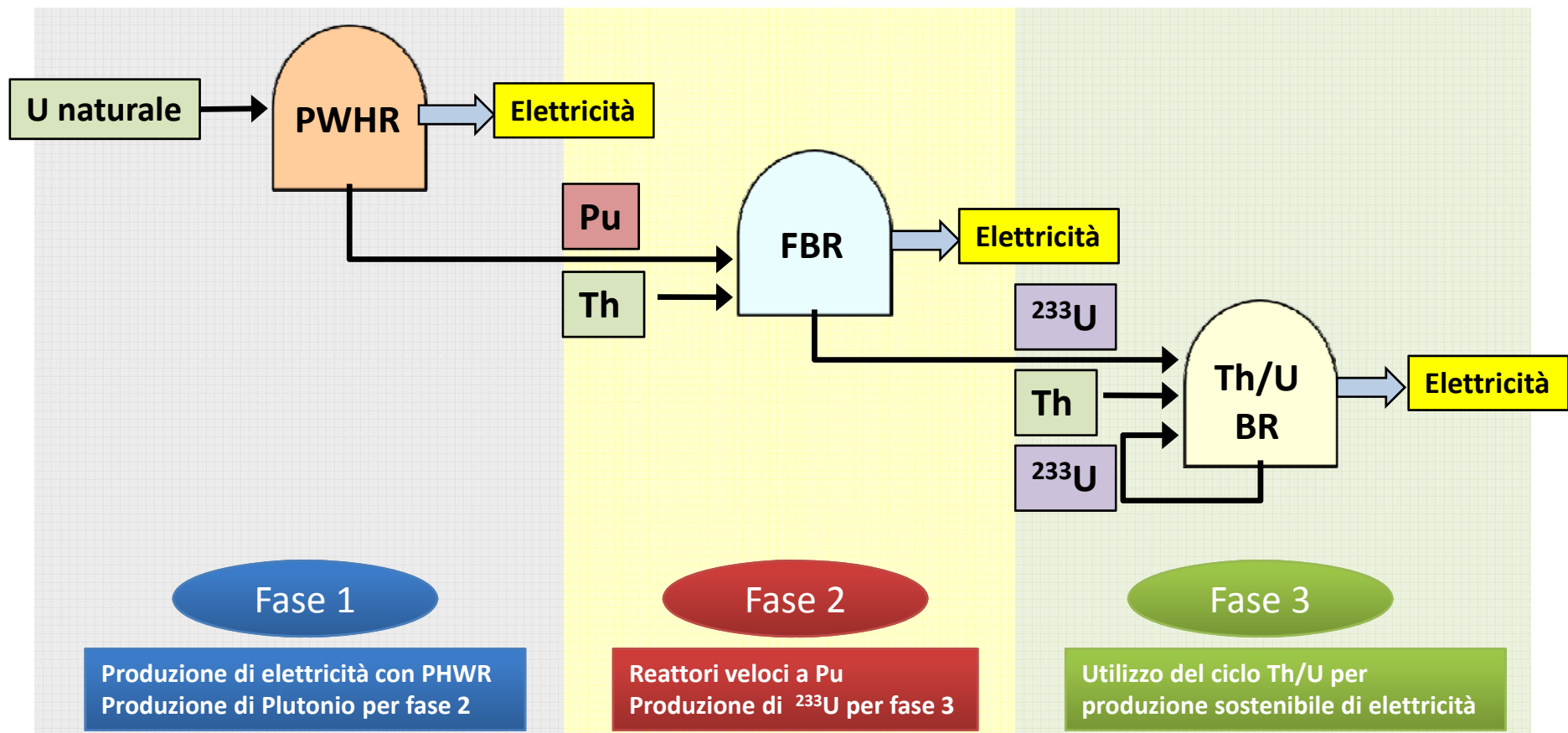
Fase II (produzione di ^{233}U):

- FBR: core di U/Pu, blanket di ^{232}Th per la produzione di ^{233}U

Fase III (utilizzo del ^{233}U come combustibile):

- reattore KAMINI: primo reattore a ^{233}U !!
- piccolo reattore sperimentale ad acqua leggera (30 kWth) dell'Indira Gandhi Center for Atomic Research, Kalpakkam
- In corso di sviluppo un reattore da 300 Mwe (AHWR)
- in progettazione un reattore CHTR

Il ciclo Th/U (India)



Conclusioni

Molto probabile che il **nucleare** debba far parte del **mix di fonti energetiche** del futuro.

Reattori attuali presentano alcuni **limiti**, fra cui quelli principali sono la produzione di **scorie** e l'uso inefficiente delle **risorse di uranio**.

Necessario sviluppare **reattori “rivoluzionari”, a ciclo chiuso** (Gen IV), in grado di risolvere molti problemi dei reattori attuali, in particolare quello delle scorie.

Reattori veloci permettono di **“riutilizzare”** (bruciandole) una grossa parte delle scorie radioattive (in particolare attinidi minori quali **Np, Am, Cm**), oltre al Pu.

C'è un grosso sforzo internazionale per lo **studio di fattibilità e progettazione** dei Gen IV, con forze che si stanno via via aggregando (compresa la EC, nel VII FP).

Un'altra possibilità allettante è l'utilizzo del **ciclo di combustibile Th/U**, su cui sta puntando molto l'India.

Lo sviluppo dei nuovi reattori richiede R&D in diversi campi, fra cui anche la Fisica Nucleare.

... continua



**Fare ricerca oggi, per prepararsi
ai bisogni energetici del futuro**

Grazie per l'attenzione