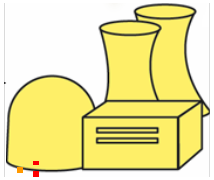
Ciclo del Combustibile
(e Residui Radioattivi)

di
Francesco Troiani

Ciclo del combustibile nucleare

Reattore nucleare ed attività di front-end e back-end

La scelta della generazione elettronucleare è basata su molte **considerazioni strategiche, relative all'intero processo** e non solo al reattore nucleare.



front-end

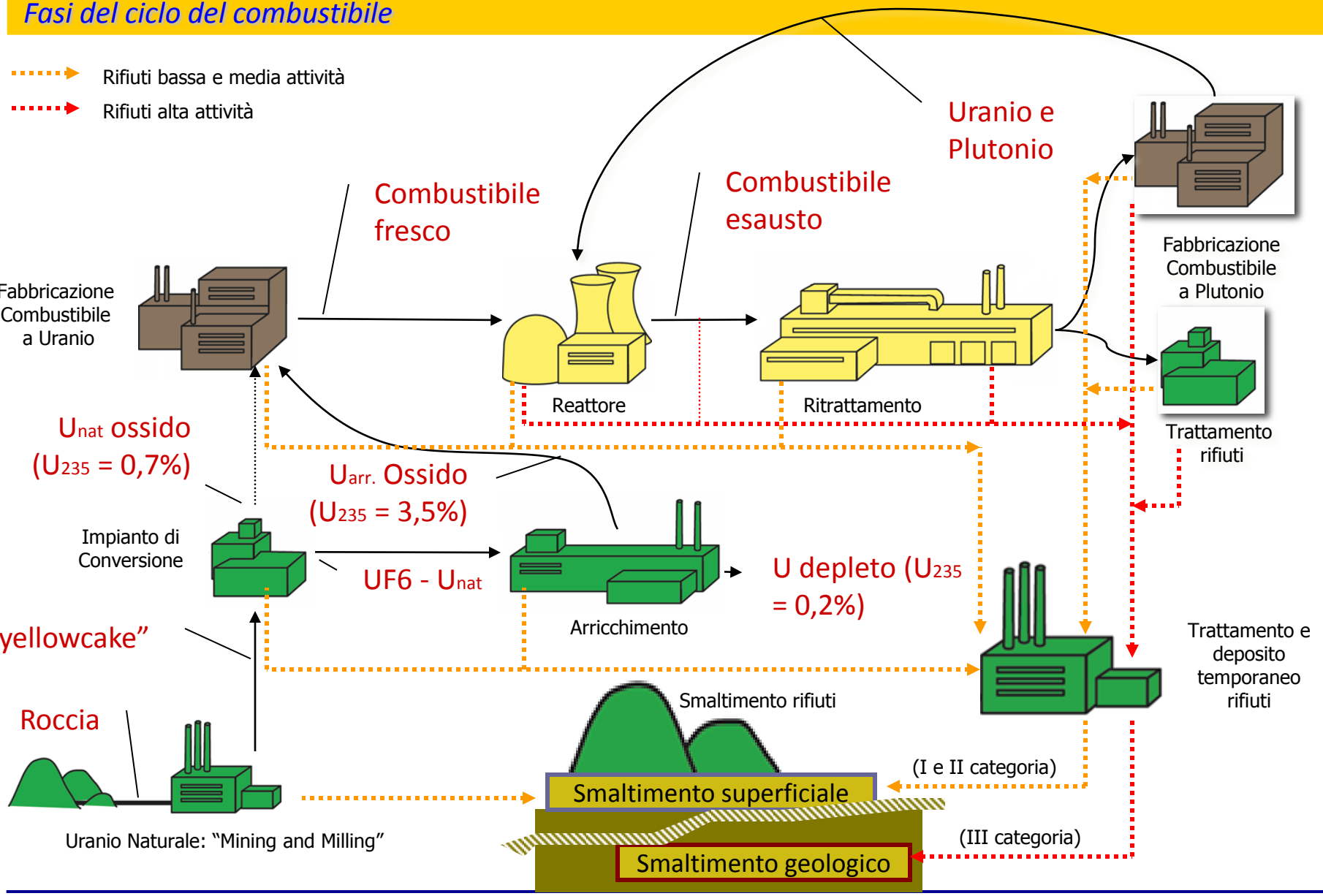
back-end

Il reattore è importante, però per produrre energia ha bisogno di **combustibile**.

Ha bisogno anche di un idoneo sistema di gestione del combustibile esausto e delle **scorie prodotte**.

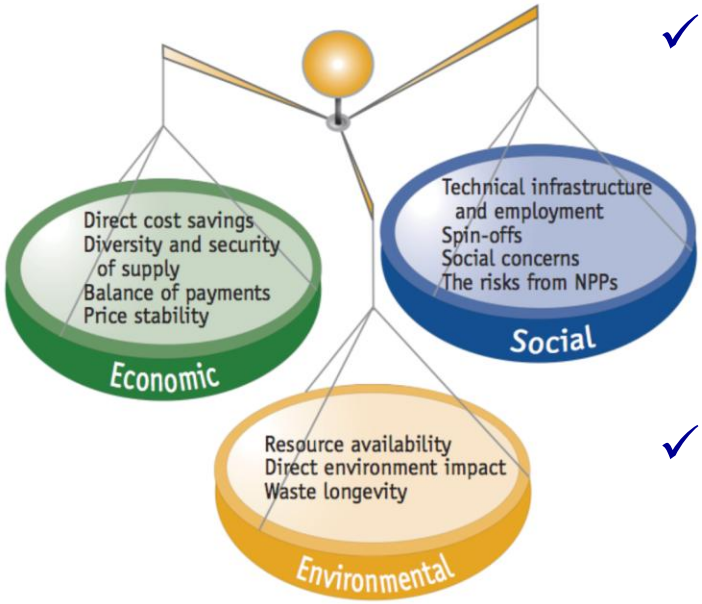
Ciclo del combustibile nucleare

Fasi del ciclo del combustibile



Ciclo del combustibile nucleare

Bilancio dell'energia nucleare



- ✓ Sostenibilità: "soddisfare i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle future generazioni", quindi, **efficiente utilizzo del combustibile,** minimizzazione dei rifiuti e abbattimento dei rifiuti a vita lunga.
- ✓ Sicurezza degli **approvvigionamenti** a lungo termine.
- ✓ Competitività ed **economicità** rispetto ad altre fonti.
- ✓ Riduzione delle **emissioni di gas serra** (27% di CO_2 ha origine dalla produzione di energia elettrica) ed altri gas nocivi alla salute.
- ✓ **Sicurezza** ed affidabilità delle installazioni.
- ✓ Gestione dei **rifiuti radioattivi**.
- ✓ Prevenzione di possibili **usi ostili**.

Ciclo del combustibile nucleare

Disponibilità dell'Uranio

Risorse totali convenzionali (U estratto direttamente): circa **16 milioni di tonnellate** di cui: Risorse identificate: 5,47 milioni tU (< 130 $/Kg).

Risorse stimate: 10,5 milioni tU.

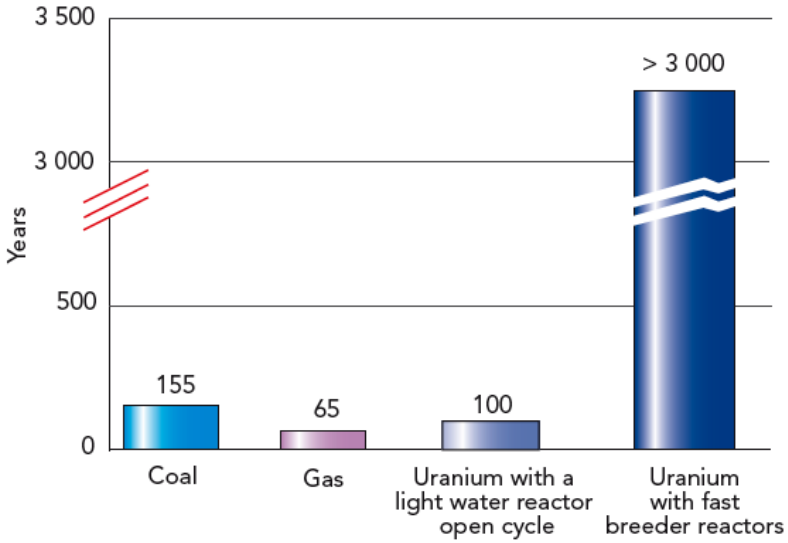
Risorse non-convenzionali (U prodotto secondario): 22 milioni tU.

L'Uranio è più omogeneamente distribuito dei combustibili fossili nelle aree continentali.

Dati *Red Book, 2007*

Durata, al consumo attuale:

- 5,47 MtU: circa 100 anni,
- 16 MtU: circa 300 anni.
- 22 MtU: circa 700 anni.

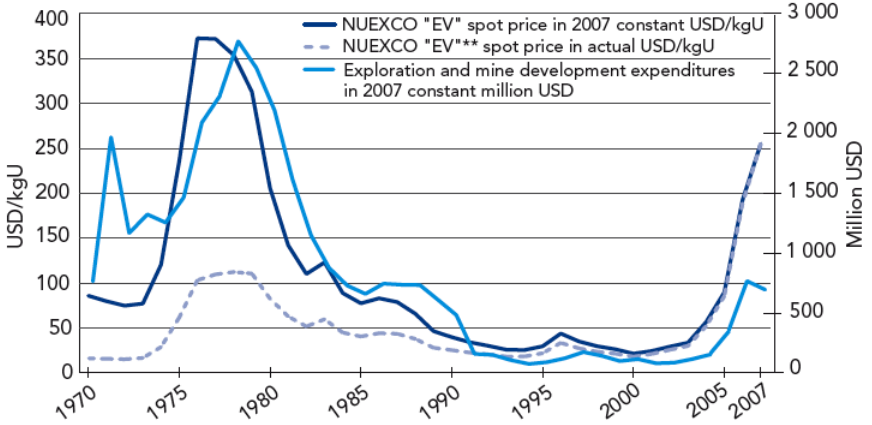


* Uranium resource lifetimes have been calculated using estimated consumption at present nuclear electricity generation rate.

Ciclo del combustibile nucleare

Costo dell'Uranio ed impatto sulla generazione elettrica

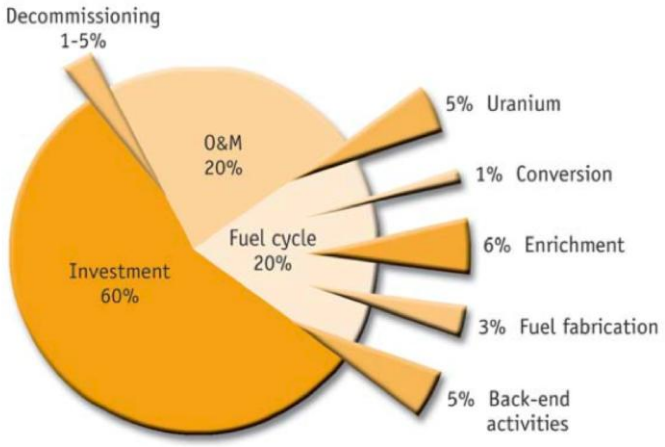
Figure 5.3: Average annual uranium spot price, exploration and mine development expenditures, 1970 to 2007*



* The 2007 exploration and mine development value is an estimate.
** NUEXCO Exchange Value ("EV") spot price data courtesy of TradeTech (www.uranium.info).

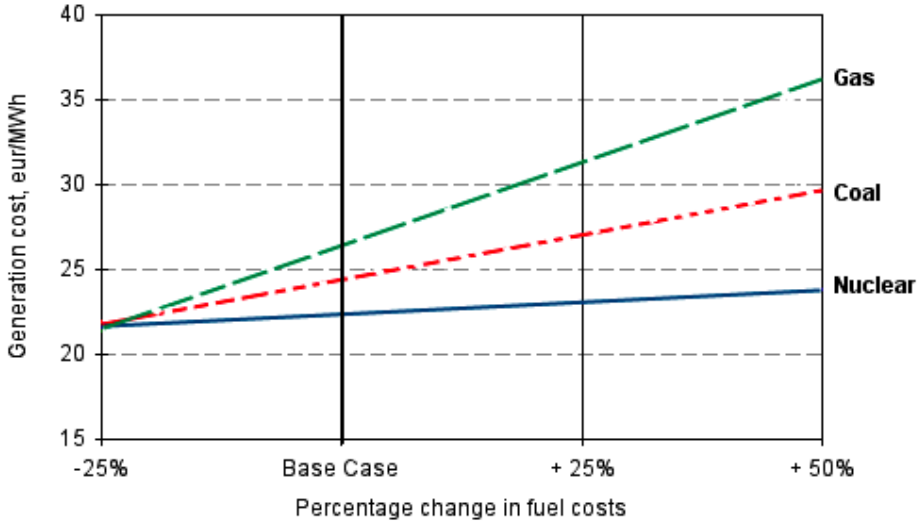
Nowadays price ca.130 USD/kg, from phosphoric 200 USD/kg, from sea water ca. 300 USD/kg

GNEP - Varsavia, 1-10-2009



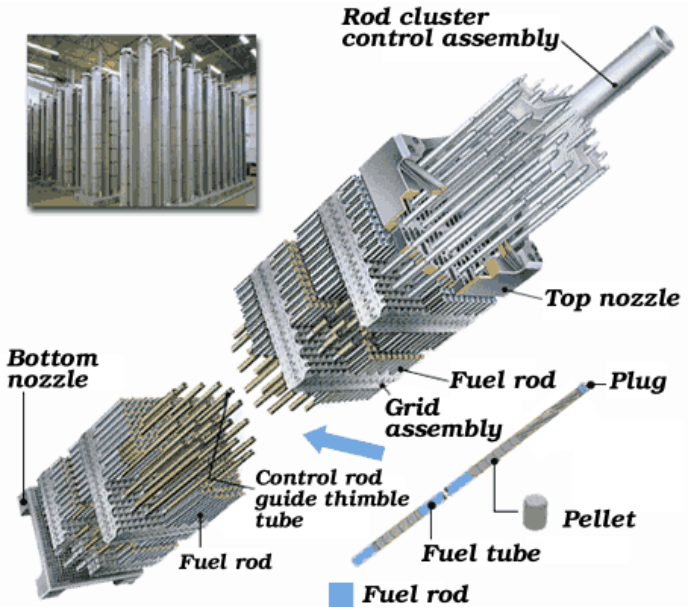
fonte: OECD-NEA

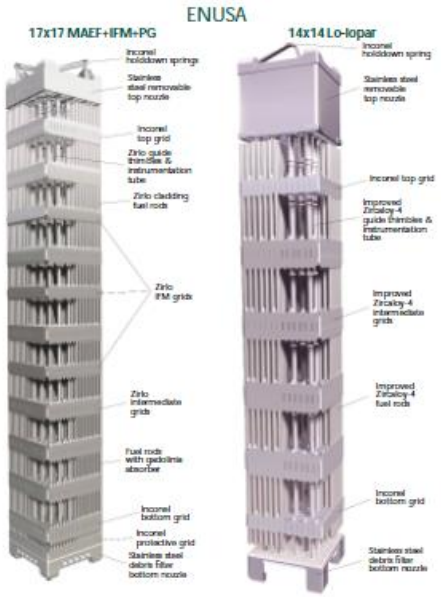
Impatto del costo combustibile sul costo di generazione elettrica (Finlandia 2000)

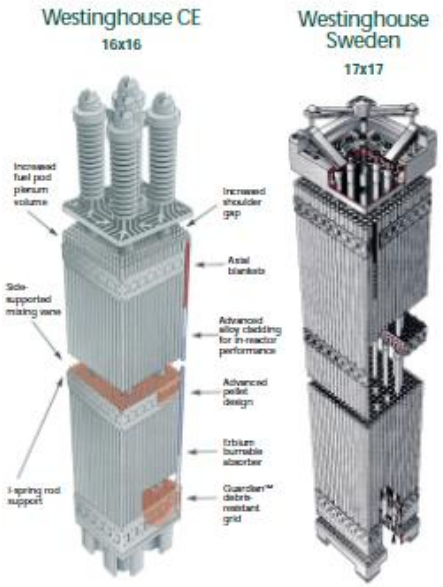


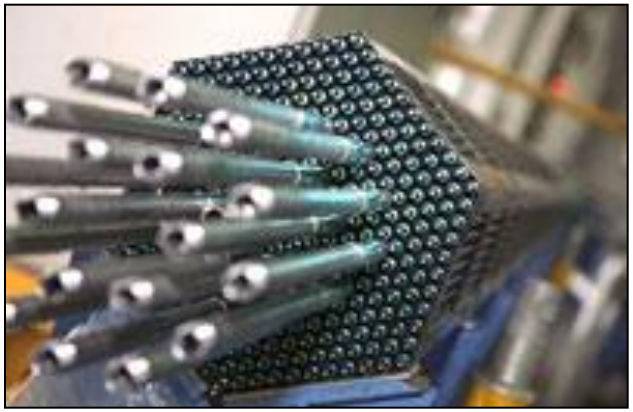
Ciclo del combustibile nucleare

Elementi di combustibile

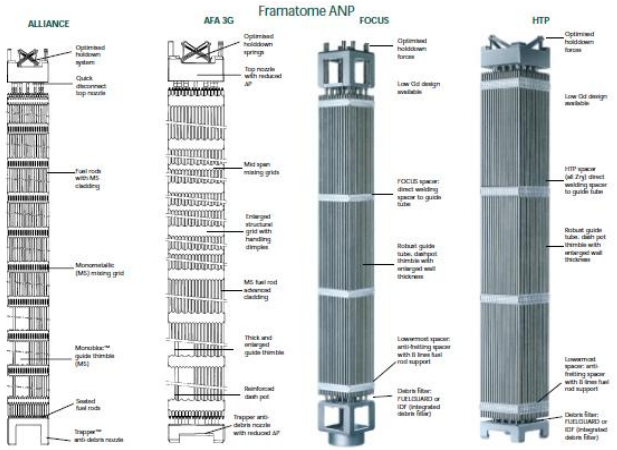








VVER



CANDU

Ciclo del combustibile nucleare

Produzione energia elettrica e generazione di rifiuti

8.000.000 m^3 di metano

16.000 t di CO_2

10.000 t di petrolio

30.000 t di CO_2

1 t di Unat

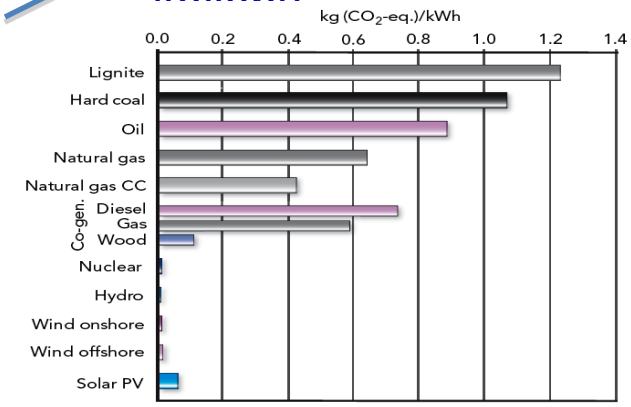
133 Kg spent fuel

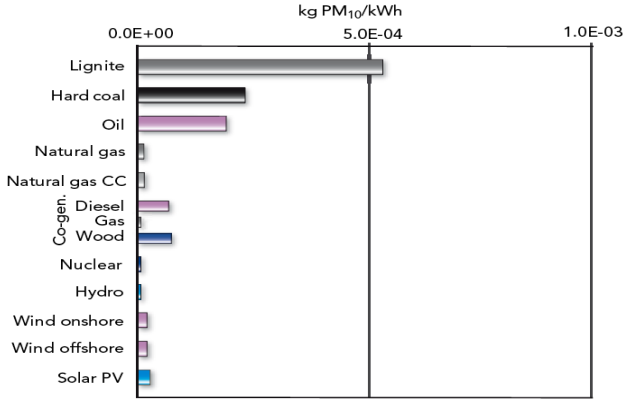
17.000 t di carbone

50.000 t di CO_2

+ da 500 a 3.000 t di ceneri

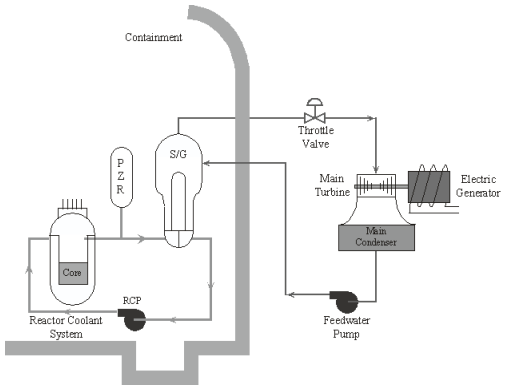
Energia elettrica prodotta:40.000.000 kWh (consumo annuo di 7.000 italiani)





Ciclo del combustibile nucleare

Produzione di energia e di rifiuti radioattivi di esercizio



Un impianto nucleare da 1600 MWe produce in un anno scorie radioattive per un totale di:

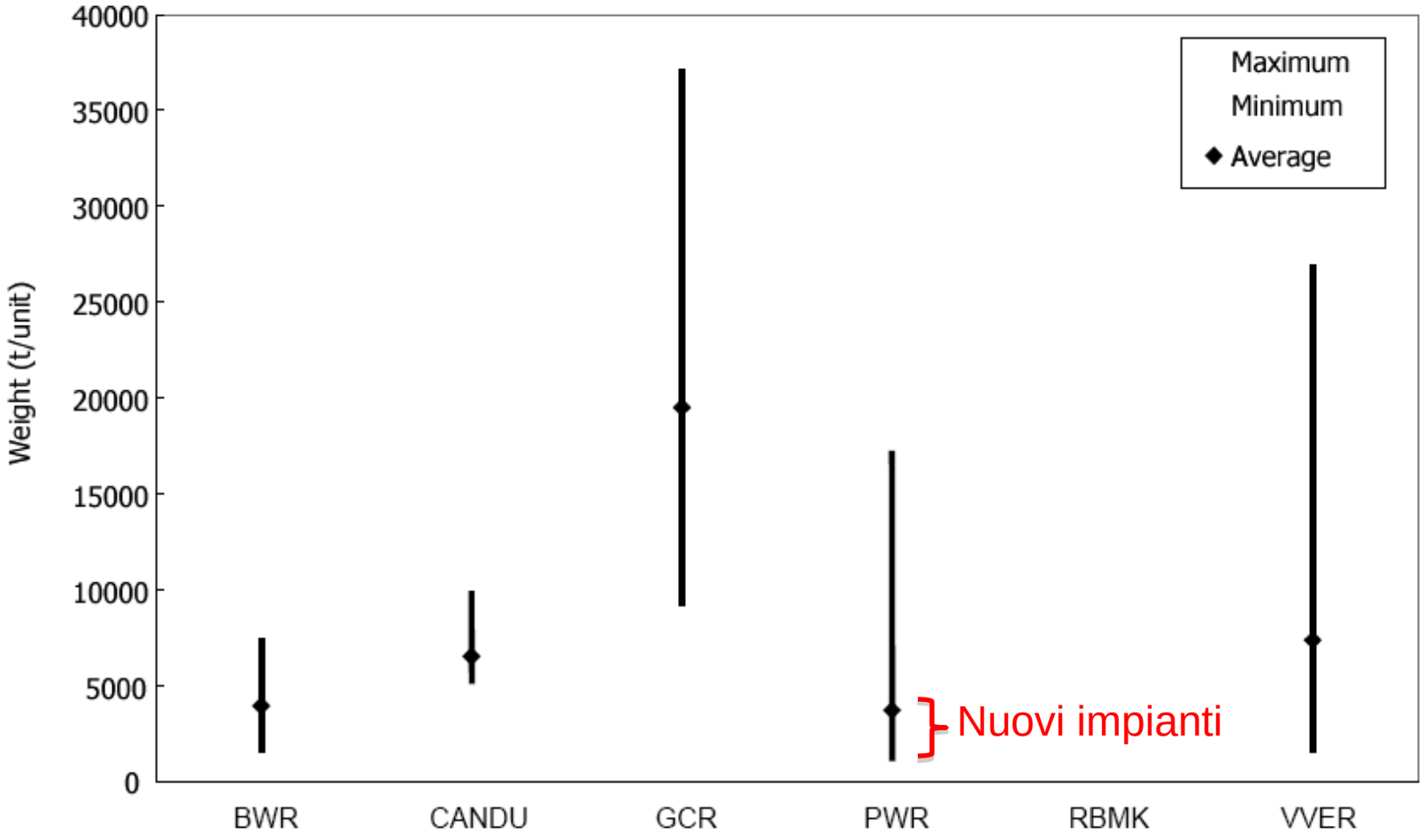
- 500 tonnellate a bassa attività;
- 200 tonnellate a media attività;
- 25 tonnellate ad alta attività.

Un impianto a carbone di pari potenza produce circa 350.000 tonnellate di ceneri.

Stoccaggio del combustibile esausto presso il Thermal Oxide Reprocessing Plant di Sellafield, nel Regno Unito

Ciclo del combustibile nucleare

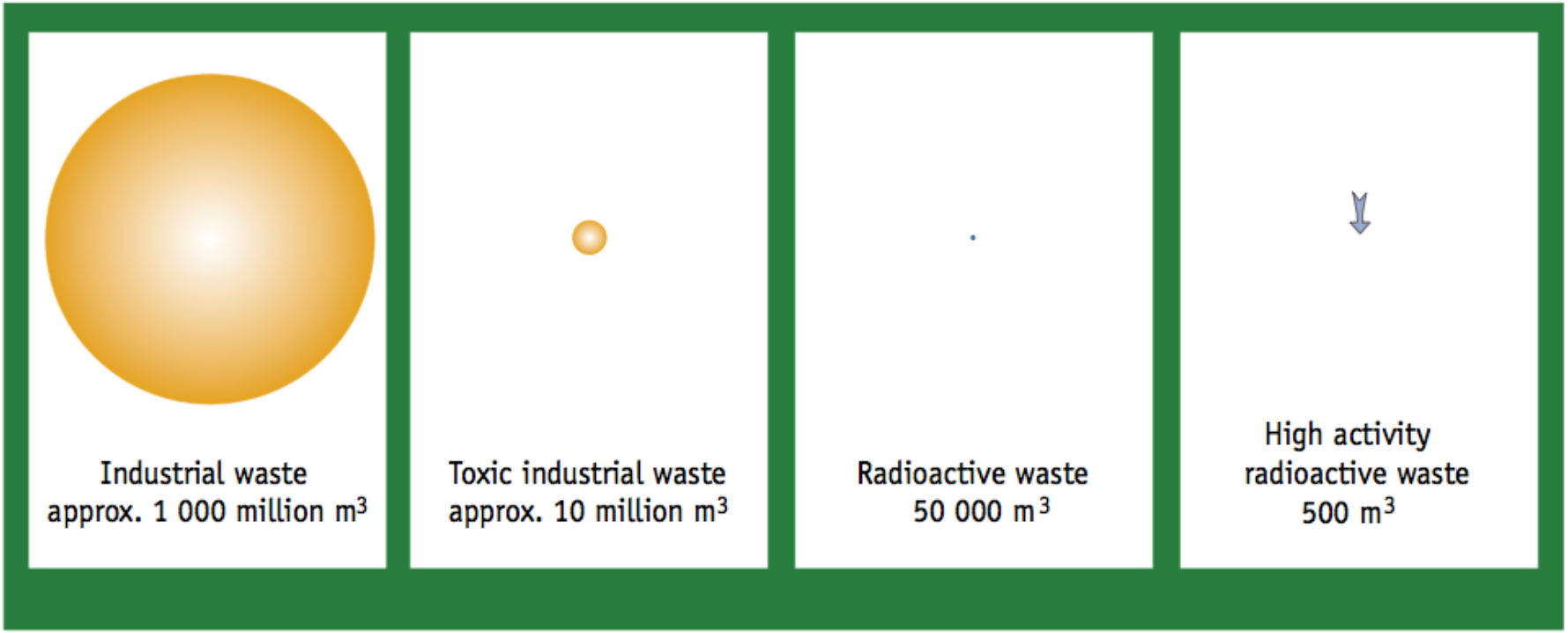
Produzione di rifiuti da smantellamento



fonte: OECD-NEA - 2003

Ciclo del combustibile nucleare

Confronto con la generazione di altri rifiuti industriali (E.C 1998)



Source: *Nuclear and Renewable Energies* (Rome: Accademia Nazionale dei Lincei, 2000), updated with data from the European Commission, *Radioactive Waste Management in the European Union* (Brussels: EC, 1998).

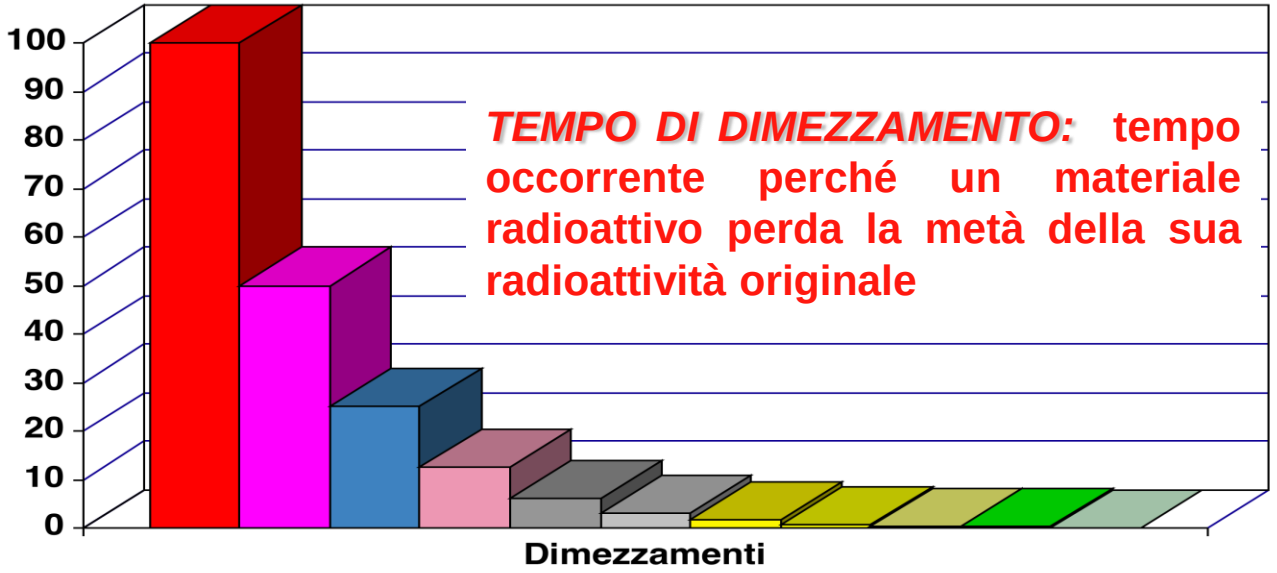
Per Persona

2,5 m^3	25 litri	100 cm^3	1 cm^3

Ciclo del combustibile nucleare

Isolamento dalla biosfera dei rifiuti radioattivi

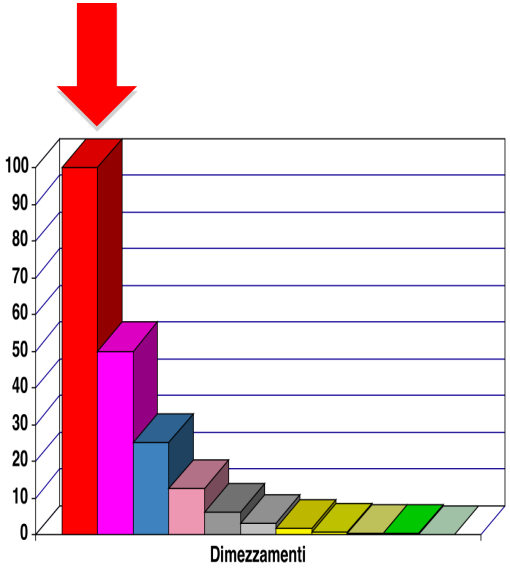
Per prevenire il rilascio della radioattività nell'ambiente, i rifiuti radioattivi sono **confinati all'interno di un adeguato numero di barriere** artificiali e naturali, che devono mantenersi efficienti per tutto il tempo necessario affinché la radioattività, mediante il fenomeno del **decadimento radioattivo**, non raggiunga valori comparabili con quelli del fondo naturale ambientale.



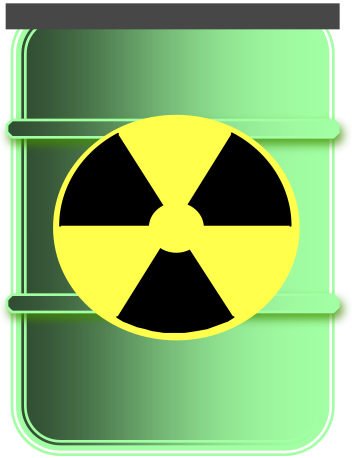
TEMPO DI DIMEZZAMENTO: **tempo occorrente perché un materiale radioattivo perda la metà della sua radioattività originale**

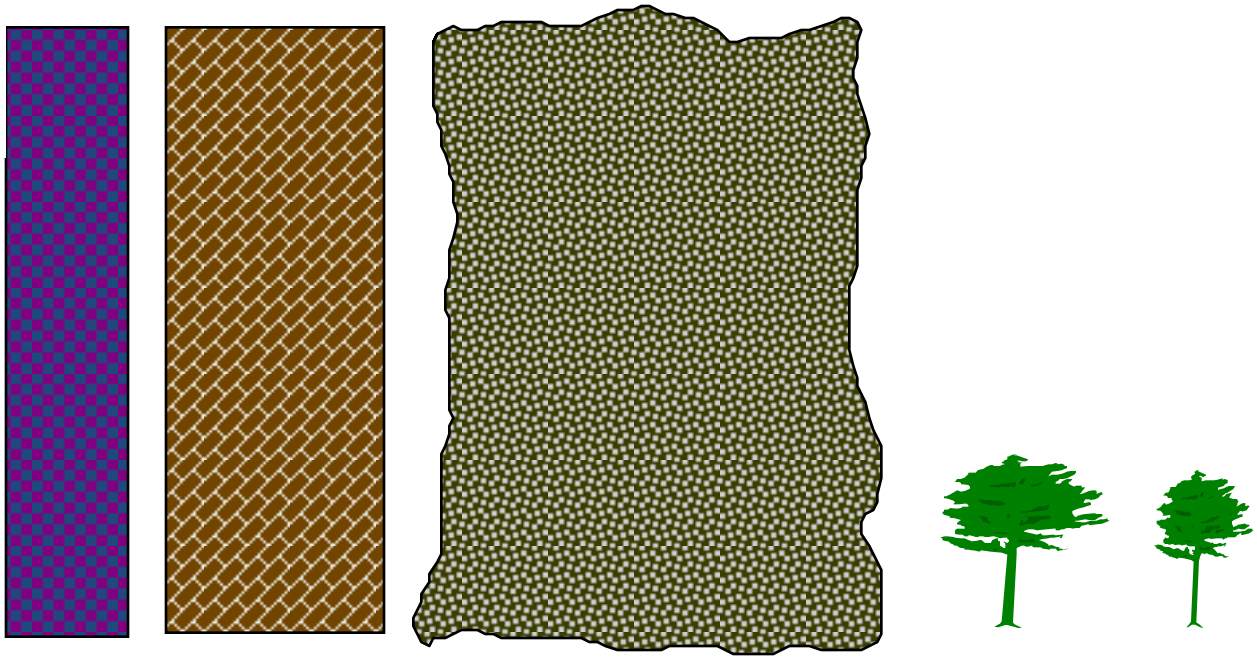
Ciclo del combustibile nucleare

Smaltimento rifiuti radioattivi - Sistema multibarriera



Il deposito di smaltimento finale dovrà essere composto da una serie di barriere (artificiali e/o naturali) coerentemente con la **radioattività da confinare**

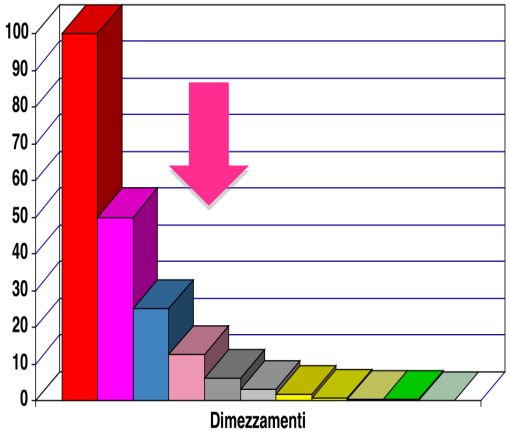


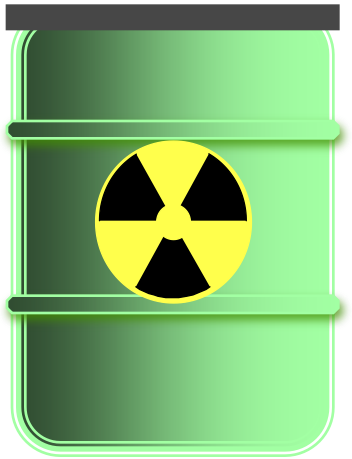


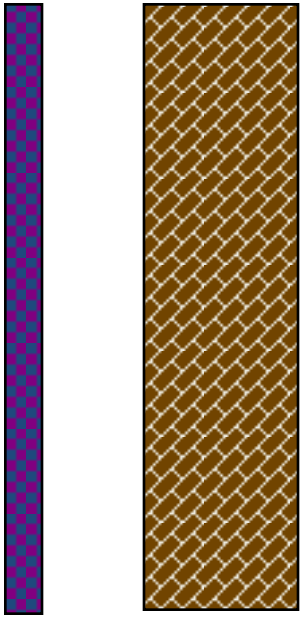
Ciclo del combustibile nucleare

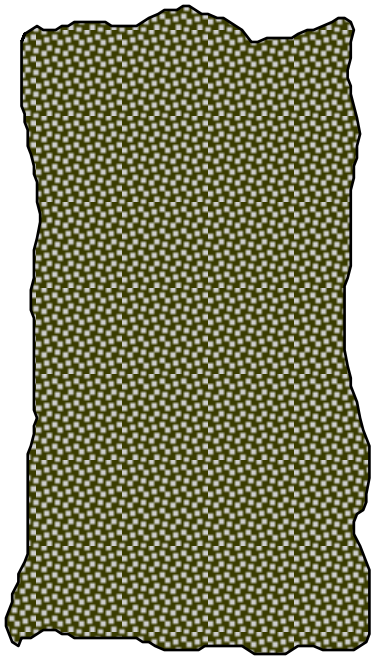
Processo di decadimento radioattivo

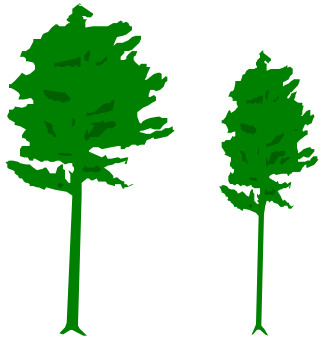
Nel tempo, le barriere diventeranno sempre meno efficienti …..







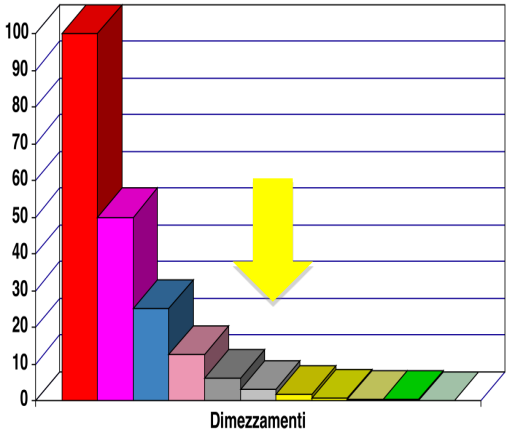


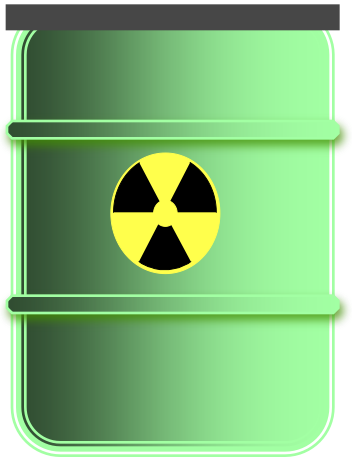


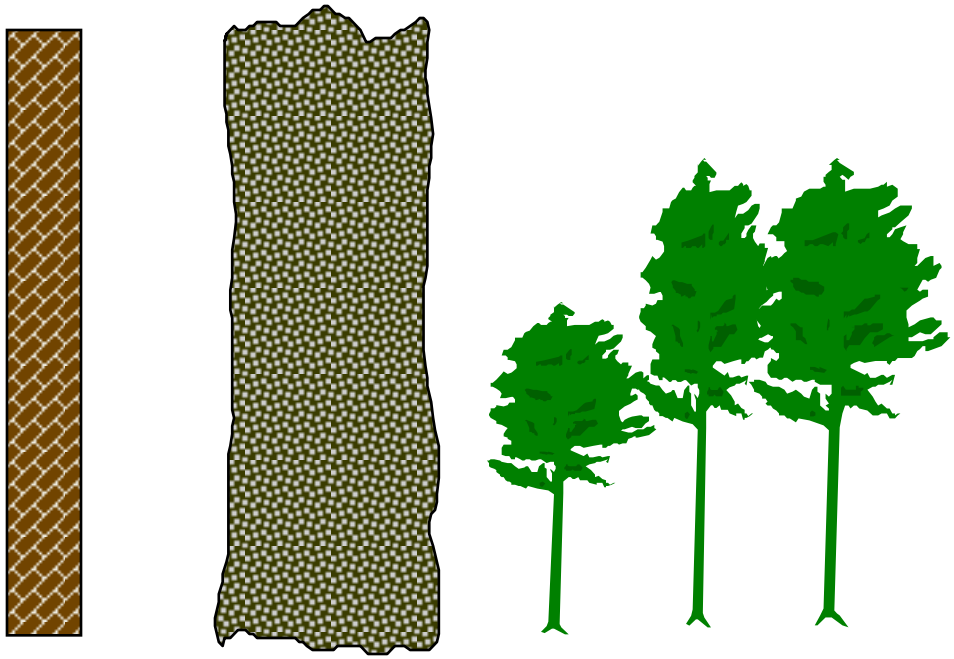
Ciclo del combustibile nucleare

Processo di decadimento radioattivo

…ma, al tempo stesso, il decadimento radioattivo ridurrà le necessità di confinamento….



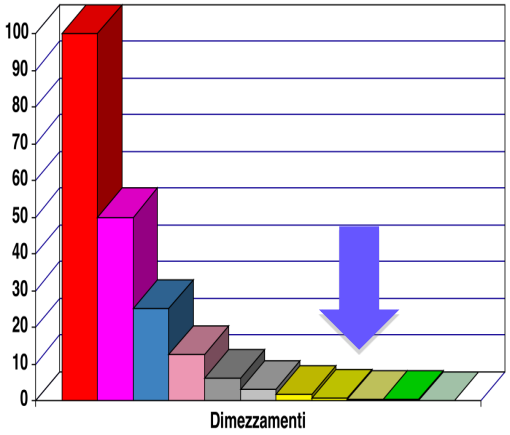


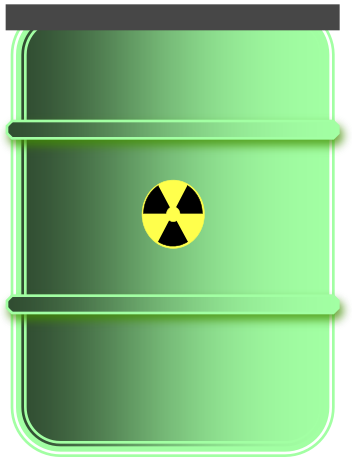


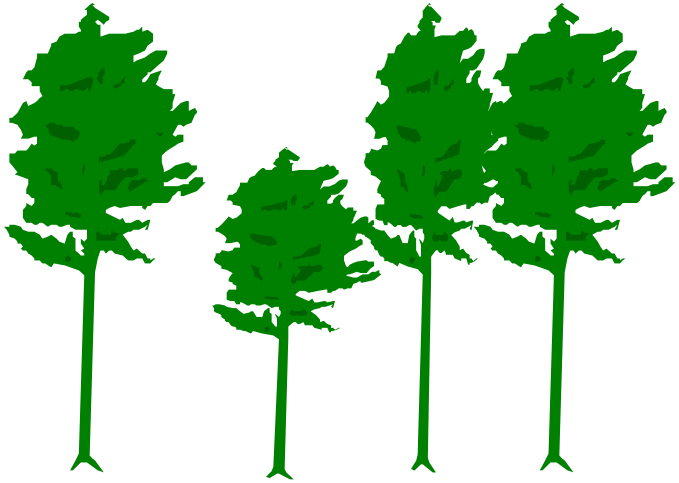
Ciclo del combustibile nucleare

Processo di decadimento radioattivo

… fino a quando il livello di radioattività dei rifiuti …



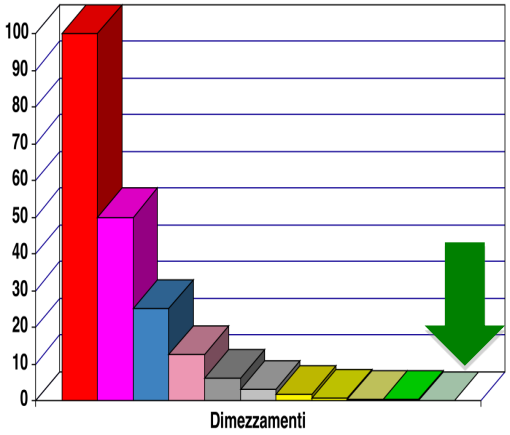




Ciclo del combustibile nucleare

Processo di decadimento radioattivo

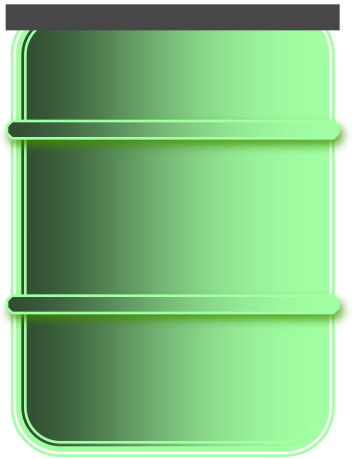
… che entrano in contatto con la biosfera sarà ad un **livello comparabile con quello del fondo naturale**.

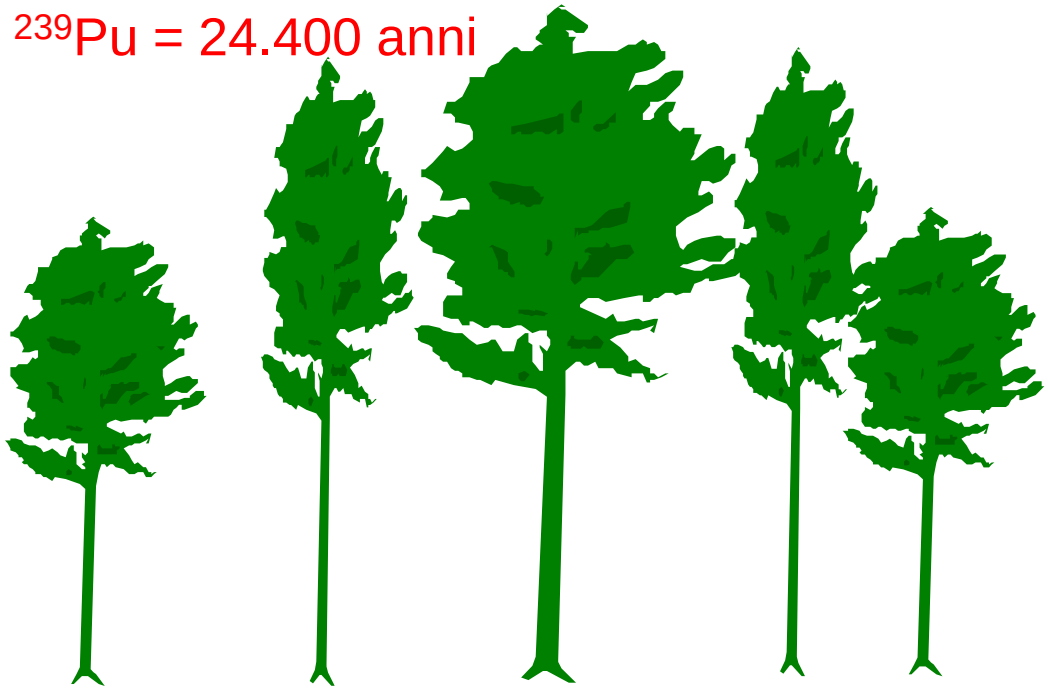


Esempi di Tempi di dimezzamento:

(PdF) ^{137}Cs = 30 anni

(Attinidi) ^{239}Pu = 24.400 anni

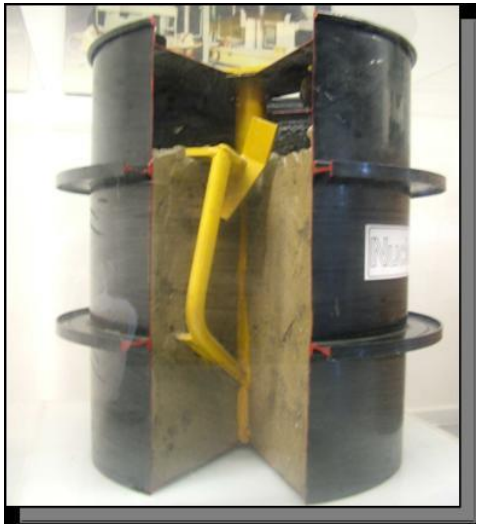




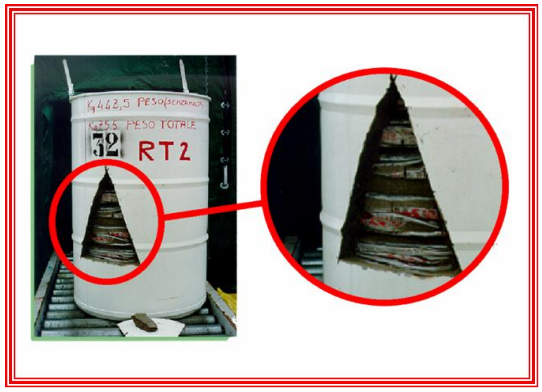
Ciclo del combustibile nucleare

Condizionamento

In-drum mixer (NUKEM)



In-drum mixer in Nucleco per rifiuti liquidi

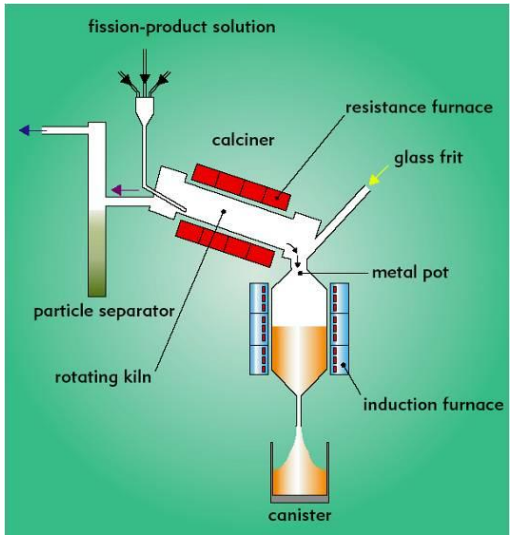


Nucleco: condizionamento rifiuti solidi

Ciclo del combustibile nucleare

Vetrificazione rifiuti ad alta attività e lunga vita

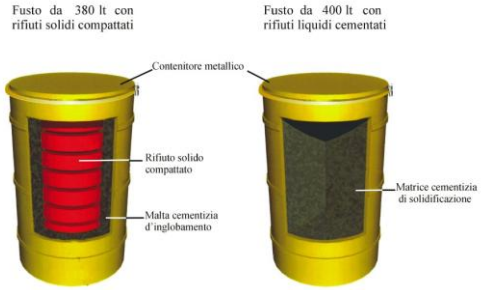
HLLW



H = 1.3 m
ø = 0.4 m

Ciclo del combustibile nucleare

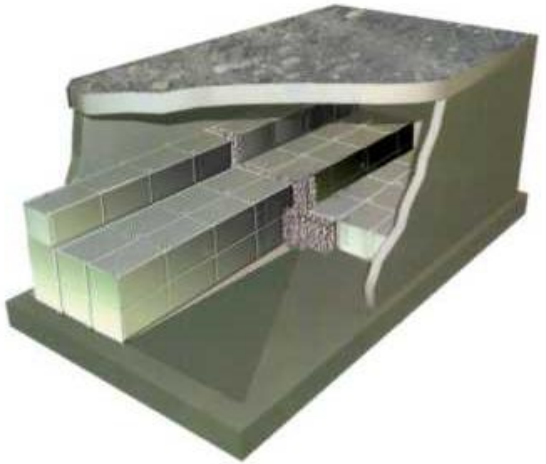
Smaltimento superficiale dei rifiuti di II categoria (breve vita)



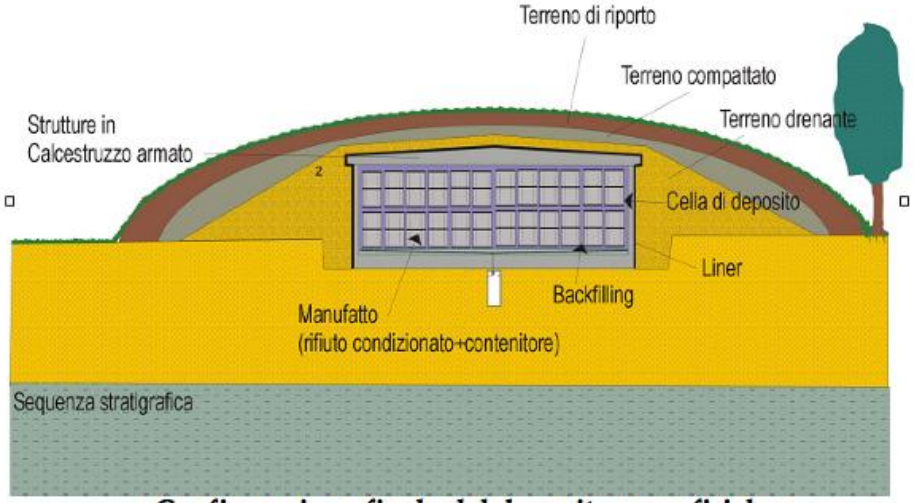
Condizionamento

Caratterizzazione e inventario

Modulo di isolamento



Cella di smaltimento



Configurazione finale del deposito superficiale

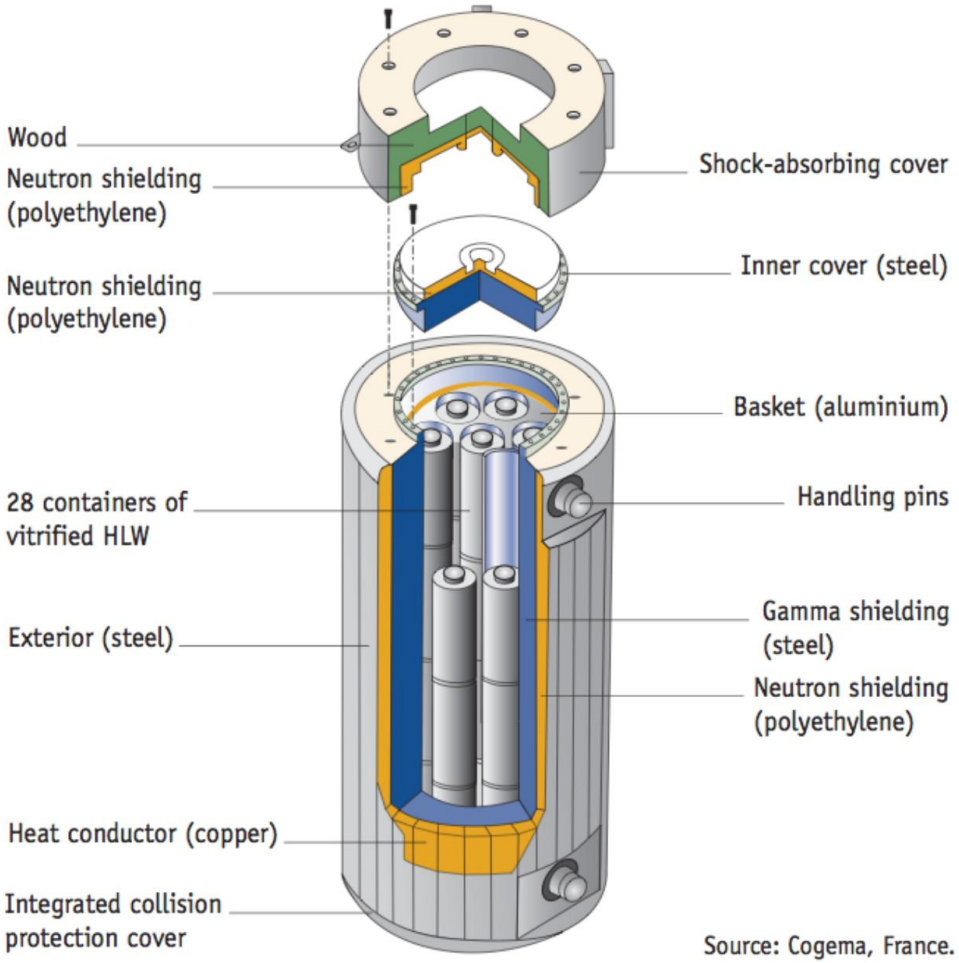
Ciclo del combustibile nucleare

Esempi di Smaltimento superficiale

Ciclo del combustibile nucleare

Incapsulamento rifiuti e combustibili esausti

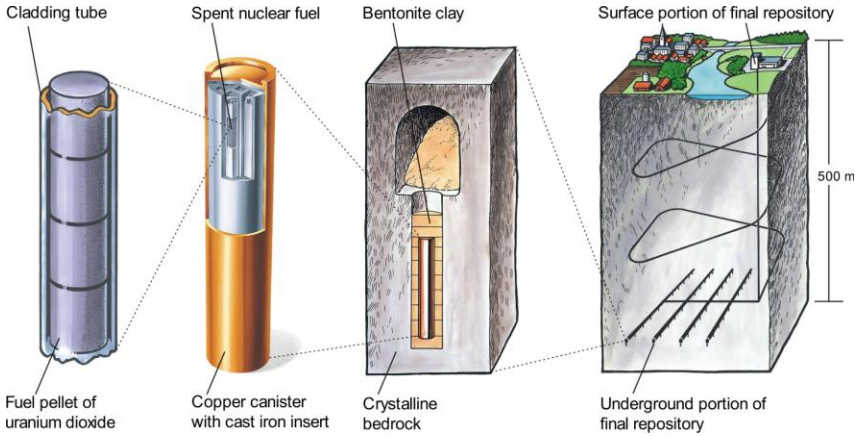
Figure 4.5: A typical HLW transport cask



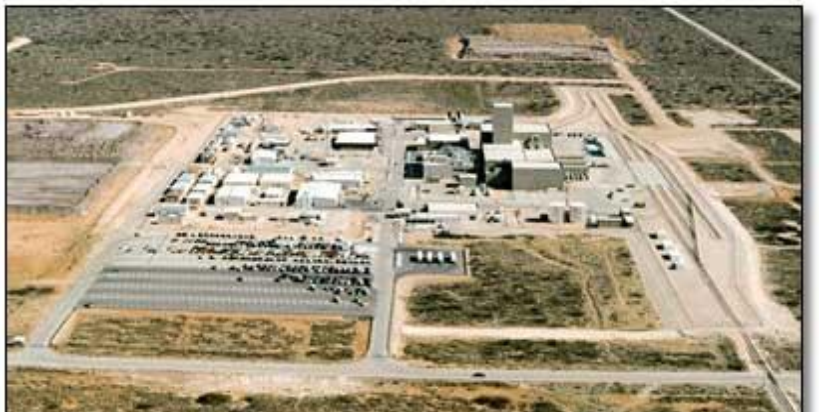
Source: Cogema, France.

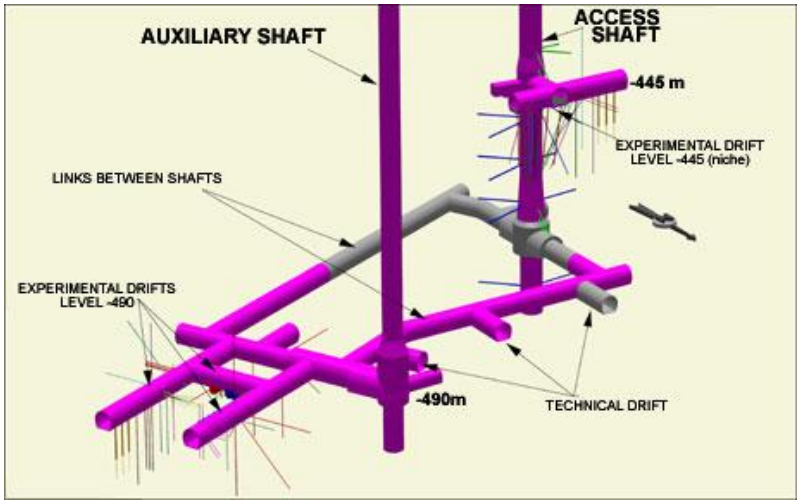
Ciclo del combustibile nucleare

Smaltimento geologico dei rifiuti di III categoria (lunga vita)



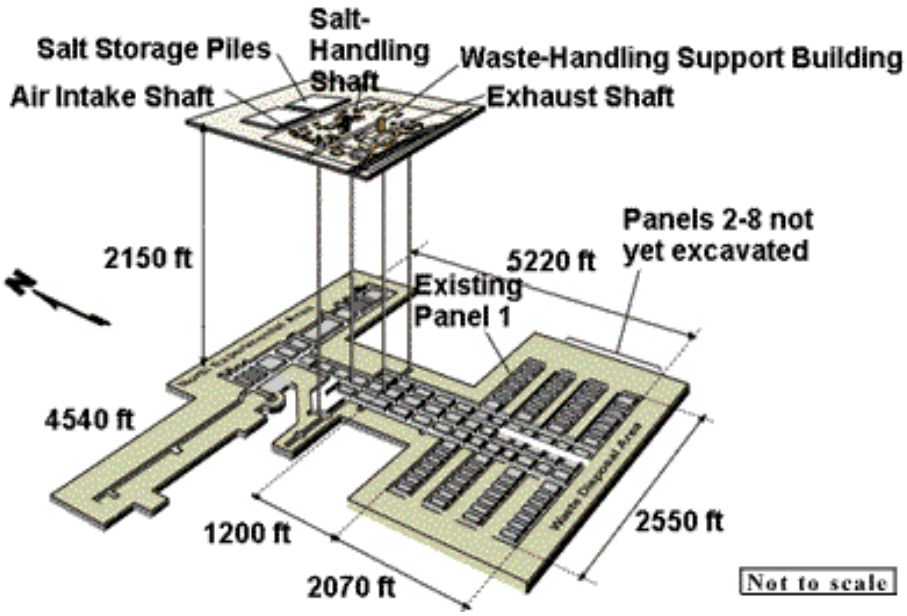
Forsmark, Svezia





Haute-Marne, Francia

Strato di argilla a 500 m, in fase di studio



WIPP, USA: Waste Isolation Pilot Plant

Ciclo del combustibile nucleare

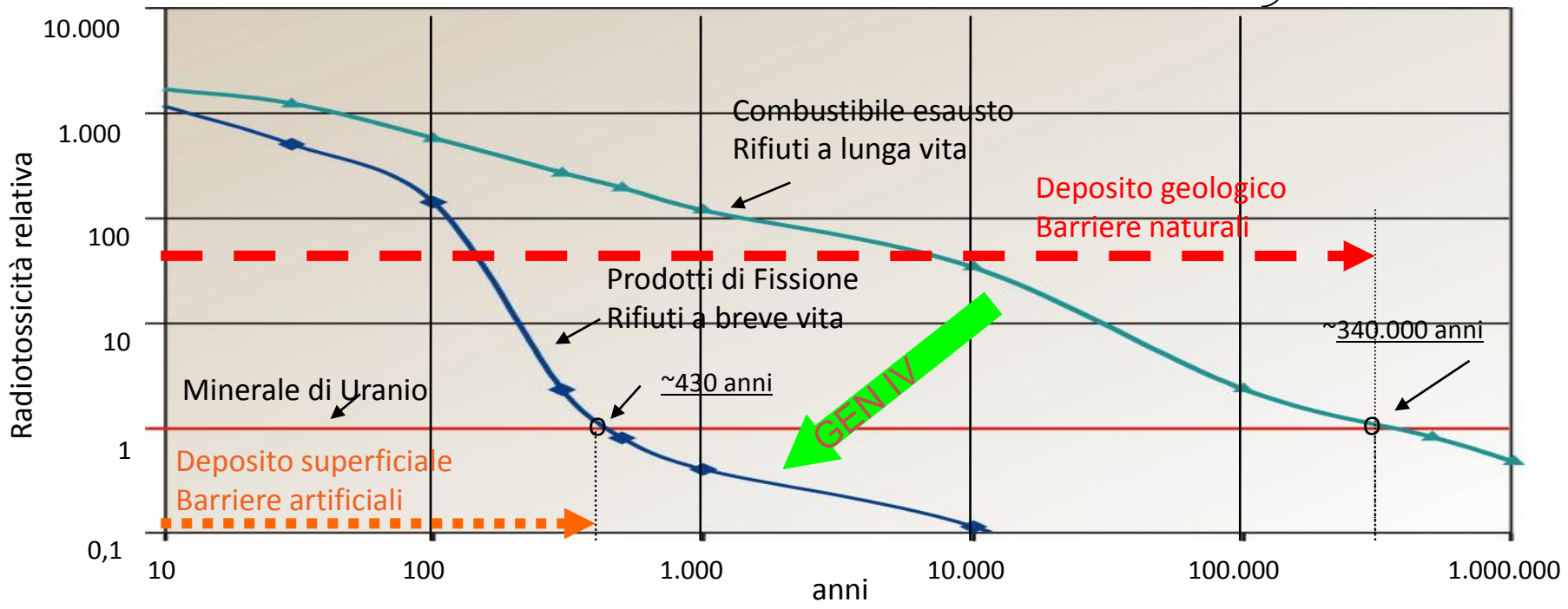
Verso le nuove generazioni

Tipica composizione isotopica del combustibile "esausto" delle centrali nucleari di attuale generazione:

	Carico	Scarico
^{238}U	96,5%	94%
^{235}U	3,5%	1%

Pu e Attinidi	**1,0%**
Prodotti di Fissione	3,5%
Altro	0,5%

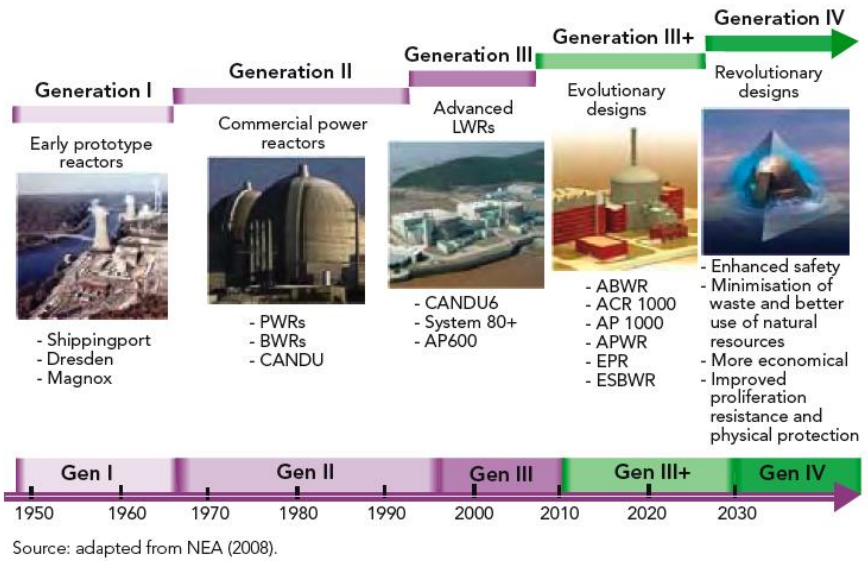
} SCORIE

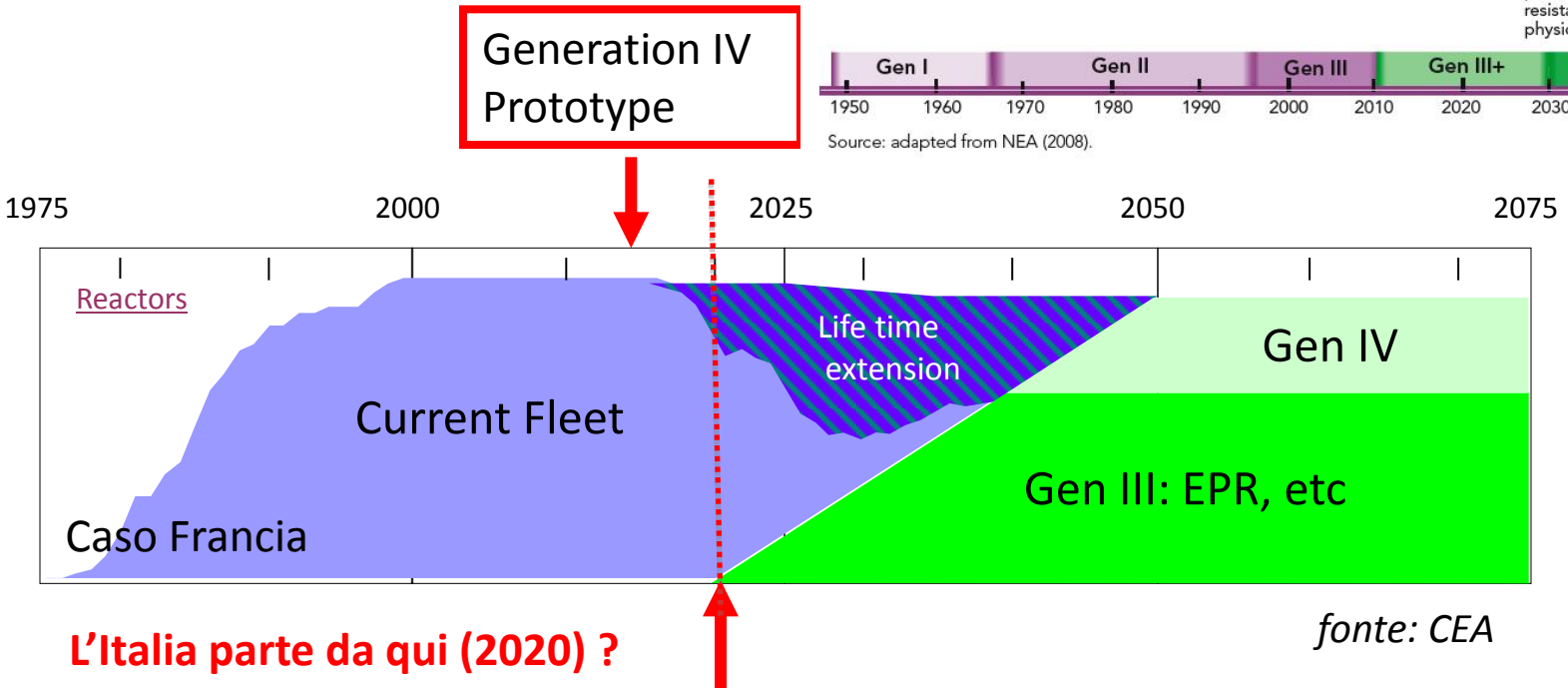


Ciclo del combustibile nucleare

Generazione IV

I reattori veloci di IV generazione saranno in grado di "bruciare" la maggior parte degli Attinidi Minori, ottimizzando l'uso del combustibile e riducendo la produzione di rifiuti a lunga vita.





fonte: CEA

Ciclo del combustibile nucleare

Conclusioni

Gli impianti di fabbricazione, di stoccaggio e trattamento del combustibile nucleare sono **strategici** per la gestione della produzione elettronucleare.

L'Italia può presentarsi sul mercato mondiale come semplice acquirente di combustibile, oppure **sviluppare una capacità industriale propria**, con grossi investimenti e in sinergia con partner internazionali o comunitari.

La filiera del ciclo del combustibile nucleare è composta prevalentemente da **tecnologie e lavoro**, quindi può essere considerata una **"risorsa energetica interna"** che non grava sulla bilancia import/export e può contribuire alla **crescita del Prodotto Interno Lordo**.

Grazie dell'attenzione