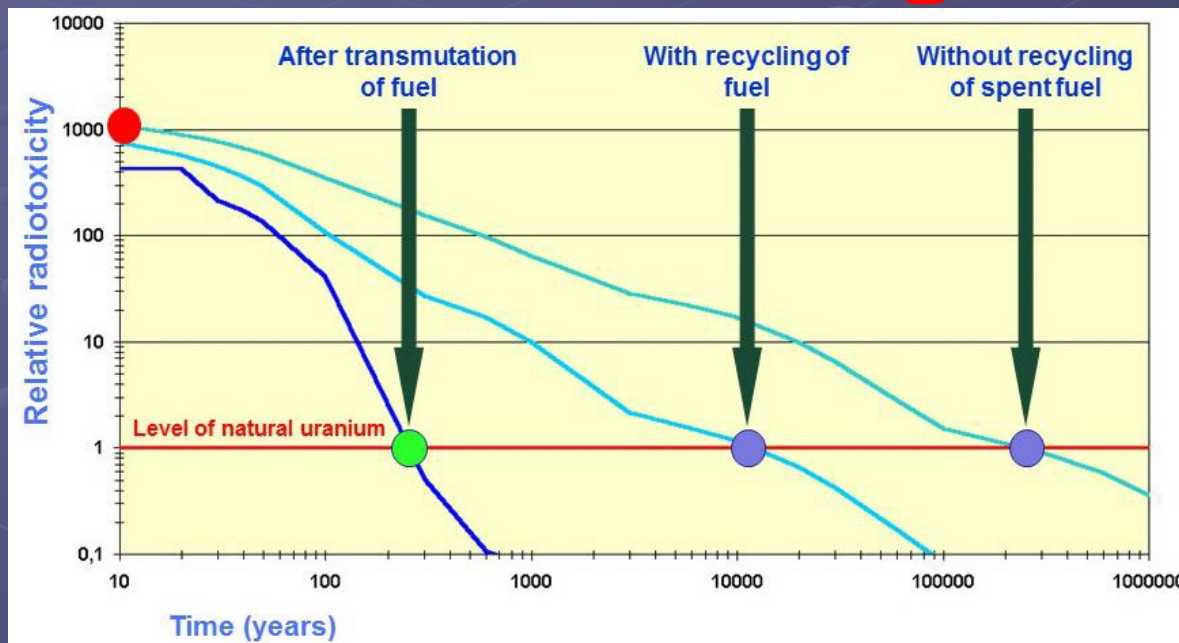


Incenerimento dei rifiuti radioattivi a vita media lunga



Dr. Ing. Guglielmo Lomonaco

email: guglielmo.lomonaco@unige.it



RIFIUTI NUCLEARI

Confronto fra strategie di varie nazioni

FRANCIA

- 3 depositi superficiali
- Studio per il deposito geologico a Bure
- Realizzazione del deposito geologico nel 2025

FINLANDIA

- Rifiuti gestiti direttamente da esercenti e produttori
- 3 depositi sotterranei in granito presso i 3 siti nucleari
- Studi a Olkiluoto per il deposito geologico entro il 2020

USA

- 3 depositi superficiali
- Deposito geologico per rifiuti militari (WIPP)
- Deposito geologico (a Yucca Mountain?) nel ?

Identificazione del deposito geologico con opzione di reversibilità



Depositi definitivi

Depositi definitivi per materiali a **bassa e media attività** (il 95% dei materiali radioattivi prodotti negli impianti nucleari) sono già in esercizio in quasi tutti i paesi industriali



Forsmark (Svezia)



Oskarshamn (Svezia)



Gorleben (Germania)



Konrad (Germania)



Morsleben (Germania)



Yucca Mountain (USA)



WIPP (USA)



La Manche (Francia)



L'Aube (Francia)
Guglielmo Lomonaco



El Cabril (Spagna)



Drigg (Regno Unito)



Centro Ricerche di Cape La Hague



Un centro ricerche nucleari di avanguardia ed un eccellente polo industriale di settore



E' necessario che l'opinione pubblica recepisca l'idea che il deposito definitivo delle scorie radioattive non è una discarica nucleare, ma un impianto tecnologico avanzato e come tale va progettato e gestito

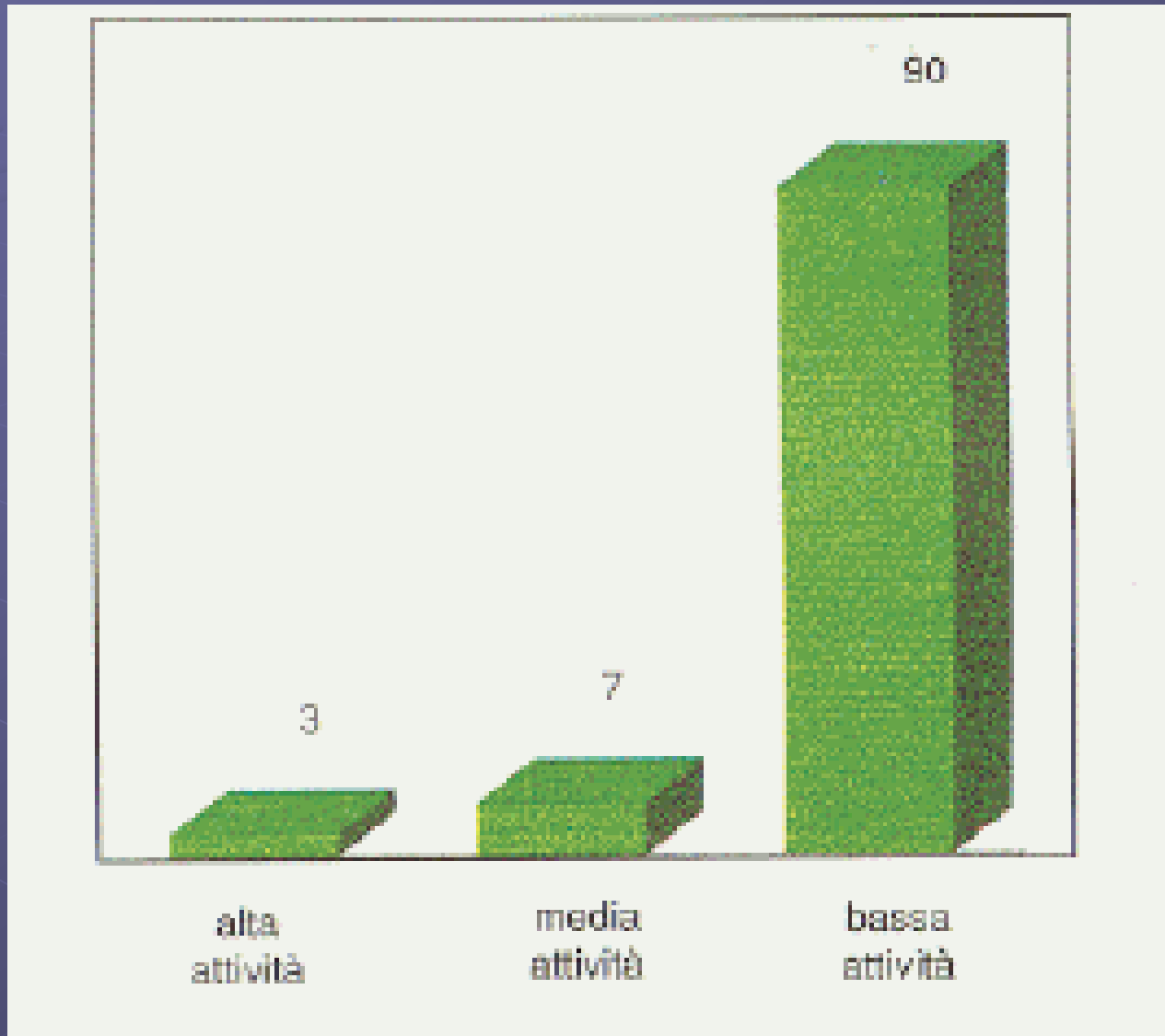


Il nucleare possibile (Finlandia): sistema completo e accettabilità sociale





Composizione delle scorie





Rifiuti nucleari per tipologia

■ Low-Level Waste (LLW)

- 90% volume, 1% radioattività

■ Intermediate-Level Waste (ILW)

- 7% volume, 4% radioattività

■ High-Level Waste (HLW)

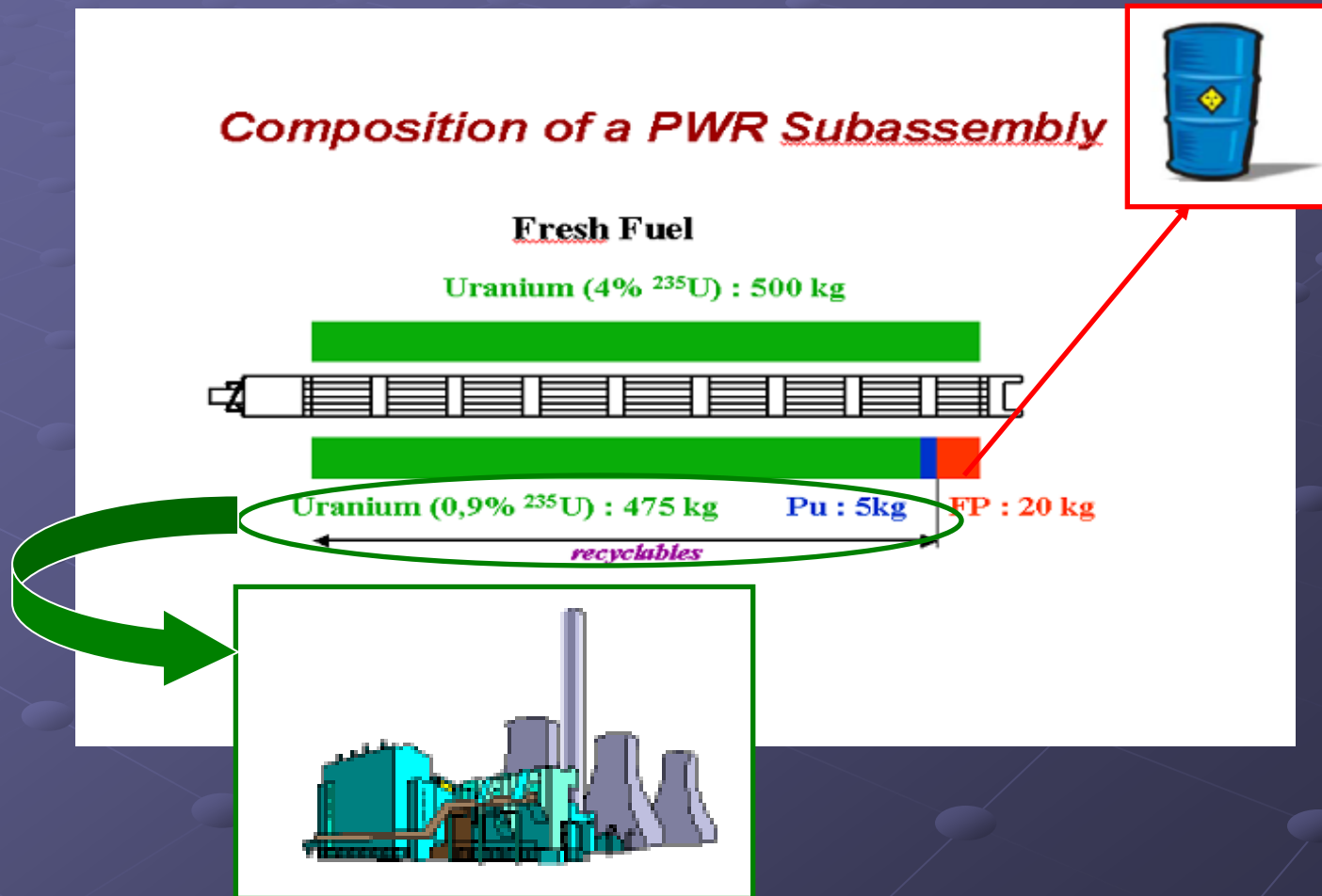
- 3% volume, 95% radioattività

■ Centrale nucleare da 1000 MW_e, produce:

- 90 m³ LLW/y
- 7 m³ ILW/y
- 3 m³ HLW/y

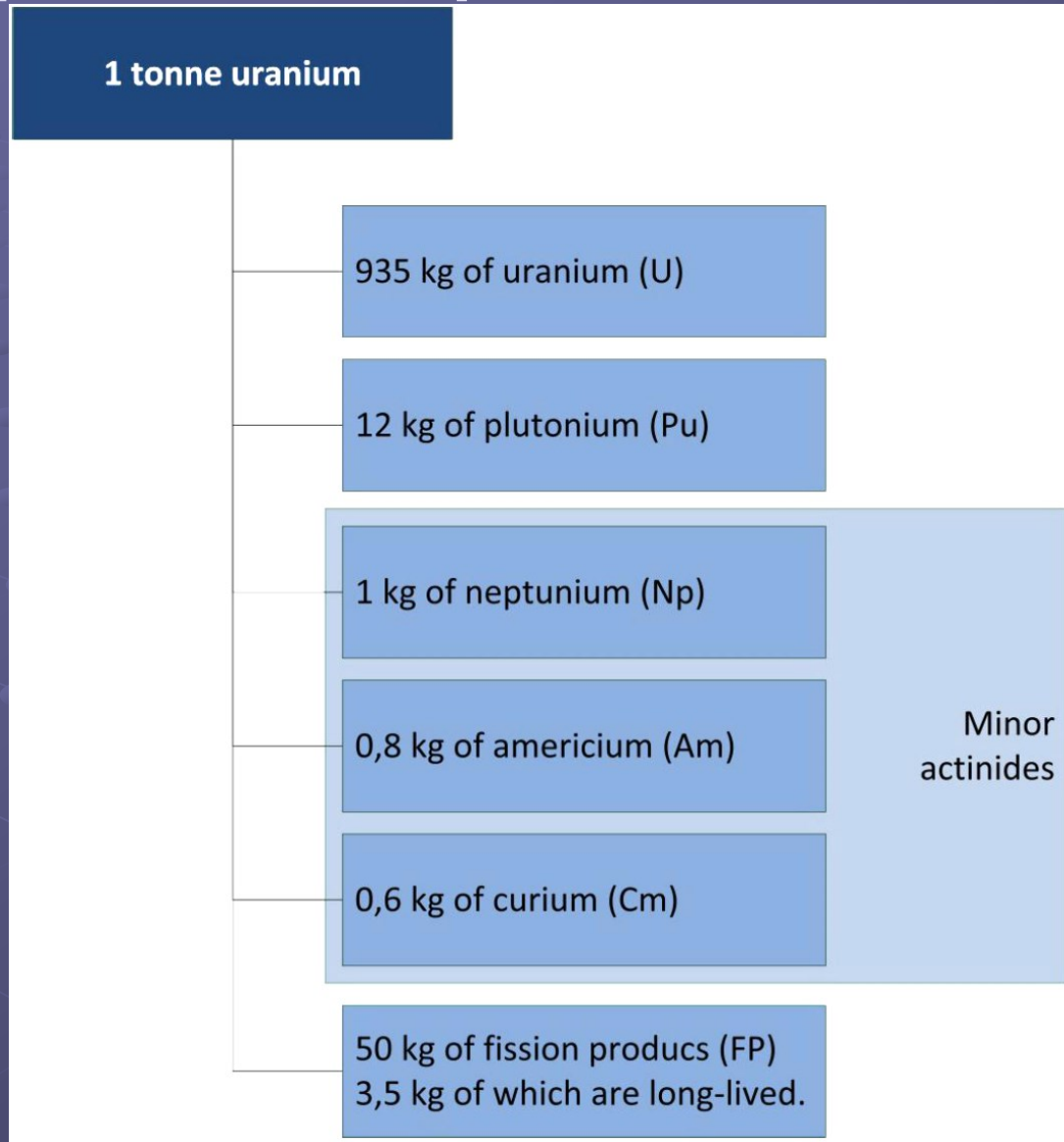


Le scorie nucleari: tutte “scorie”?





Tipica composizione HLW



Quale ciclo del combustibile?



- stoccaggio diretto del combustibile usato (direct disposal)
- ciclo »chiuso» (closed cycle)



Fuel Cycle Options for Countries with Large-scale Nuclear Power Program (>20 GWe)

Country	Number of NPPs*	Installed Capacity (GWe) *	Current Policy	Future Options
USA	103	97.5	Direct Disposal	Proliferation-resistant closed cycle (R&D under AFCI)
France	59	63.5	Closed Cycle	Closed cycle with FBR
Japan	52	46.3	Closed Cycle	Closed cycle with FBR
Germany	19	22.4	Nuclear phase-out	-
Russia	30	21.7	Closed Cycle	Closed cycle with FBR
South Korea	19	16.8 (26.1 by 2015)	Direct Disposal	DUPIC cycle (Study on FR is also in progress)
China	9	6.6 (32- 36 by 2020)	Closed Cycle	Closed cycle with FBR
India	14	2.5 (20.9 by 2020)	Closed Cycle	Closed U/Pu cycle with FBR or thorium cycle with AHWR

* As of end of 2004 12



Svantaggi direct disposal



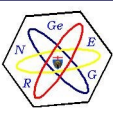
Three fundamental problems in direct disposal option

- **Extremely low uranium utilization efficiency (<1%)**
- **Need for larger HLW repository space due to larger volume and larger heat load of waste packages**
- **Formation of plutonium mines**
 - More than 8,000 tons of Pu will be buried by 2100
 - 100 years later, access becomes easier, and plutonium properties become more attractive for weapon use

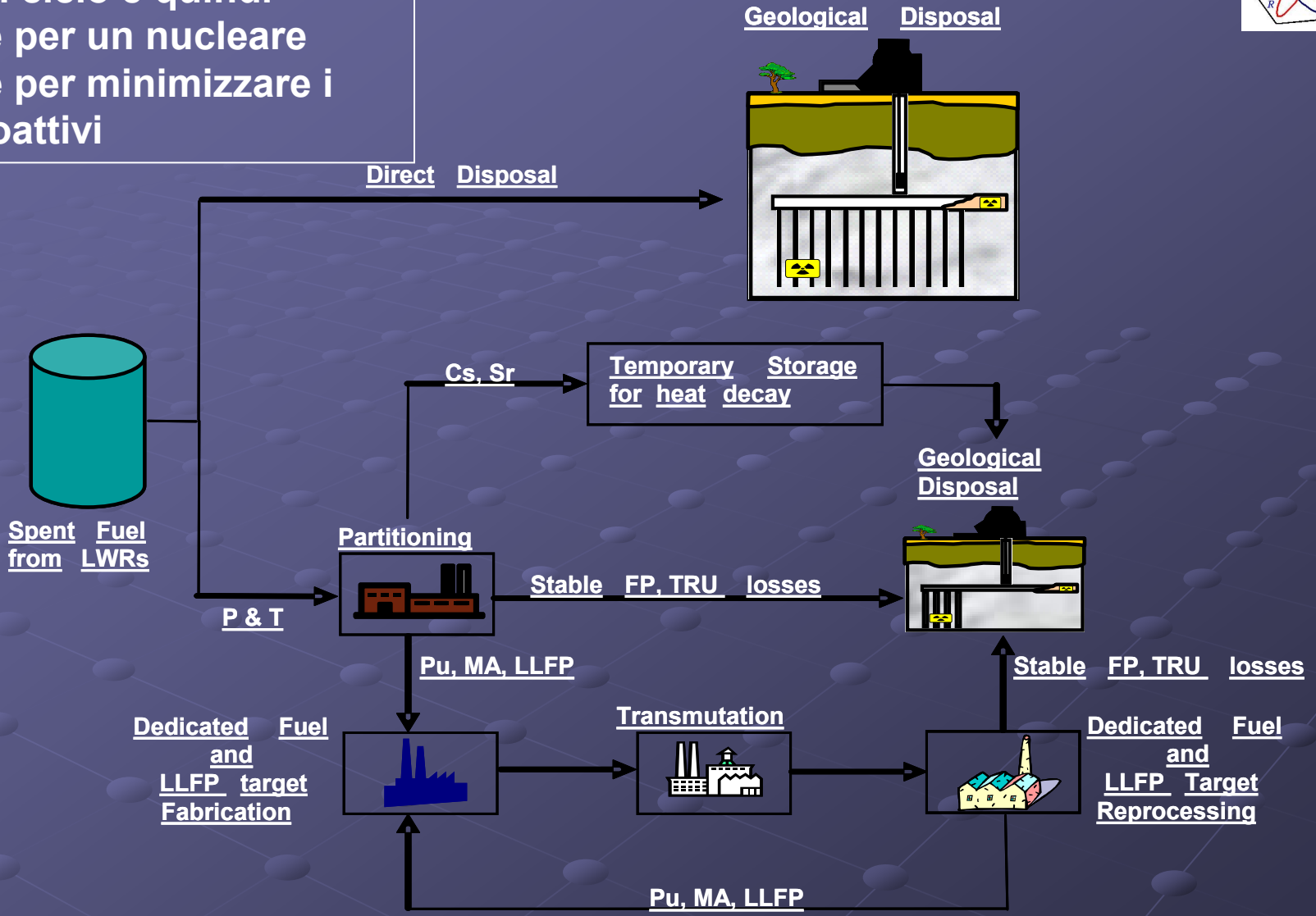
BENEFICI POTENZIALI DELLA SEPARAZIONE/TRANSMUTAZIONE



- Riduzione della sorgente di radiotossicità potenziale in un deposito geologico
- Riduzione del calore residuo: aumento della capacità del deposito geologico
- Se i transuranici non vengono separati isotopicamente fra di loro, diminuzione del rischio di proliferazione



Chiudere il ciclo è quindi essenziale per un nucleare durevole e per minimizzare i rifiuti radioattivi



LLFP: Long lived fission products (Tc -99, I -129, Se -79, ...); MA: Minor Actinides (Am, Np, Cm)



Attinidi [1/2]

1 H																	2 He						
3 Li	4 Be	<p>heavy nuclei</p> <p>fission products</p> <p>long-lived radionuclides</p>										<p>activation products</p> <p>fission and activation products</p>					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	Ln	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	An	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun														
lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu							
actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr							

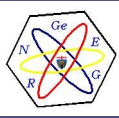


Trasmutazione dei MA

■ Transmutation (or nuclear incineration) of radioactive waste can take place due to neutron-induced reactions that transform long-lived radioactive isotopes into stable or short-lived isotopes

■ Apart for Cm^{245} , MA are characterized by a fission threshold around the MeV neutron energy, so such isotopes can efficiently be burned in fast reactors, where the neutron spectrum typically ranges from 10 keV to 10 MeV

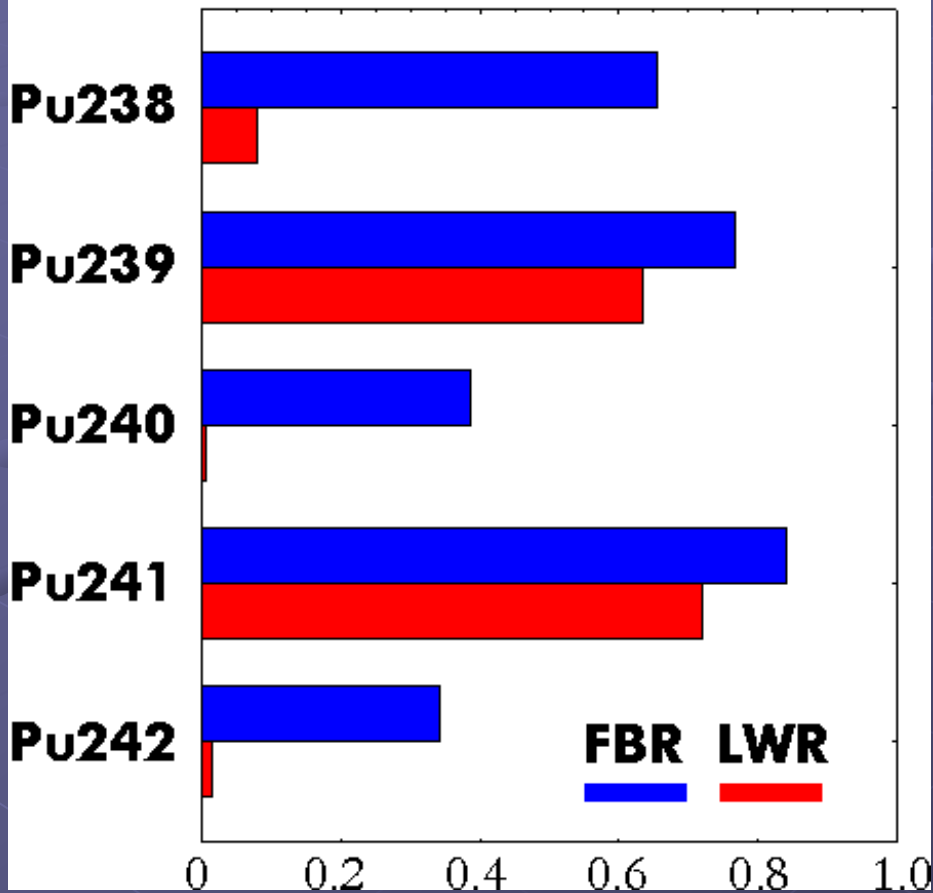
Produzione degli attinidi minori (Np, Am, Cm)



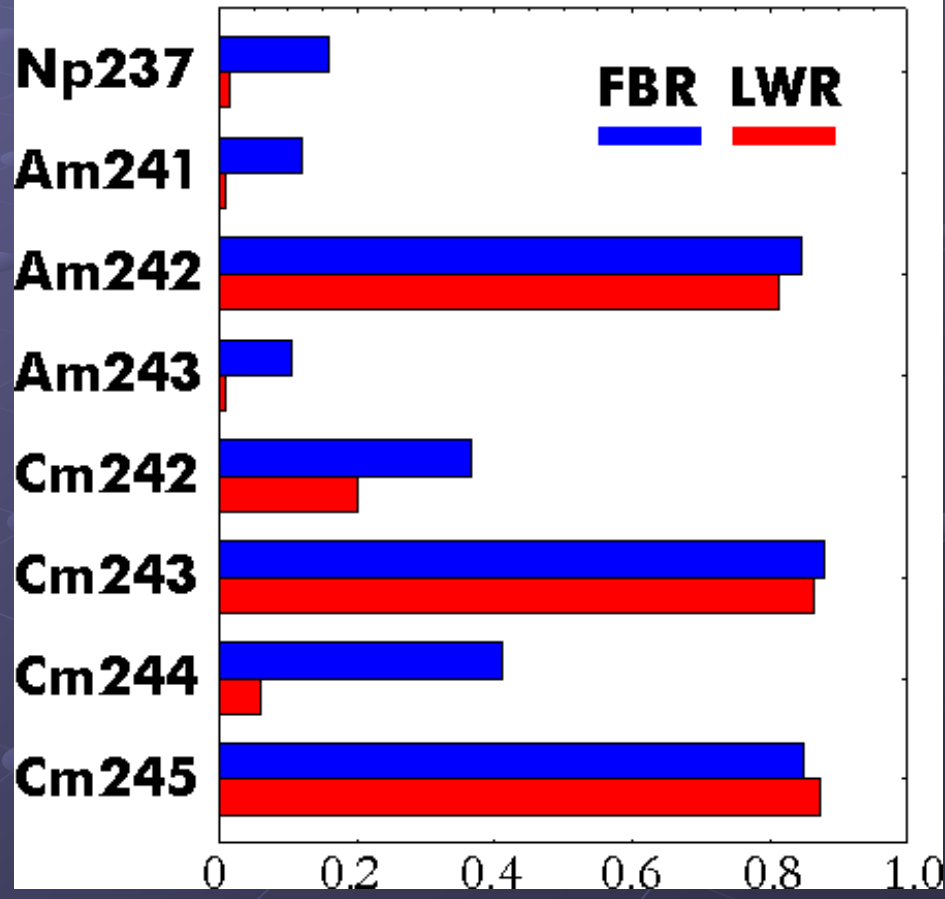
- Nell'attuale ciclo dei reattori ad acqua il Np^{237} è, fra gli attinidi minori, il più abbondante
- L'allungamento del burnup comporta la formazione di americio e curio
- Gli MA comportano un LOMB_T ~ 10000 anni

Rapporto Fissioni/Assorbimenti

Fission to absorption cross section ratio

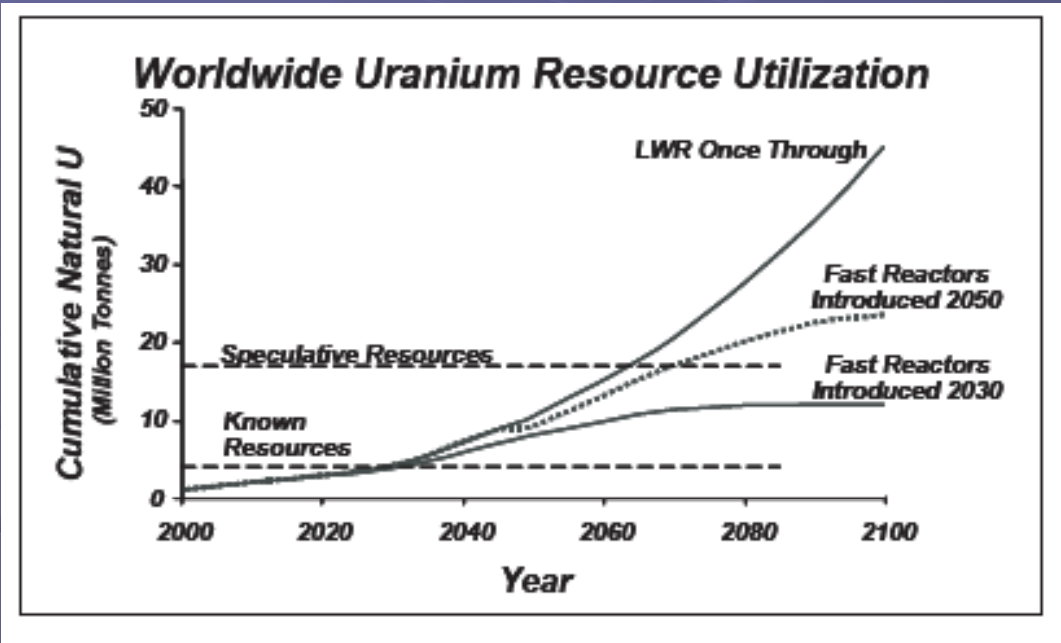


Fission to absorption cross section ratio



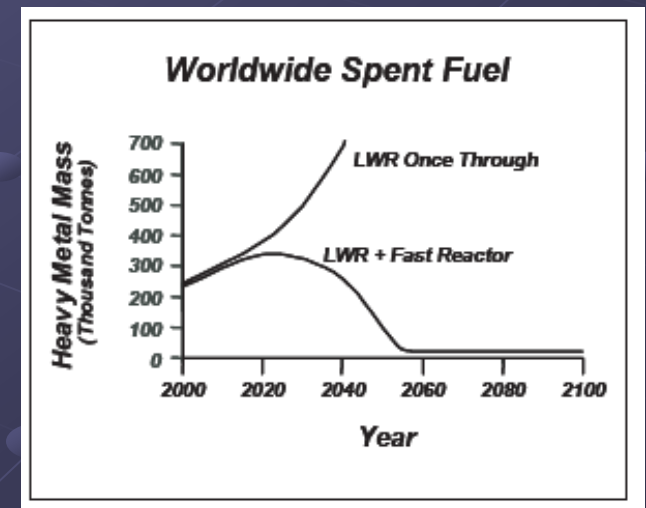


I “benefici” del bruciamento delle scorie “con le scorie”



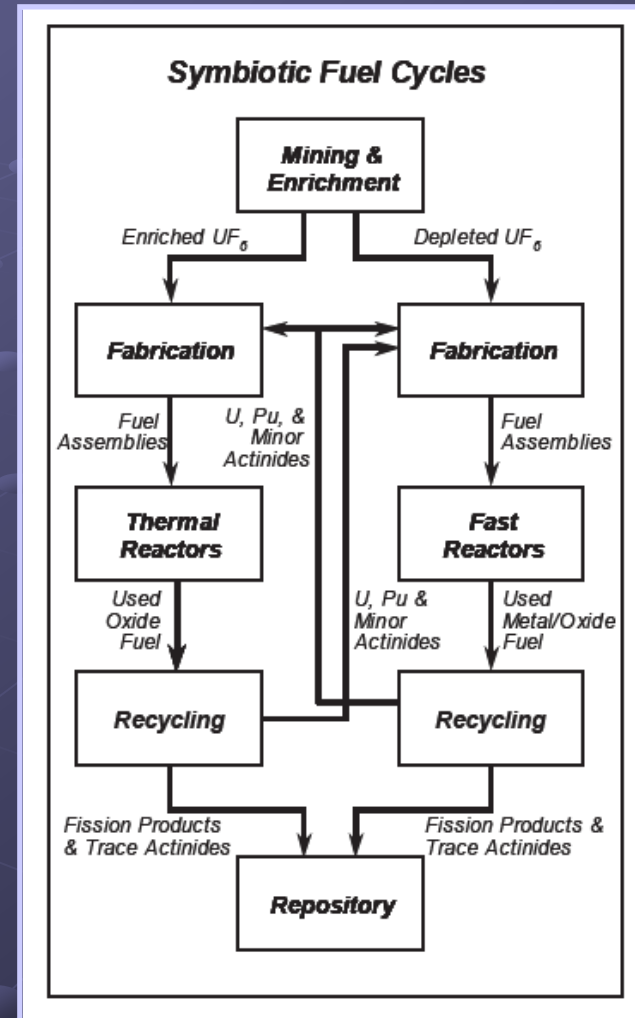
Allungamento della disponibilità delle risorse di uranio

Riduzione progressiva dei metalli pesanti da stoccare



Esempi di cicli innovativi

- Esistono vari tipi di cicli innovativi
- Il punto in comune a tutti è la necessità di **passaggi multipli** per bruciare integralmente l'uranio ed i suoi figli
- Ad ogni passaggio il trattamento del combustibile esausto dovrebbe essere **solo chimico, senza separazione isotopica**
- Il riciclo degli MA può essere “omogeneo” (MA in piccole percentuali mescolati uniformemente a U e Pu) o “eterogeneo” (assemblies dedicati)





Problematiche legate alla presenza di MA

La presenza di attinidi minori nel combustibile necessita, da un punto di vista di cinetica neutronica, della valutazione accurata di:

- ✓ Frazione dei neutroni ritardati
- ✓ Coefficiente Doppler

Molti attinidi minori hanno un β molto basso (inferiore a 0.002); tuttavia la presenza di materiale fertile ridimensiona il problema ($\beta=0.015$ per l' U^{238} e $\beta=0.0209$ per il Th^{232})

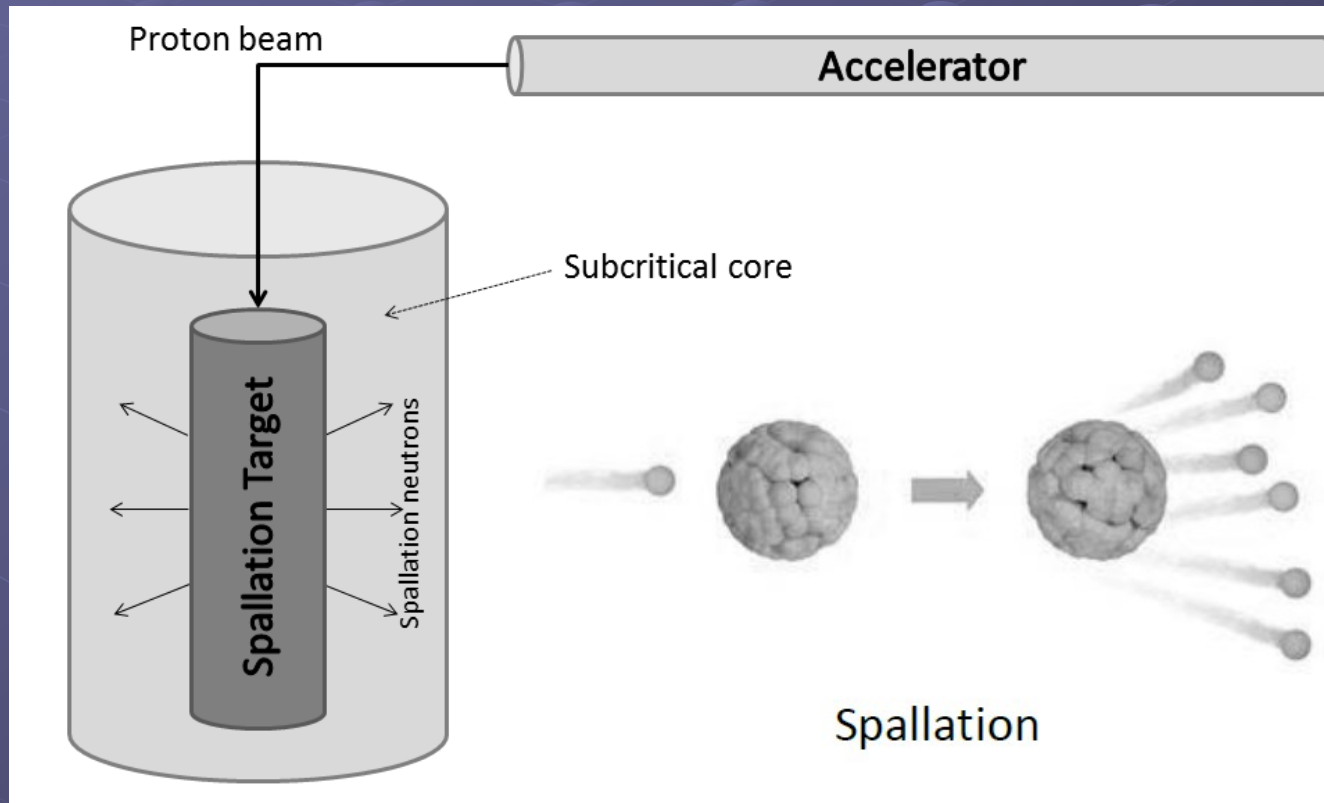


β per Attinidi

Nuclide	β_I (pcm)
^{235}U	650
^{238}U	1480
^{237}Np	334
^{238}Pu	120
^{239}Pu	210
^{240}Pu	270
^{241}Pu	490
^{242}Pu	573
^{241}Am	113
^{243}Am	208
^{242}Cm	33
^{244}Cm	100

ADS & Spallazione

■ L'Accelerator Driven System (ADS) si basa sull'accoppiamento tra un acceleratore di particelle e un dispositivo sottocritico nucleare

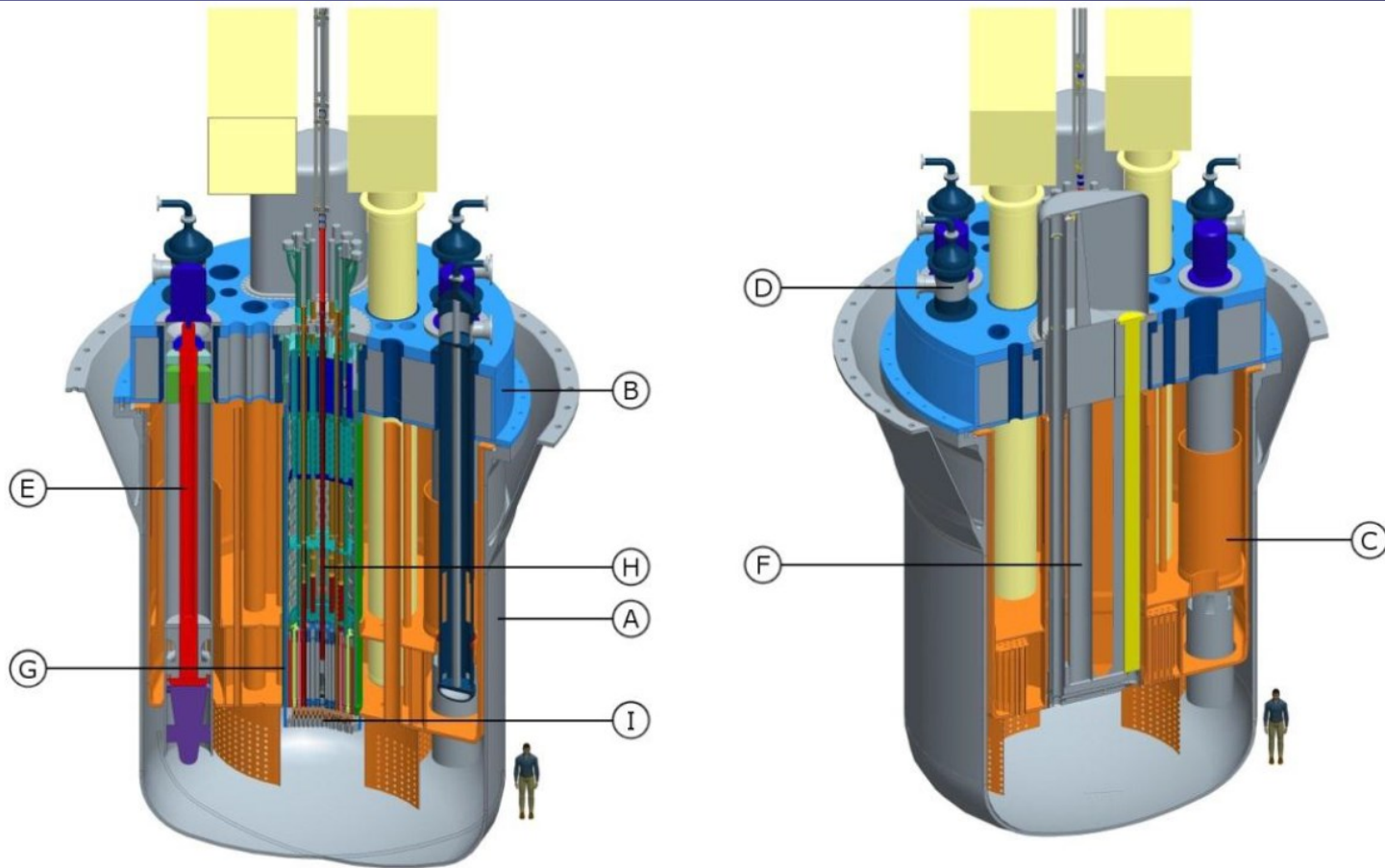
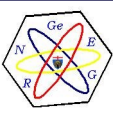




Why ADS?

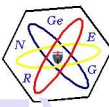
- Due to the sub-criticality of the system, in an ADS delayed neutrons are less relevant for reactor control, since the kinetics is dominated by prompt neutrons which follow the time-behaviour of the external neutron source (at least for a quite energetic source)
- Therefore a fast spectrum ADS offers a wider capability in terms of adding TRU to the fuel and burning them

MYRRHA

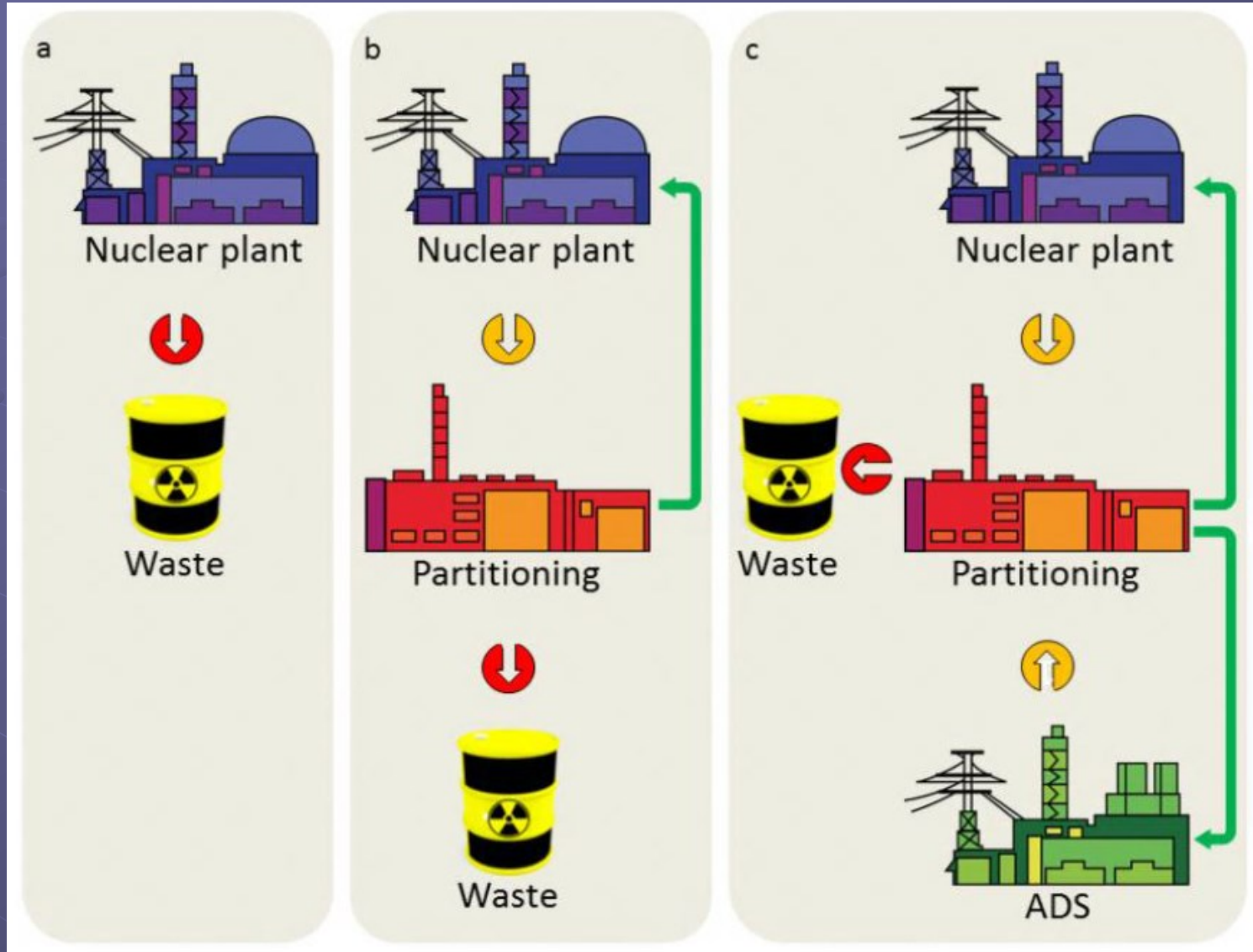


- A. Reactor Vessel
- B. Reactor Cover
- C. Diaphragm
- D. Primary Heat Exchanger
- E. Primary Pump

- F. In-vessel Fuel Handling Machine
- G. Core
- H. Above Core Structure
- I. Core Restraint System



Partitioning & Transmutation (P&T)





Conclusioni [1/2]

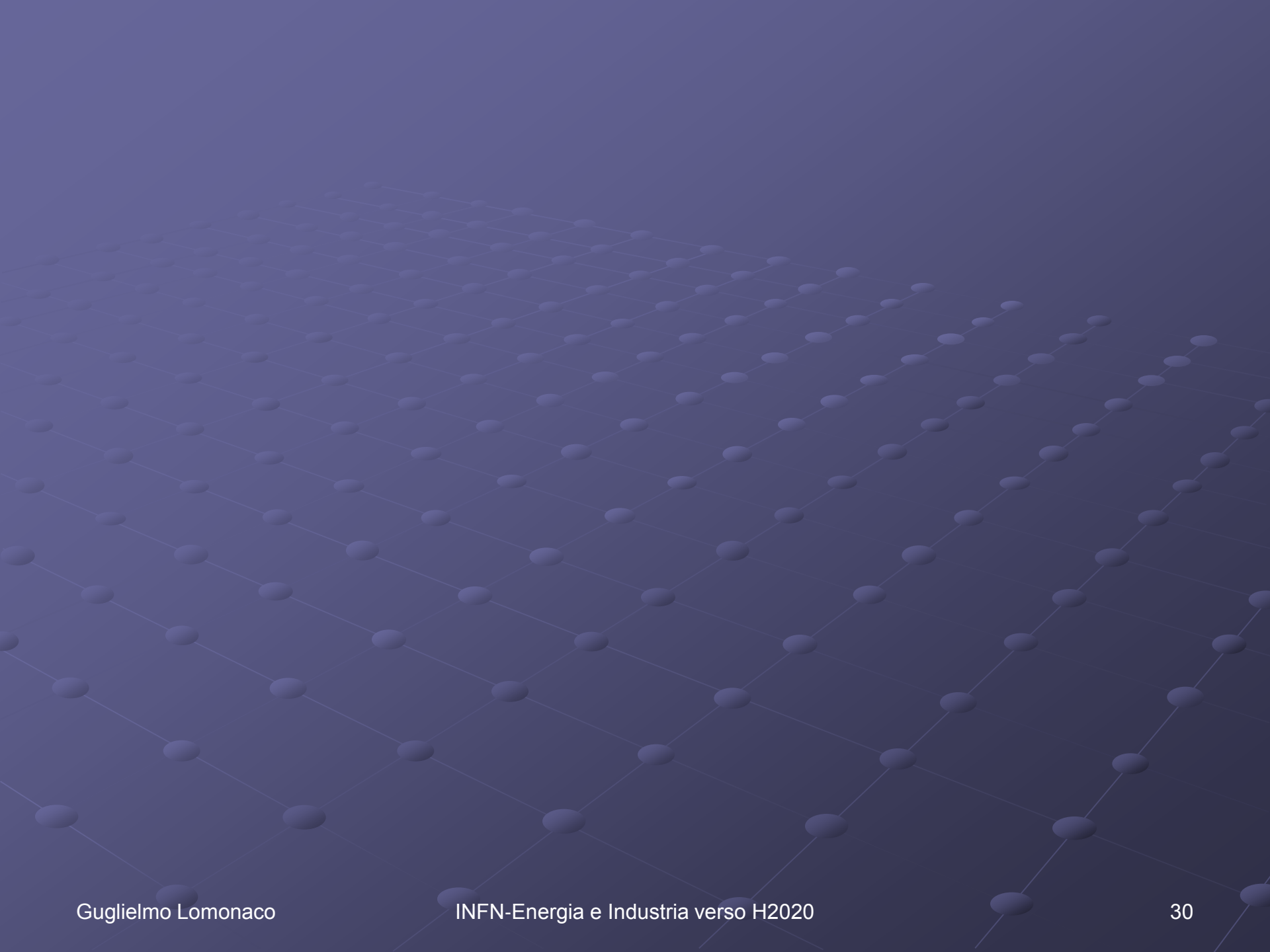
- ❑ In termini generali, le scorie radioattive non presentano problemi che l'attuale tecnologia non sia in grado di affrontare
- ❑ Il problema della distruzione del HLW, ed in particolare del suo contenuto di MA, non è però di semplice ed immediata soluzione
- ❑ L'attuale tecnologia potrebbe permettere la parziale trasmutazione delle scorie ad alta attività con reattori a spettro veloce o spettro termico ad alta fluenza
- ❑ Una soluzione più completa potrebbe però essere costituita dai bruciatori ADS

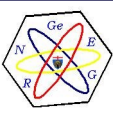


Conclusioni [2/2]

- Con l'eliminazione (o quanto meno drastica riduzione) delle scorie ad alta attività diminuirebbe la necessità di realizzare nuovi depositi geologici
- Già da molti anni sono in corso ricerche sull'argomento (anche in ambito INFN-Energia) ma è ancora ampio lo spazio per ulteriori sviluppi di R&D, anche nel contesto Horizon2020
- In particolare nella prima call di dicembre scorso, nell'ambito del capitolo *Euratom Fission*, è presente lo specifico topic *Transmutation of minor actinides (Towards industrial application)*

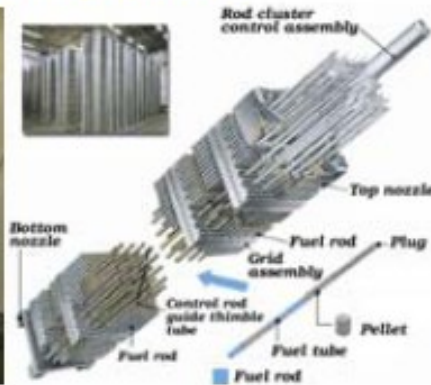
Lo scienziato non è l'uomo
che fornisce le vere risposte:
è quello che pone le vere domande
(Claude Lévi Strauss)





Origine dei rifiuti radioattivi

Ciclo del combustibile nucleare



Ricerca e Medicina

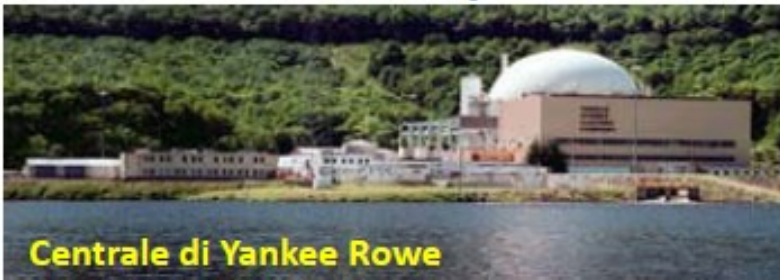
- Ospedali
- Laboratori analisi
- Industria farmaceutica
- Reattori di ricerca



Industria

- Petrolifera
- Fosfati
- Fonderie
- Saldature
-

Smantellamento impianti



Centrale di Yankee Rowe



Altri

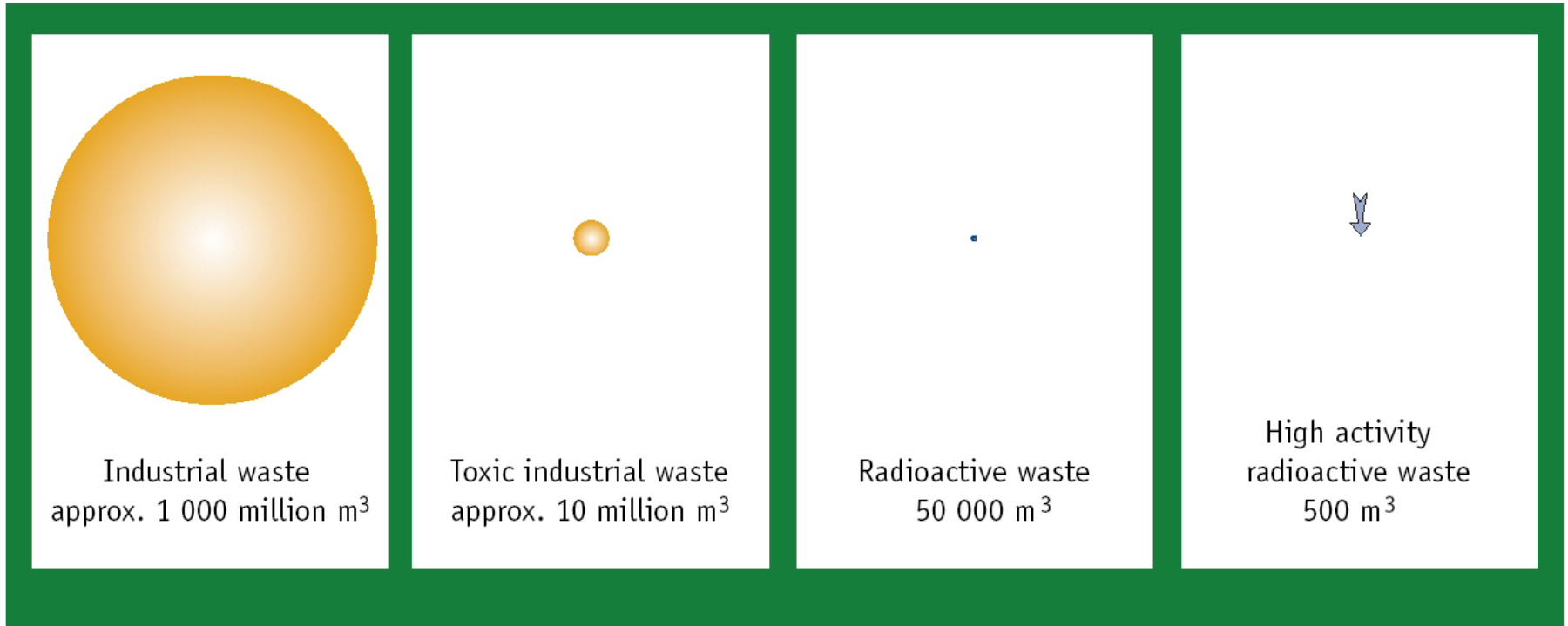
- Rivelatori di fumo
- Parafulmini
- Radio-luminescenti
- Ceneri
- Derivati del Torio (lenti, refrattari)
-



Confronto tra “rifiuti”



Figure 4.2: Waste generation comparison – yearly production of waste in the European Union



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).



Rifiuti nucleari pericolosi: la reale dimensione del problema

Un francese in un anno produce:

■ **3000 kg** di rifiuti di ogni tipo, che comprendono:

- **100 kg** di rifiuti tossico-nocivi (chimici, metalli pesanti-mercurio piombo cadmio non degradabili,...), che comprendono:

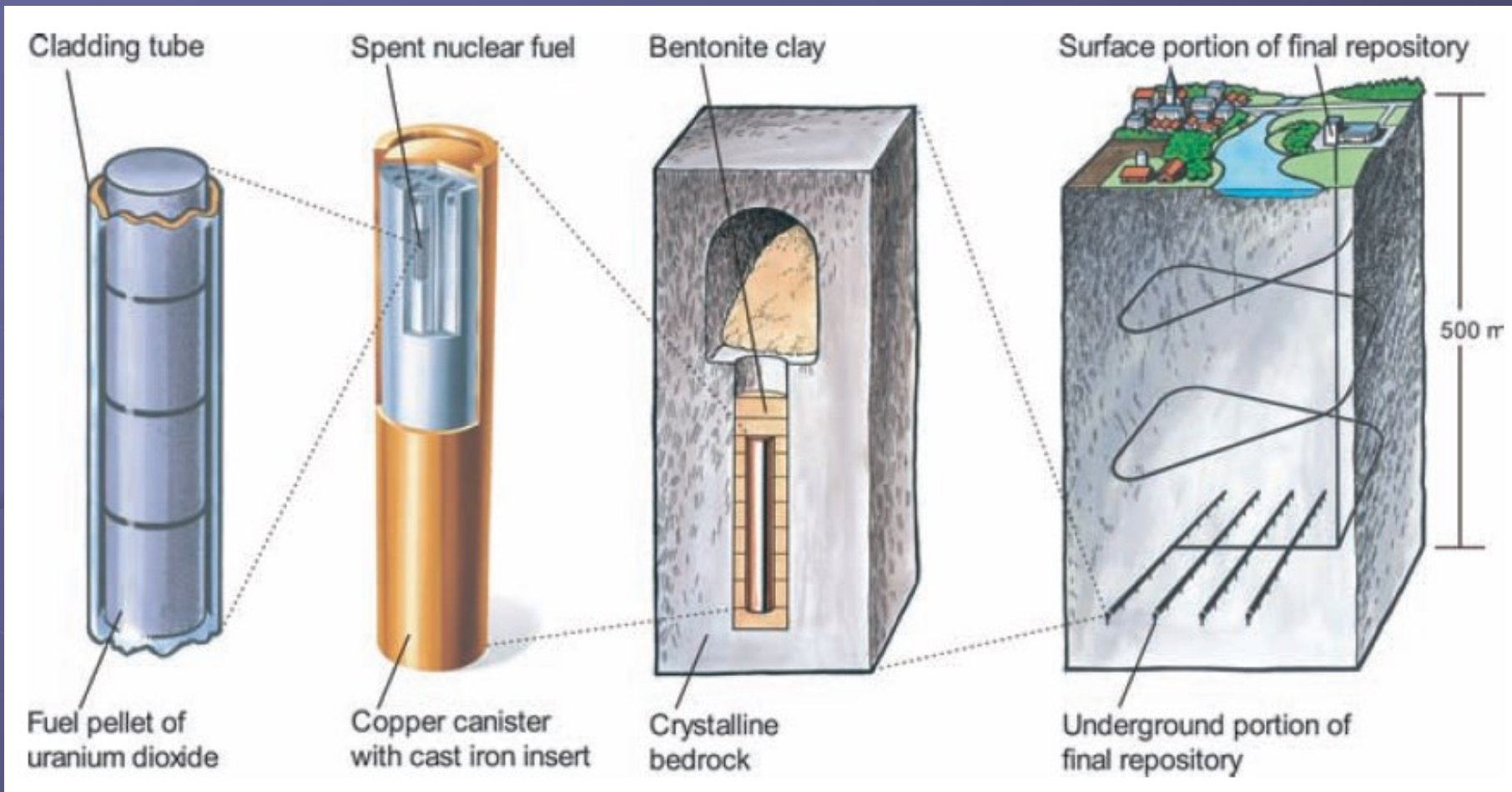
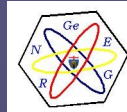
- **1 kg** di rifiuti nucleari, che comprende:

- **0.05 kg** di rifiuti radioattivi pericolosi a lunga vita (>30 anni)

■ Quindi, in una intera vita (70 anni), un francese che consumi solo energia elettrica nucleare, produce un volume di rifiuti radioattivi pericolosi pari a...



DEPOSITO GEOLOGICO

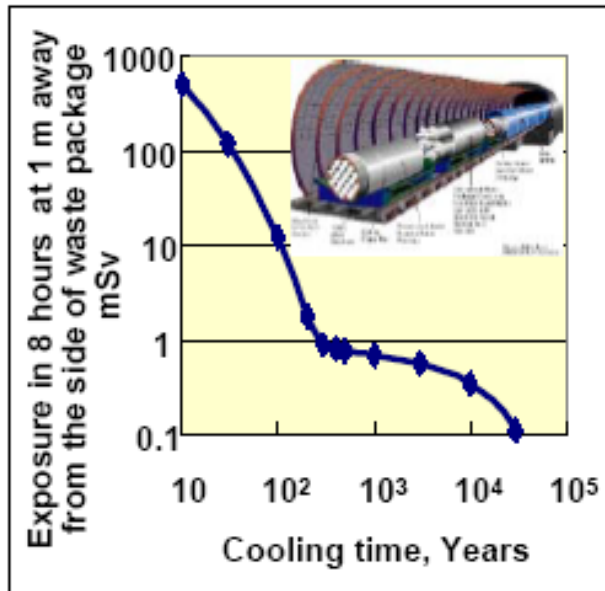


The Swedish concept for the disposal of spent nuclear fuel - the multi-barrier concept

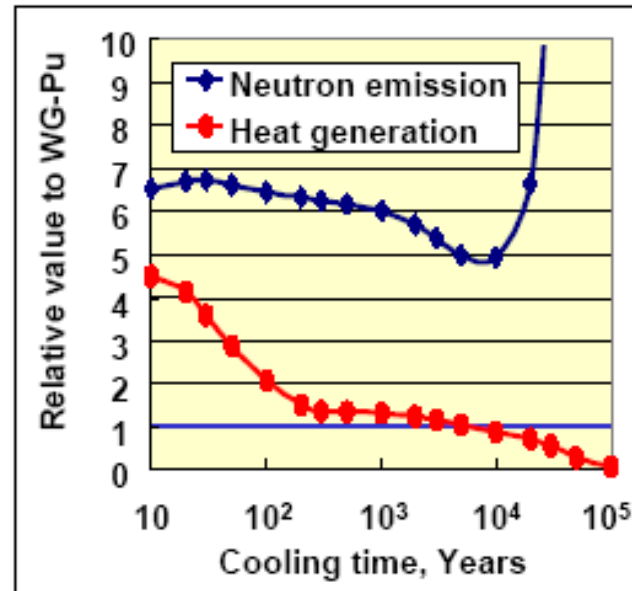
«Miniera» di Pu



100 years later, access becomes easier and plutonium becomes more attractive in direct disposal

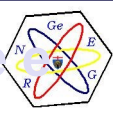


Radiation exposure



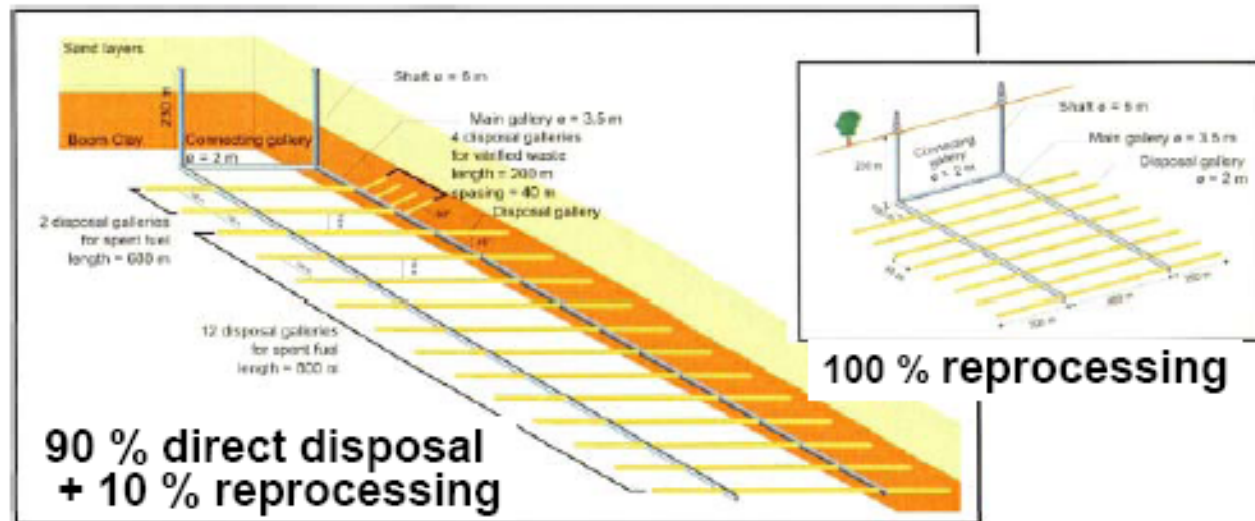
Plutonium properties

Se si riprocessa (ciclo chiuso), i rifiuti radioattivi (prodotti di fissione e attinidi minori: Np, Am, Cm) vengono « vitrificati »
Questa operazione riduce significativamente lo spazio di stoccaggio




Direct Disposal vs. Vitrified HLW Disposal - Belgian Case –

- SAFIR 2 Report (December 2001)
- **Direct disposal requires 6 times larger space than vitrified waste disposal**



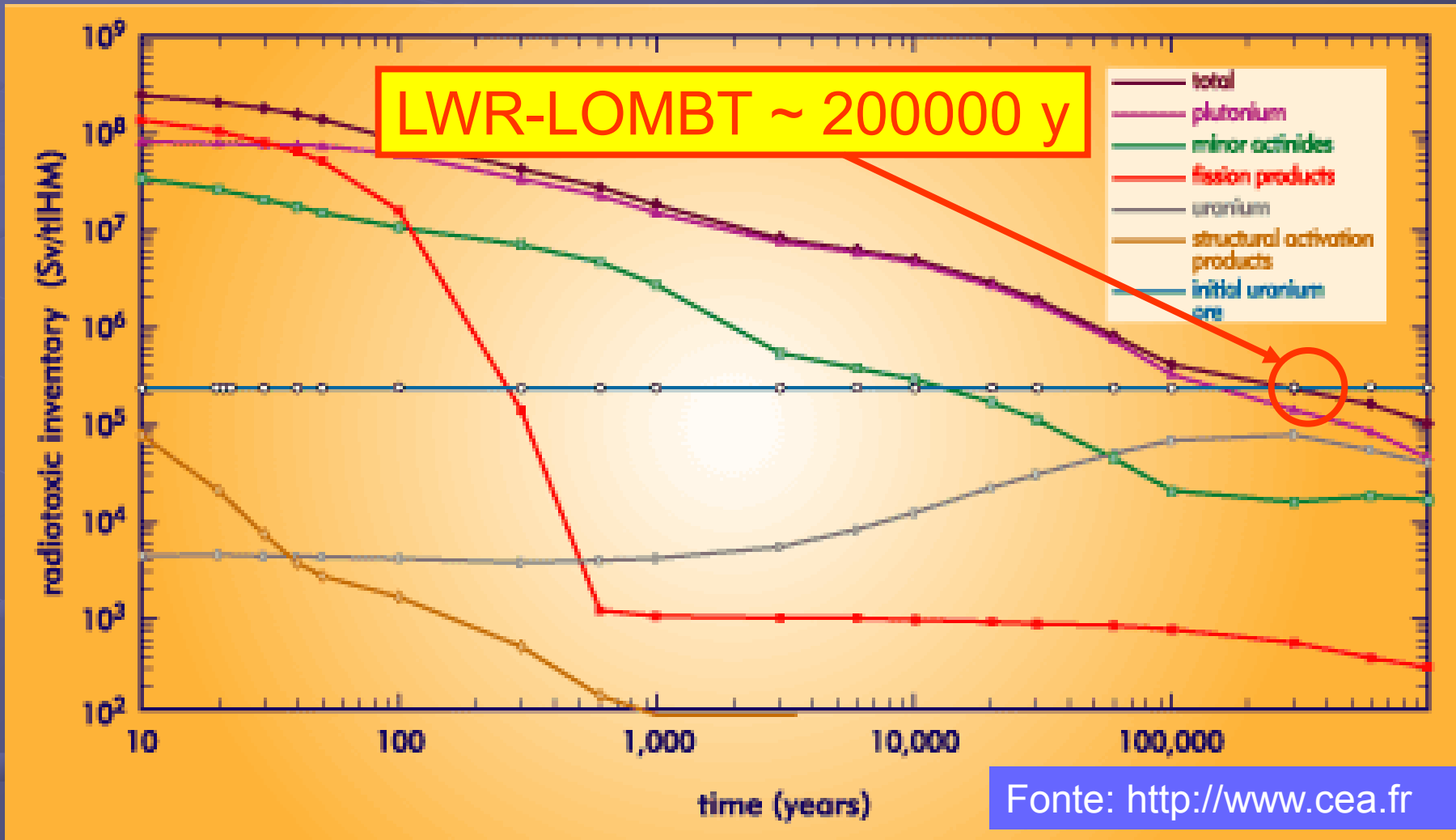


LOMBT

 We defined the **LOMBT** (*Level Of Mine Balancing Time*) as the time (years) necessary for the radiotoxicity (ingestion) of the exhausted fuel to return to the same value of the amount of the mineral extracted from the mine (natural U) that generates the used fuel

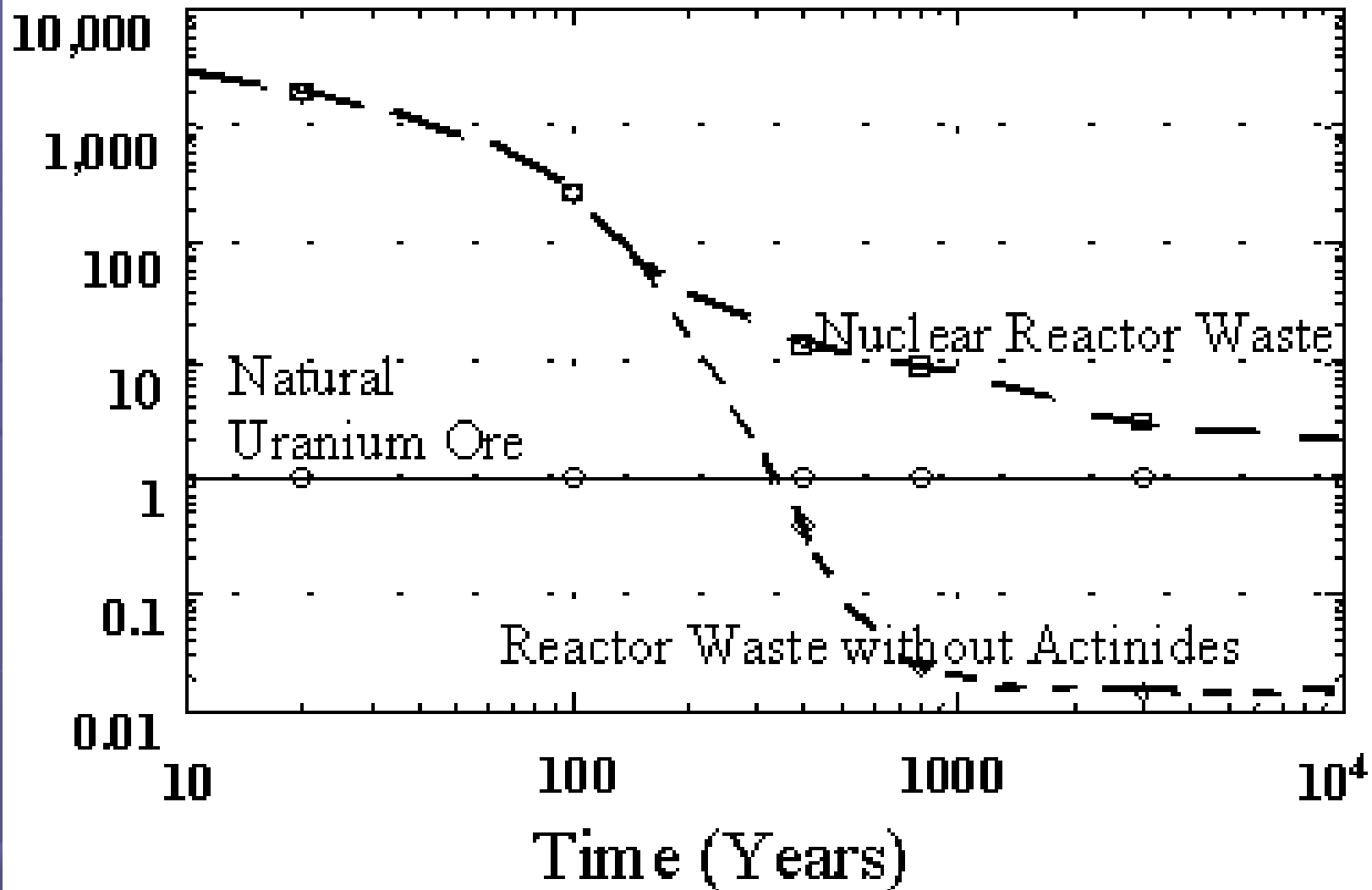


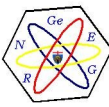
Radiotossicità del waste



Fonte: <http://www.cea.fr>

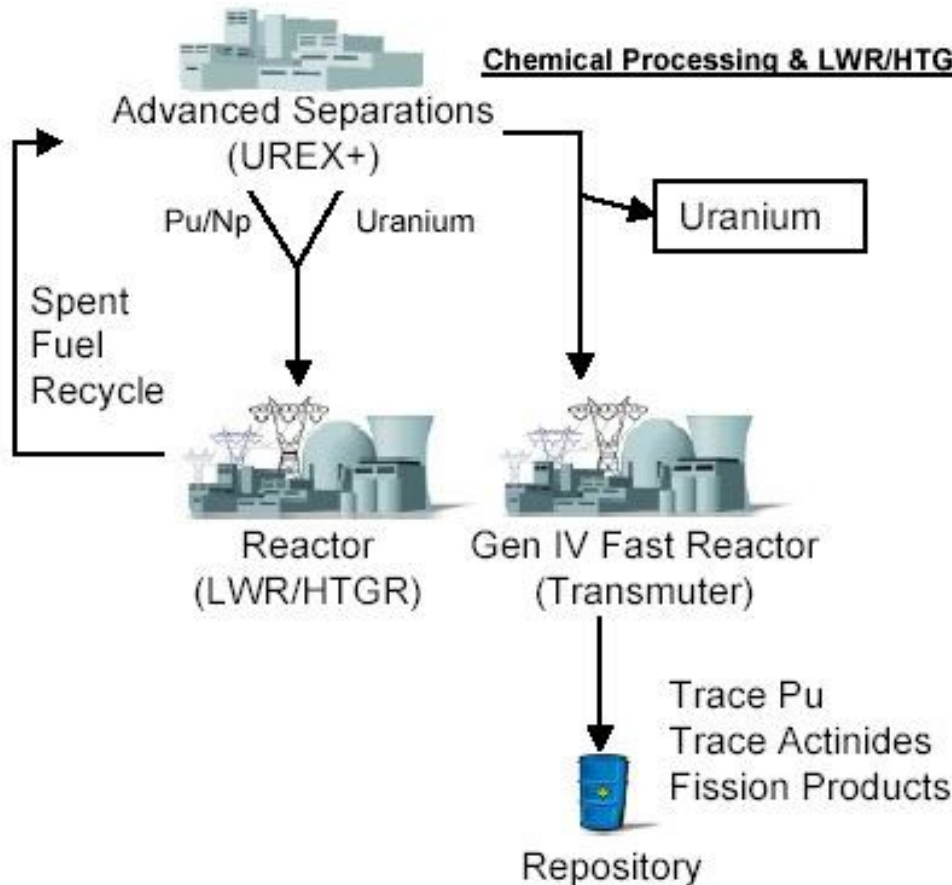
Relative Ingested Toxicity





Cicli Simbiotici LWR-HTR-GCFR [1/3]

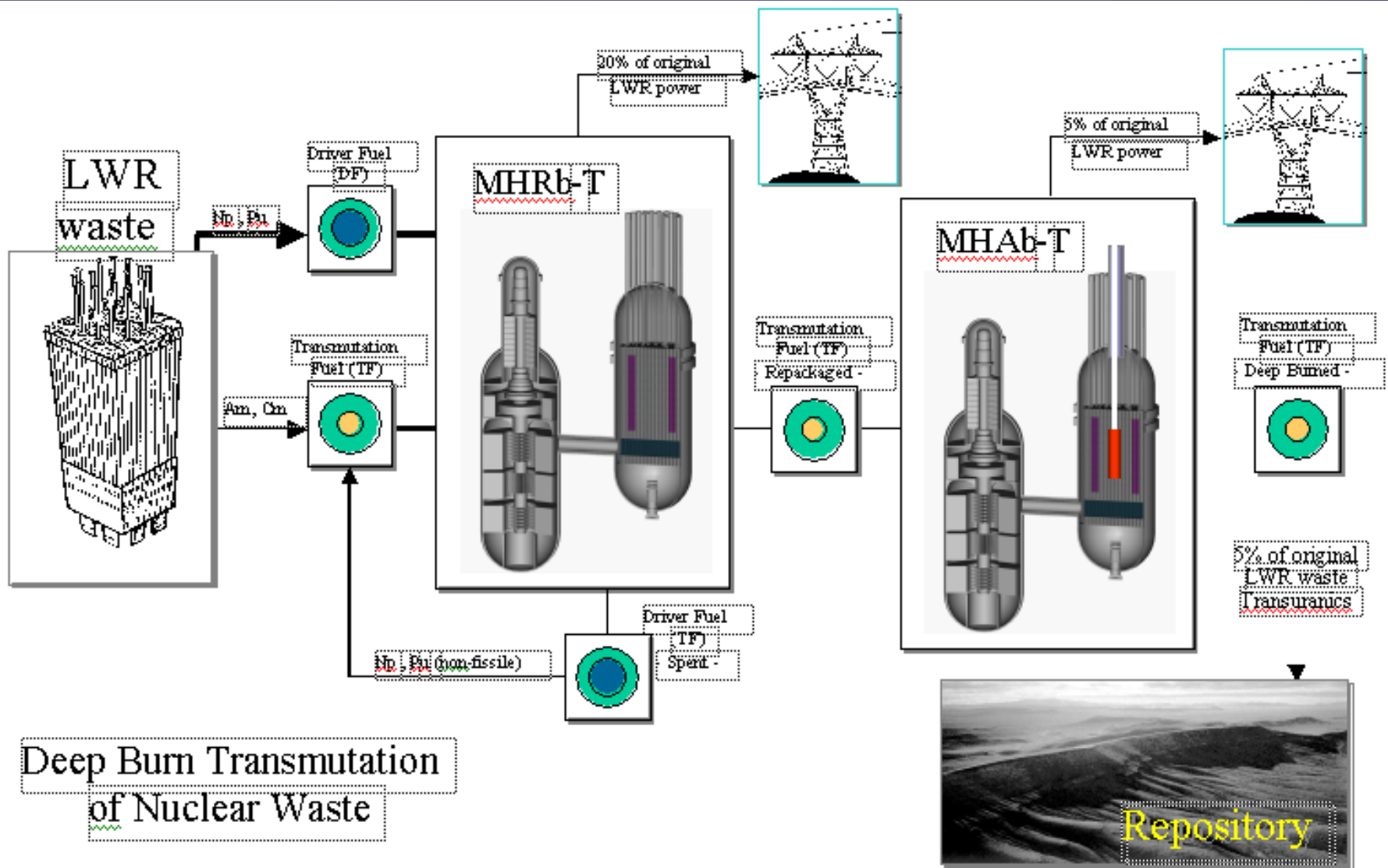
Chemical Processing & LWR/HTGR Fast Reactor Recycle



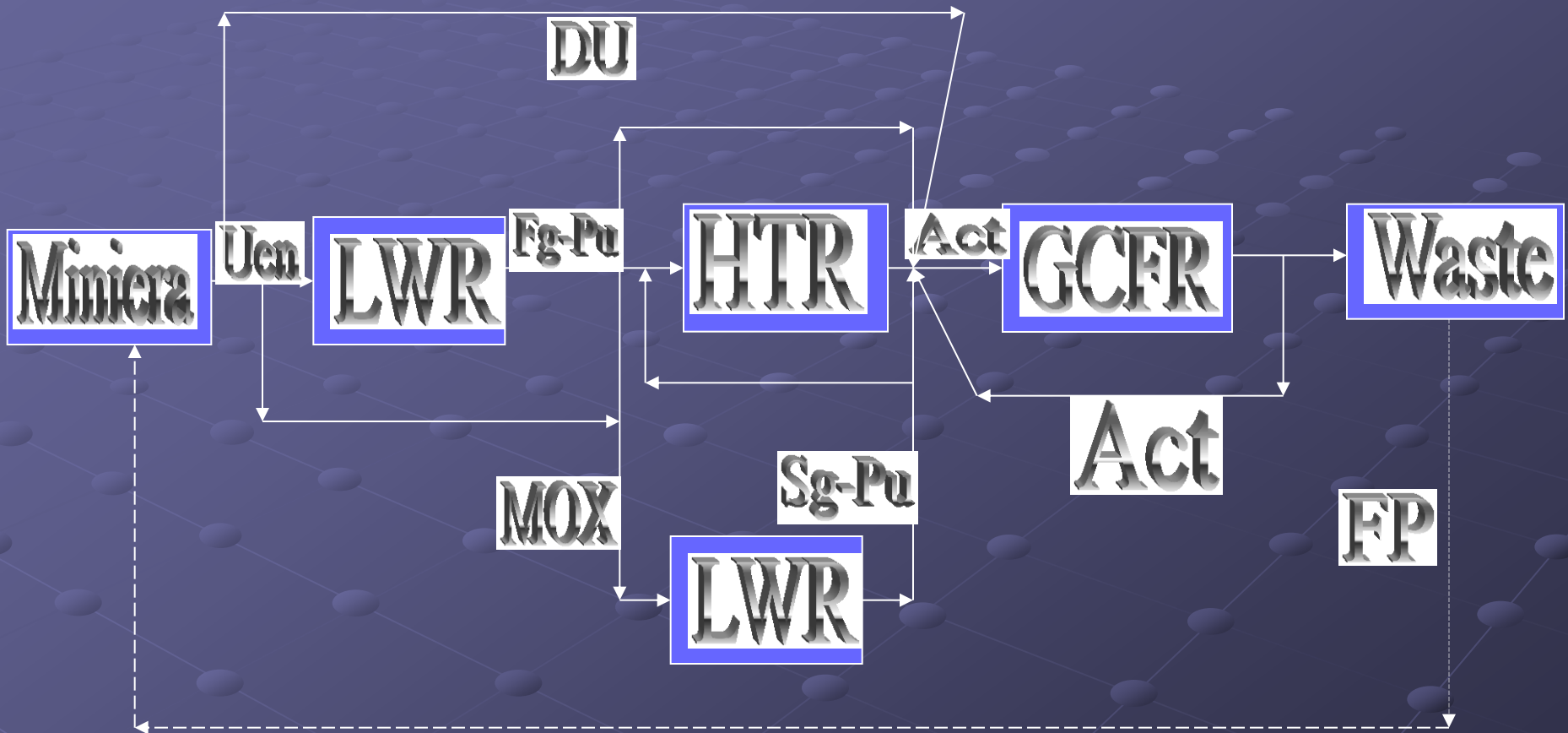
- Pu consumption and toxicity reduction
- Significant reduction in number of waste packages
- Permits significant expansion to existing repository



Cicli Simbiotici LWR-HTR-GCFR [2/3]

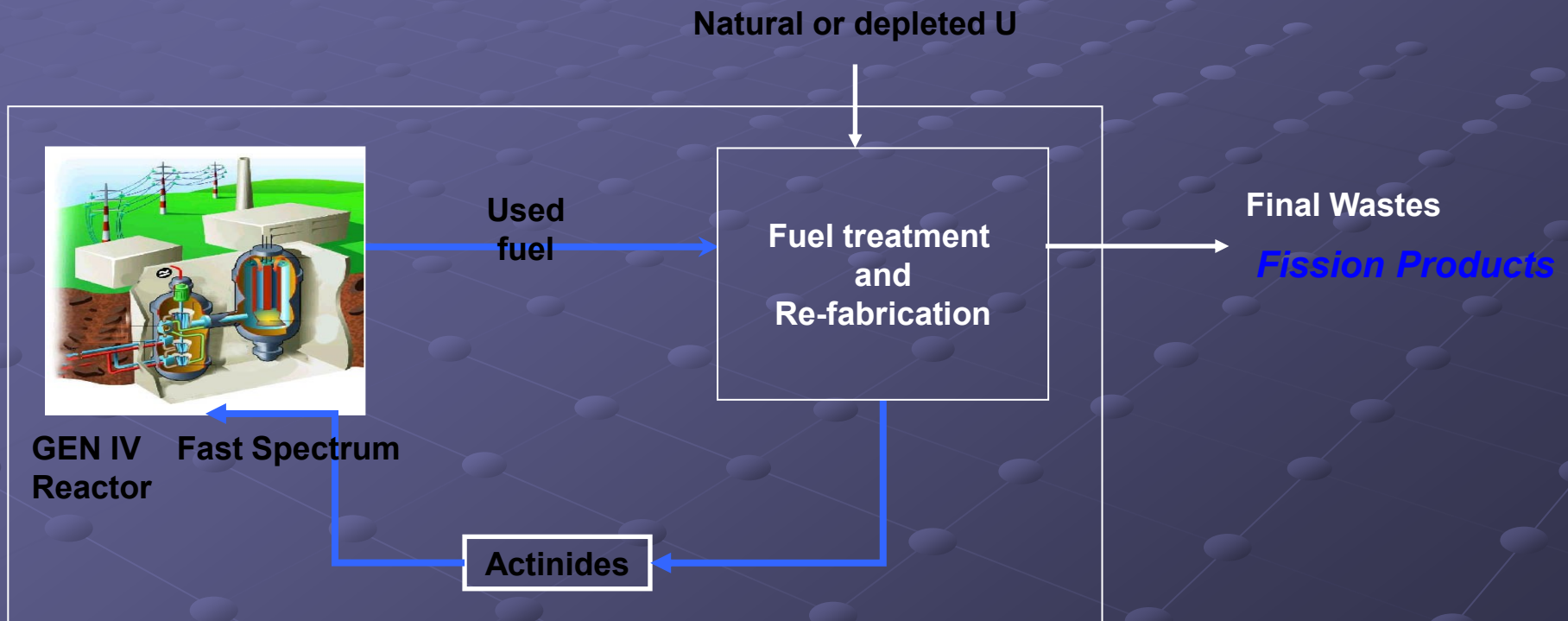


Cicli Simbiotici LWR-HTR-GCFR [3/3]





FR - Ricicli Multipli





Radiotossicità delle scorie

