

Due o tre cose che so di lei

febbraio 2011



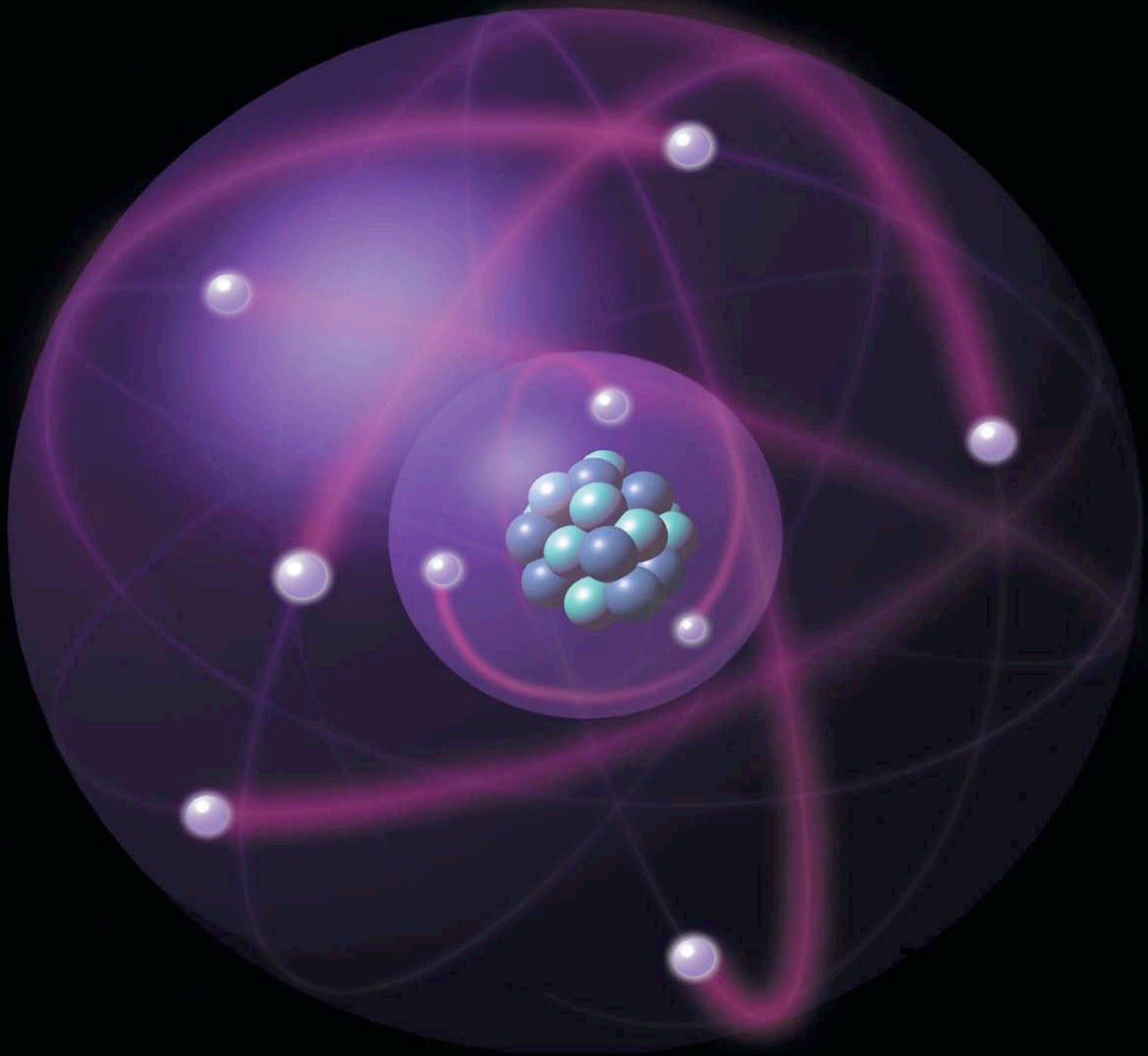
1. da dove viene l'energia nucleare
2. arricchimento o moderazione
3. dal nocciolo alla rete
4. dove, come, quanto
5. il fascino sottile della tecnologia



da dove viene l'energia nucleare

la fisica della fissione nucleare e la reazione a catena





- il nucleo degli atomi è piccolissimo
raggio del nucleo/raggio atomo $\sim 1/100.000$
 - il nucleo ha carica elettrica positiva, a
bilanciare quella negativa degli elettroni
 - il nucleo è composto da due tipi di
particelle molto simili a parte la carica
elettrica, i nucleoni:
 - * protone, carico positivamente
 - * neutrone, neutro
- deve esistere una forza fra i nucleoni
estremamente intensa da compattarli in uno spazio
piccolissimo vincendo la repulsione elettrostatica
dei protoni – la forza nucleare

- una specie atomica (elemento) è individuata dal numero di elettroni – quindi di protoni
- uno stesso elemento si presenta con un numero variabile di neutroni – gli isotopi
- per distinguere gli isotopi si precisa oltre al nome o simbolo dell'elemento il numero totale di nucleoni presenti nel nucleo



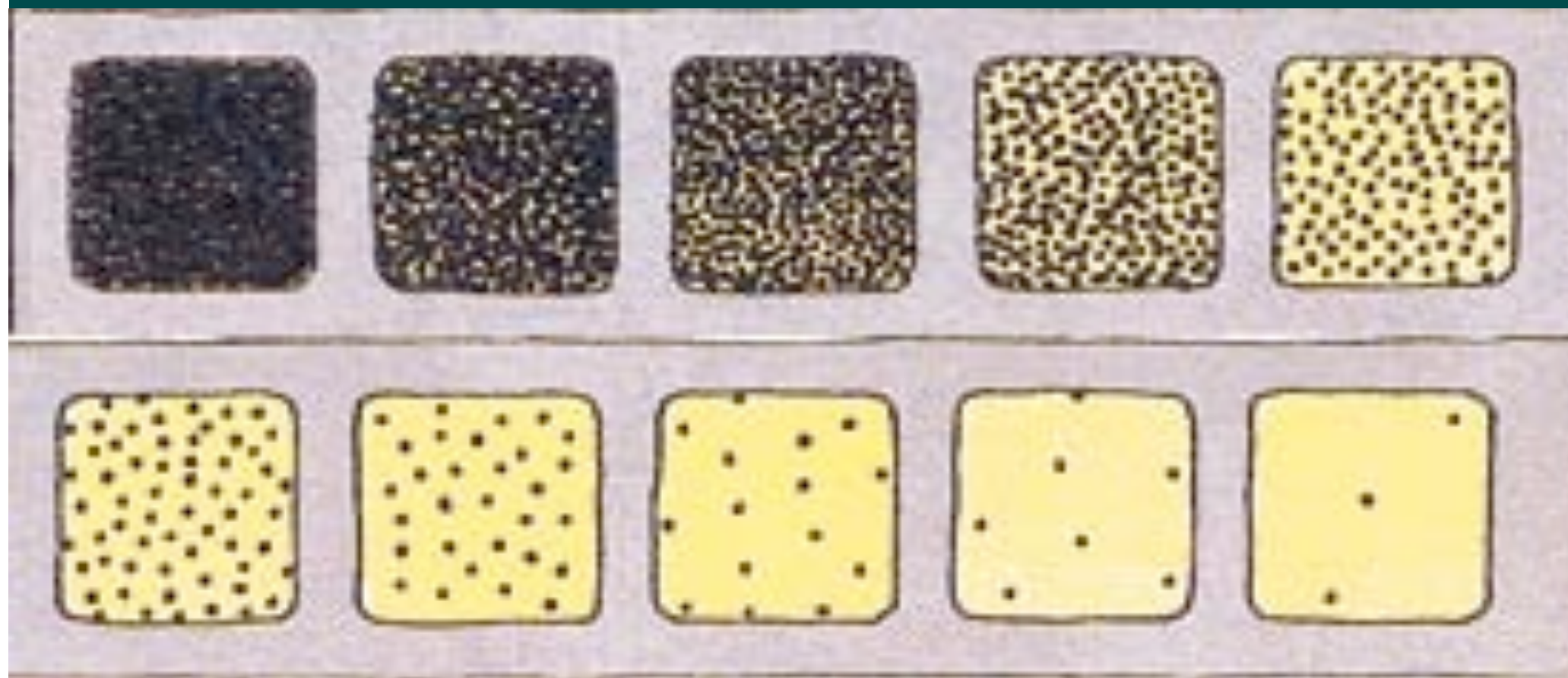
isotopi differenti dello stesso elemento hanno le stesse proprietà chimiche, ma possono avere enormi differenze fisiche

Uranio naturale $Z=92$ tre isotopi

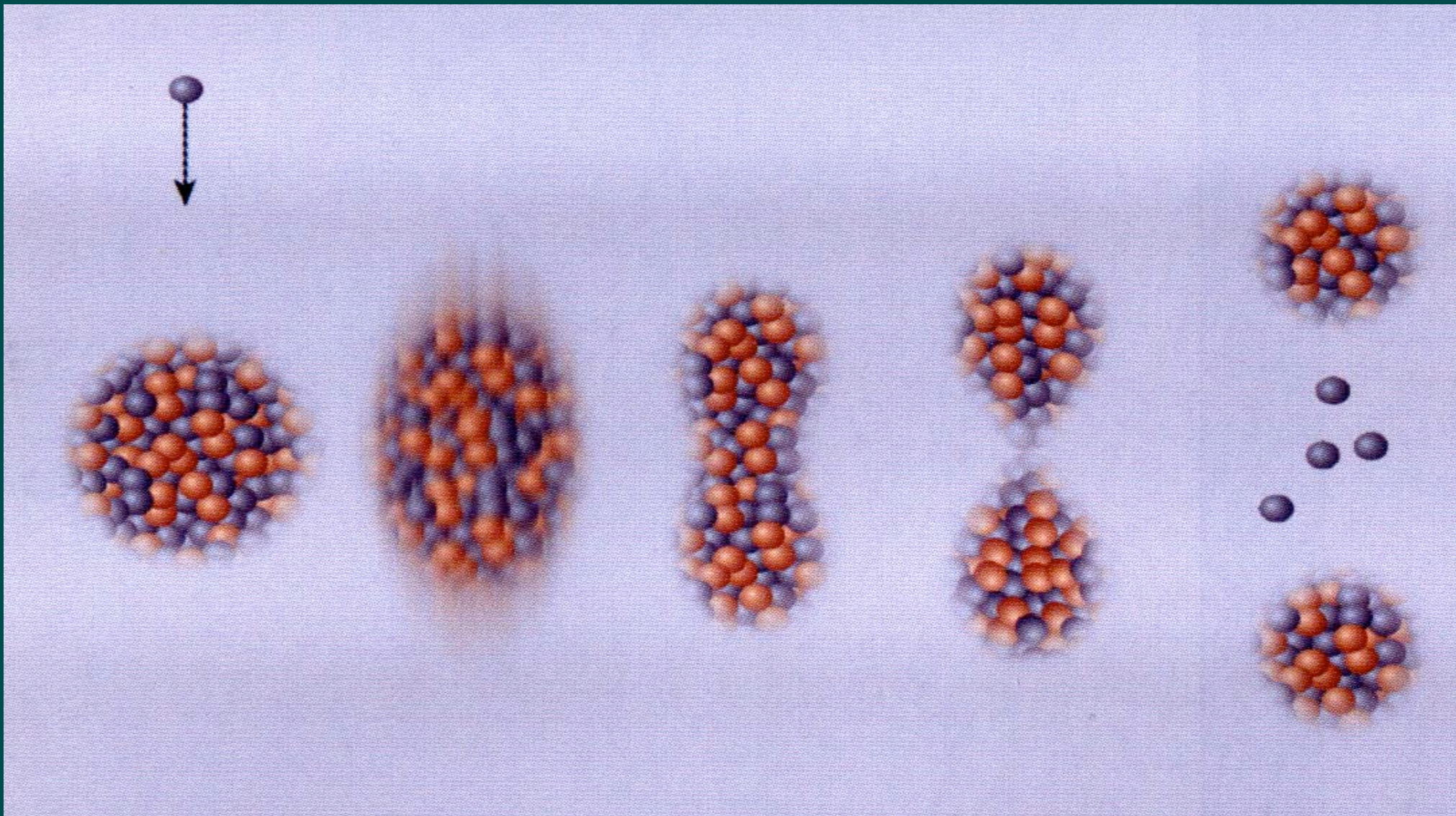
U-238	99,2745%	$T_{1/2}$	$4,468 \cdot 10^9$ anni
-------	----------	-----------	-------------------------

U-235	0,72%	$T_{1/2}$	$7,038 \cdot 10^8$ anni
-------	-------	-----------	-------------------------

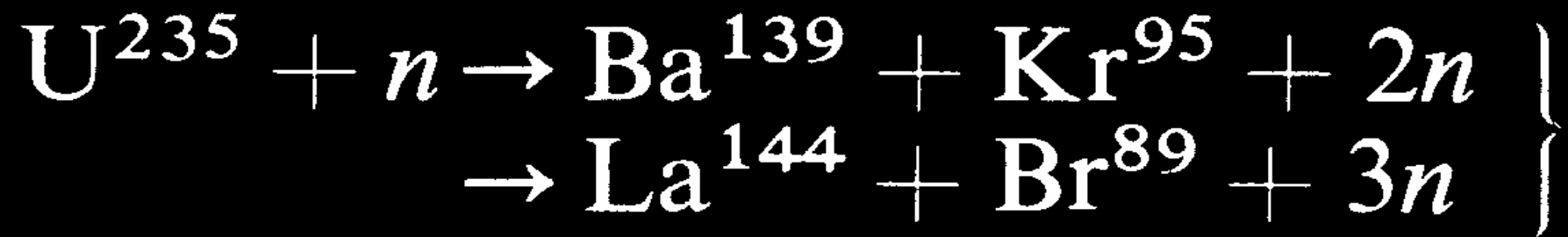
U-234	0,0055%	$T_{1/2}$	$2,455 \cdot 10^5$ anni
-------	---------	-----------	-------------------------

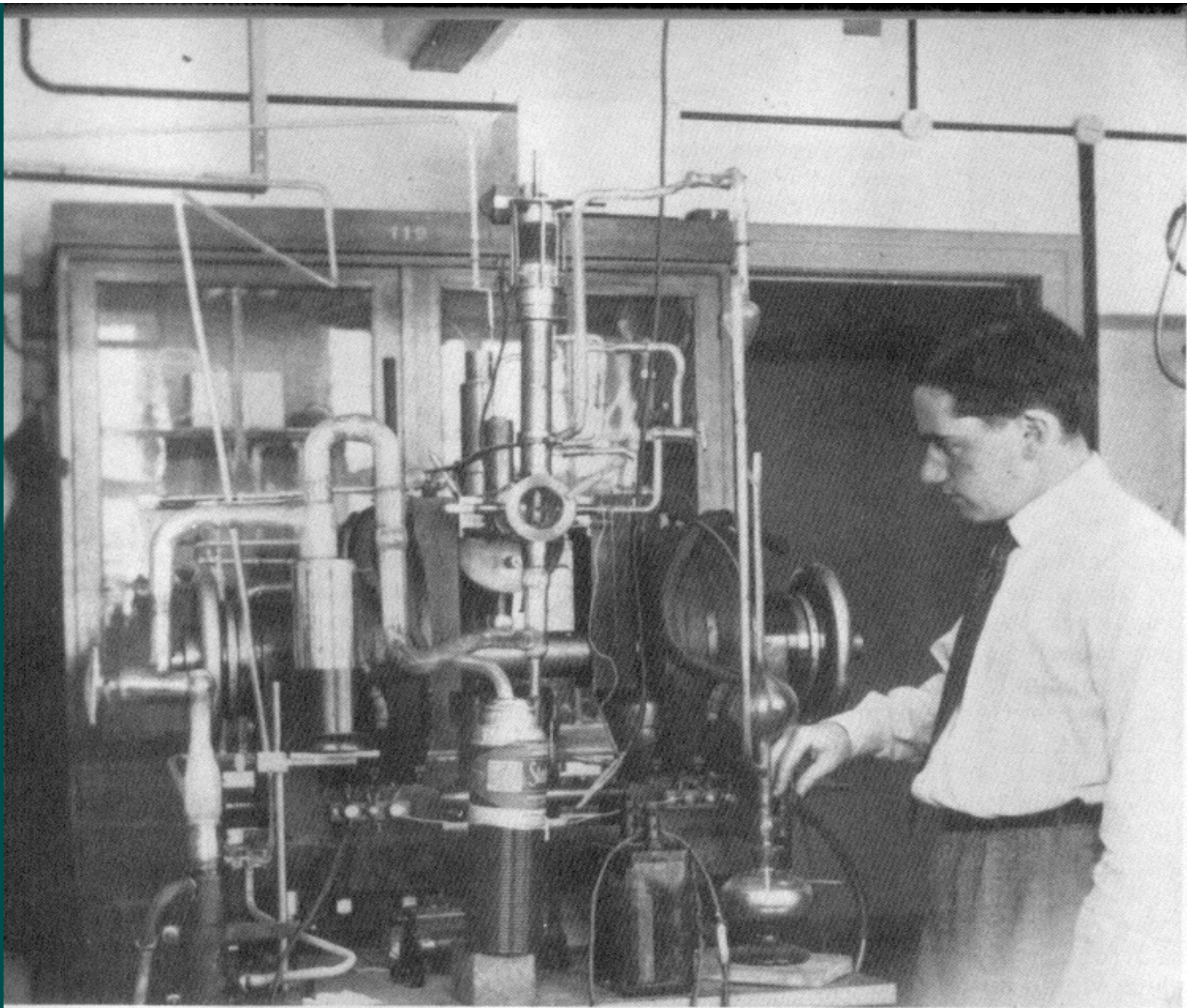






Reazioni di fissione





energia fissione

combustione di un atomo di carbonio	4,2 eV
esplosione molecola TNT	11 eV
radioattività alfa	4 MeV
reazioni di fusione	20 MeV
fissione uranio-235	200 MeV

L'elettronvolt eV è l'unità d'energia per i fenomeni atomici e nucleari è estremamente piccola per il mondo ordinario

1 eV equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ joule
o a $3,822 \times 10^{-20}$ calorie



il numero di atomi in una massa di dimensioni ordinarie è enorme

ci sono $2,58 \times 10^{24}$ atomi in 1 kg di uranio

“accene più di millanta che tutta notte canta”

sorpresa!

**è l'uranio-235 [l'isotopo raro] a subire
fissione**

Niels Bohr, primavera 1939

Energia dalla fissione di 1 kg di uranio-235

$$\begin{aligned} E &= 2,58 \times 10^{24} \text{ atomi} \times 200 \text{ MeV} \\ &= 2,58 \times 10^{24} \times 200 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= 8,256 \times 10^{13} \text{ J} \sim 20 \text{ GWh} \\ &\sim 18 \text{ kton} \end{aligned}$$

**una centrale elettronucleare
da 1GWe “brucia” l’uranio
lentamente: bastano
circa 47 mg di uranio-235 al secondo,
~1,3 t all’anno
per produrre annualmente ~ 26 TWh**

**il fattore 20 milioni fra energia
chimica e energia di fissione è
mostruoso**

un rapporto non percepibile

rende qualitativa la differenza



Il fattore 20 milioni

10 ombre al giorno

4.000 all'anno

per 20 milioni servono 5.000 anni

o

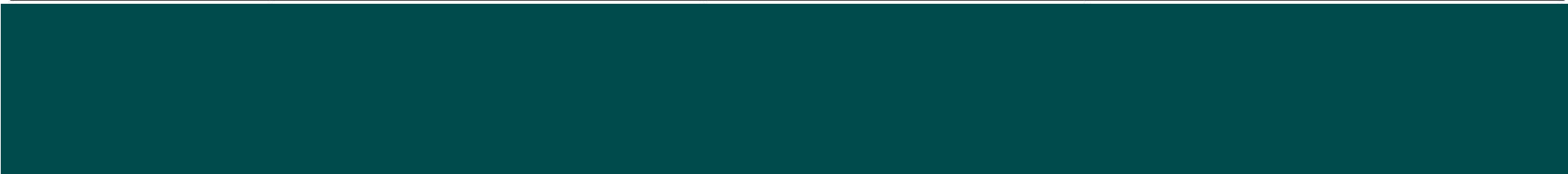
**l'impegno degli 8 reggimenti alpini per nove
mesi**

Il fattore 20 milioni

- quantità minime di combustibile
- quantità minime di scorie
- ⇒ limitati trasporti di materiale
- enorme concentrazione di potenza
- ⇒ problemi di sicurezza
- ⇒ alti costi d'impianto
- ⇒ personale altamente qualificato



Fonte di Energia	Combustibile necessario per una centrale da 1000 MW in un anno	Superficie usata in media per una centrale da 1000 MW (km ²)	Comenti
Biomassa	30.000 km ² di boschi	30.000	
Eolico	2.700 turbine eoliche da 1,5MW	490	
Solare fotovoltaico	23 km ² di pannelli solari	23	Situato vicino all'equatore
Biogas	60 milioni di maiali	600	I maiali sono allevati per la carne. L'energia è extra.
Gas Naturale	1,2 km ³	1	
Petrolio	1.400.000 tonnellate	1	10 milioni di barili di petrolio o 100 petroliere
Carbone	2.500.000 tonnellate	1+ minas	26.260 vvagoni ferroviari
Fissione nucleare	35 tonnellate di ossido di uranio	1+ minas	Da 210 tonnellate di minerale di uranio
Fusione	100 kg di deuterio e 150 kg di trizio	1+ minas	Da 2850 m ³ di acqua e 10 tonnellate di minerale di litio



The following figures may be regarded as typical for the annual operation of a 1000 MWe nuclear power reactor:^a

Mining	20,000 tonnes of 1% uranium ore
Milling	230 tonnes of uranium oxide concentrate (which contains 195 tonnes of uranium)
Conversion	288 tonnes uranium hexafluoride, UF ₆ (with 195 t U)
Enrichment	35 tonnes enriched UF ₆ (containing 24 t enriched U) - balance is 'tails'
Fuel fabrication	27 tonnes UO ₂ (with 24 t enriched U)
Reactor operation	8640 million kWh (8.64 TWh) of electricity at full output
Used fuel	27 tonnes containing 240 kg plutonium, 23 t uranium (0.8% U-235), 720kg fission products, also transuranics.

scorie radioattive prodotte annualmente da una centrale da 1GWe

- 200-300 t di bassa o media radioattività dalla manutenzione
- di alta radioattività dal combustibile esausto
 - # 20 m³ (27 t) → 75 m³ incapsulati se rifiuti
 - # 3 m³ → 28 m³ vetrificati se riprocessati
- da una centrale a carbone 400.000 t di ceneri

Costi dell'energia elettronucleare

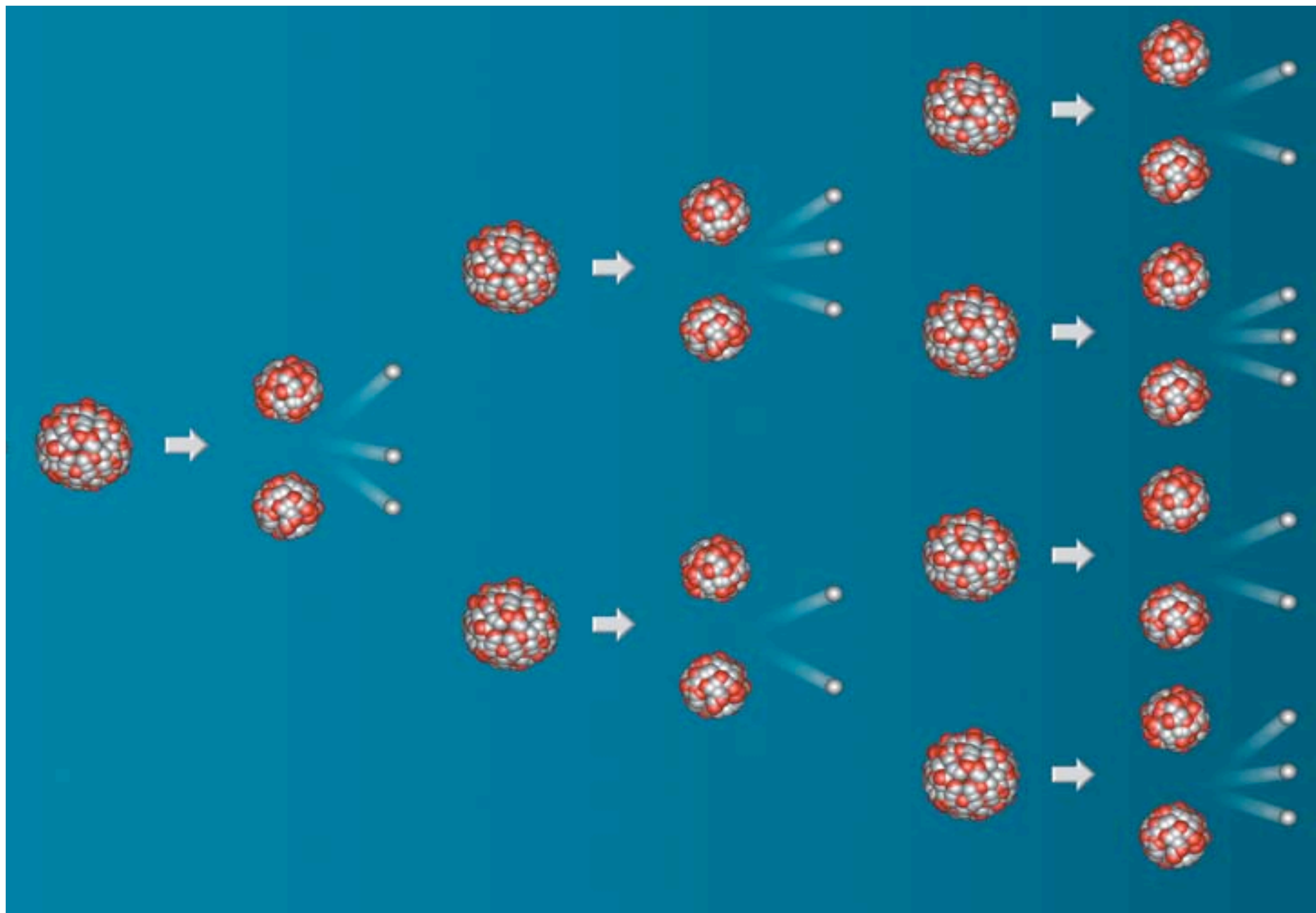
- alto costo dell'impianto
 - # 25-30% per le sicurezze
 - # 10% per lo smantellamento
 - # 10% per la gestione delle scorie
 - # # 55% del costo totale in 40 anni di esercizio
- relativamente basso costo d'esercizio

In January 2007, the approx. US \$ cost to get 1 kg of uranium as UO_2 reactor fuel at likely contract prices (about one third of current spot price):

Uranium:	8.9 kg U_3O_8 x \$53	US\$ 472
Conversion:	7.5 kg U x \$12	US\$ 90
Enrichment:	7.3 SWU x \$135	US\$ 985
Fuel fabrication:	per kg	US\$ 240
Total, approx:		US\$ 1787

At 45,000 MWd/t burn-up this gives 360,000 kWh electrical per kg, hence fuel cost: 0.50 c/kWh.

**un reattore da 1GWe “brucia”
circa 47 mg di uranio-235 al secondo,
ossia ci sono $1,21 \times 10^{20}$ fissioni al secondo
e servono $1,21 \times 10^{20}$ neutroni liberi al
secondo
non esiste modo di fornirli dall'esterno
vengono generati nel combustibile
poiché la reazione procede “a catena”**





Condizioni per una reazione a catena

- in ogni fissione deve venir generato più di un neutrone
- i neutroni devono interagire con i nuclei fissili; anche se questi materiali sono molto densi, gli atomi sono quasi tutti vuoti e i neutroni possono sfuggire senza trovare nuclei fissili sul loro cammino
- a seguito dell'interazione devono produrre fissione e non processi alternativi
- i neutroni non devono venir assorbiti da impurità

Il parametro caratteristico della reazione a catena è il fattore k di moltiplicazione dei neutroni:

k = rapporto fra il numero di neutroni nella generazione corrente e quello nella generazione precedente

$k < 1$ condizione sottocritica

la reazione a catena si spegne

$k = 1$ condizione critica

la reazione a catena si mantiene

$k > 1$ condizione supercritica

la reazione a catena cresce fuori controllo

massa critica

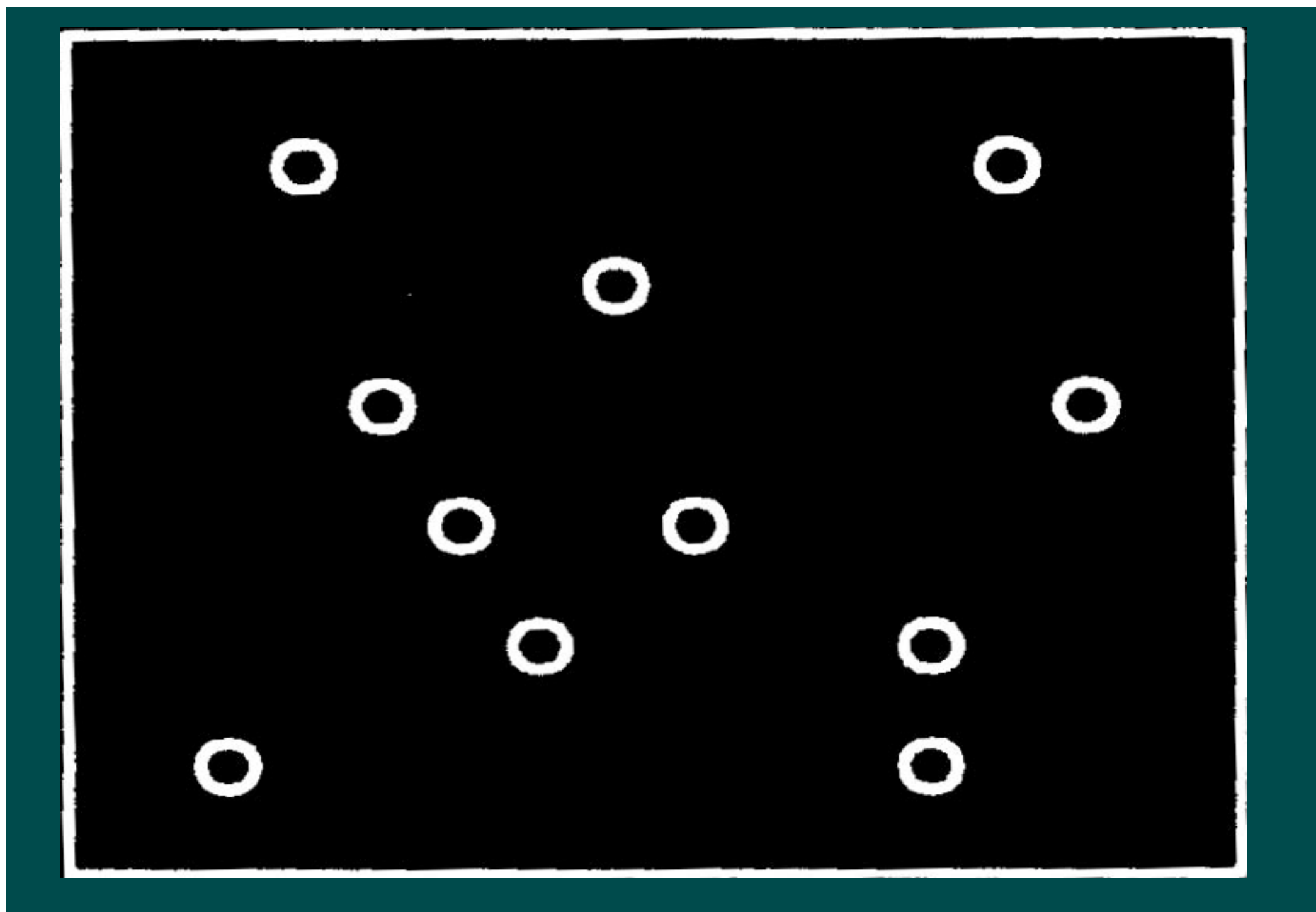
i neutroni devono incontrare abbastanza nuclei fissili sul loro cammino prima di uscire dal materiale

- alta densità del materiale
- sufficiente massa
- riflettore di neutroni attorno al materiale

la minima quantità di materiale sufficiente costituisce la “massa critica”

visuale dei neutroni nell'uranio

- il raggio dei nuclei è ~ 12 fm
 - la densità dell'uranio è ~ 19 g/cc
 - il numero di nuclei di uranio per cc è $\sim 4,9 \cdot 10^{22}$
 - la distanza fra nuclei è $\sim 2,7 \cdot 10^{-10}$ m
- $\sim 22\,000$ volte il raggio del nucleo



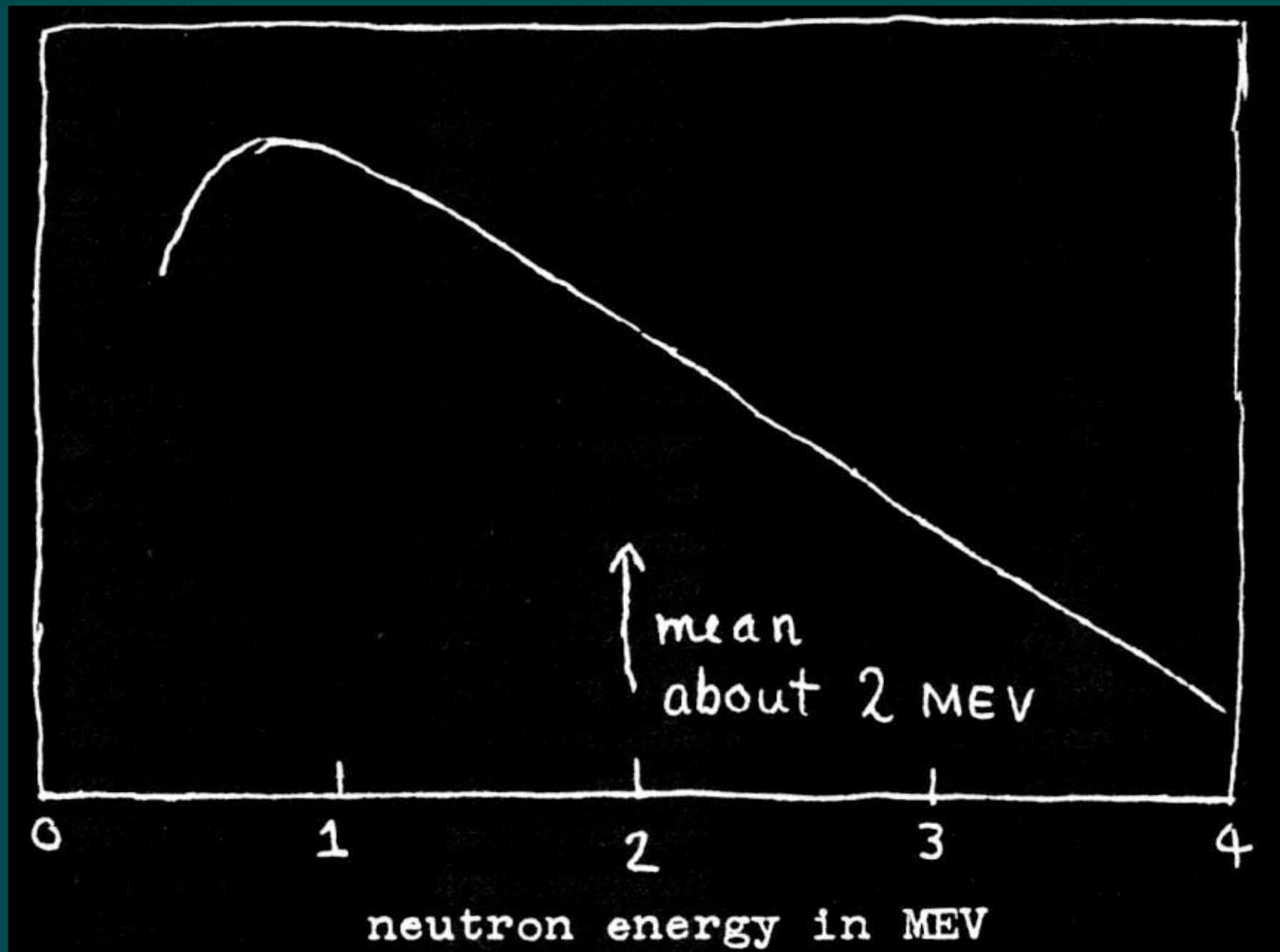
Processi alternativi nell'interazione neutrone-uranio

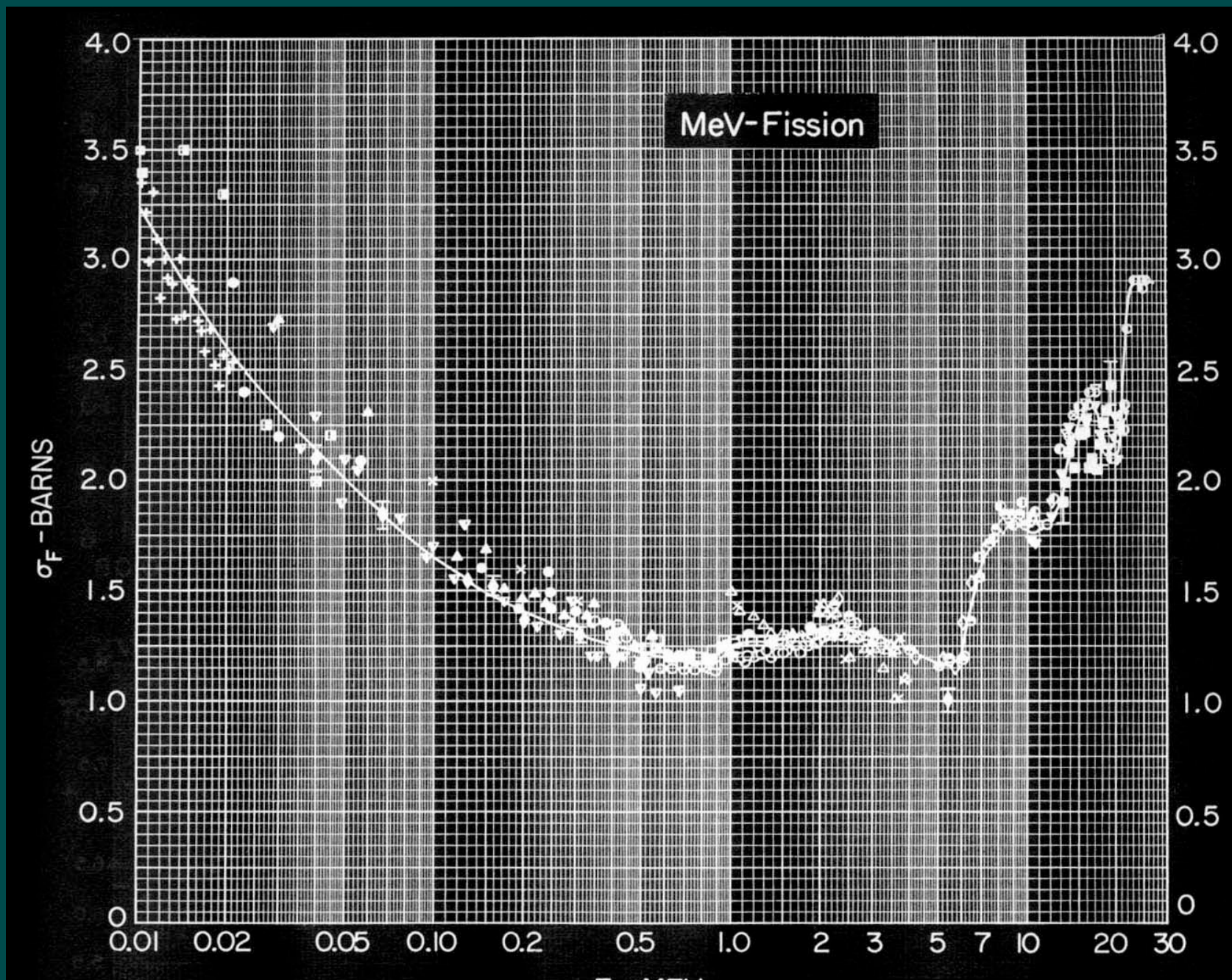
- diffusione elastica
 - diffusione con perdita di energia
 - assorbimento senza fissione
 - reazioni nucleari
-
- ogni processo avviene con una precisa probabilità
 - le probabilità dipendono dall'energia del neutrone

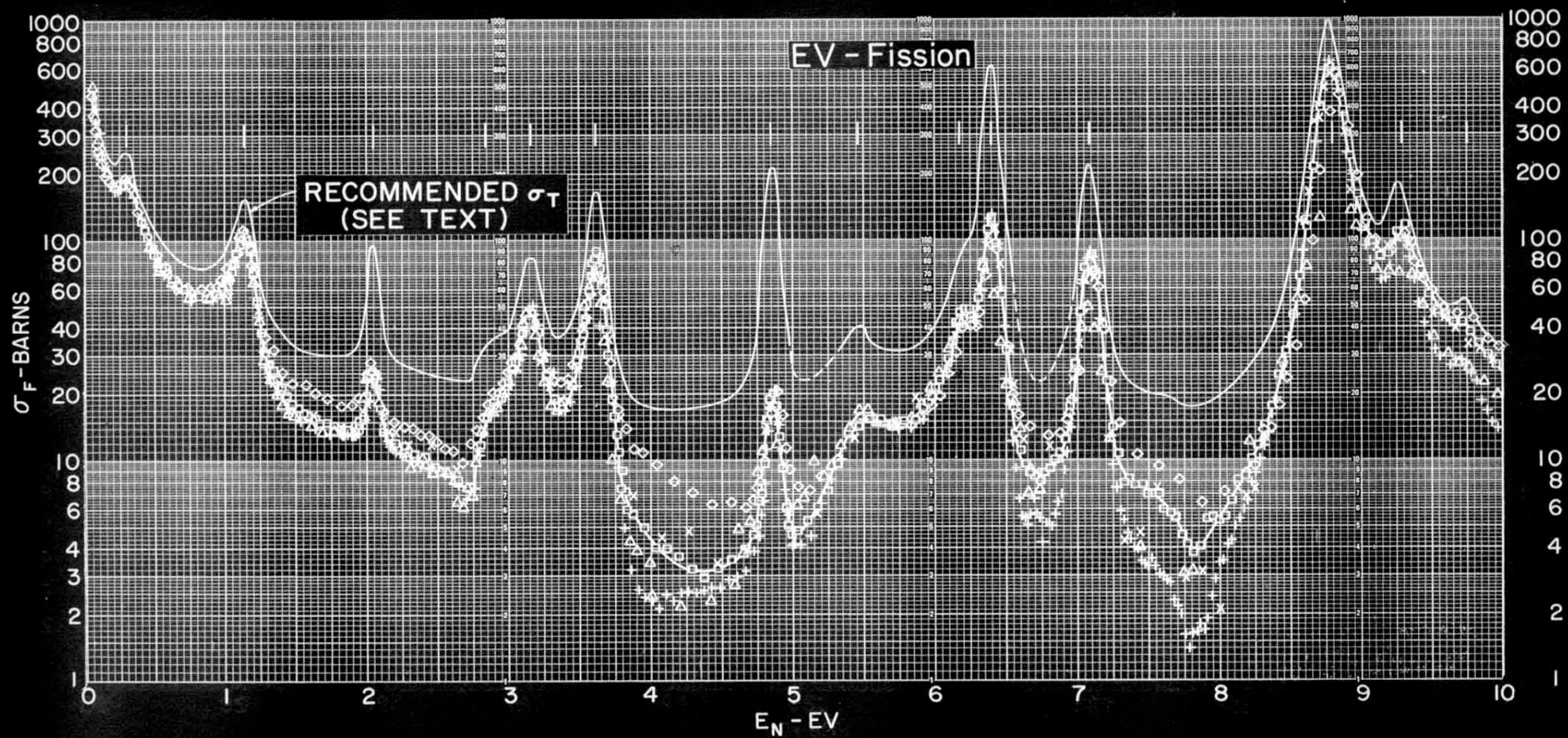
	neutroni termici			neutroni veloci		
isotopo	σ fissione	σ cattura	rapporto % fissione/totale	σ fissione	σ cattura	rapporto % fissione/totale
U-233	530	45	90	1,9	0,3	80
U-235	579	100	85	2,0	0,5	80
U-238	-	3	-	0,05	0,3	17
Pu-239	741	267	74	1,9	0,6	76
Pu-240	-	290	-	0,4	0,6	40
Pu-241	1009	368	73	2,6	0,6	81
Pu-242	-	19	-	0,3	0,4	43
Am-241	3	832	0,4	0,4	1,9	17

Neutroni veloci e neutroni termici

- i neutroni emessi nella fissione sono “veloci”
 - energia media 2 MeV
 - velocità media 20 000 km/s
- neutroni “termici” hanno l’energia dell’agitazione alla temperatura ambiente
 - energia media 0,025 eV
 - velocità media < 2 km/s







arricchimento o moderazione

la via delle bombe e quella dei reattori

uranio-235

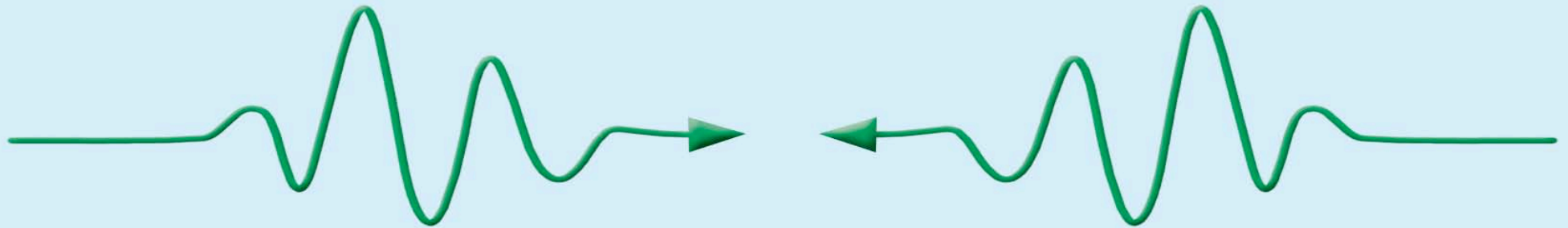
probabilità di fissione ed energia dei neutroni

neutroni termici

sigma-fissione 579 sigma-cattura 100

neutroni veloci

sigma-fissione 2,0 sigma-cattura 0,5



pacchetti d'onda grossi



pacchetti d'onda piccoli

Lunghezza d'onda dei neutroni veloci e termici

$$\lambda = (h/2\pi)/mv = (hc/2\pi)/mc^2 \cdot c/v$$

$$(hc/4\pi)/mc^2 = 0,21 \text{ fm}$$

×

neutroni veloci

$$c/v = 15 \quad \lambda \sim 20 \text{ fm}$$

neutroni termici

$$c/v = 150 \times 10^{-3} \quad \lambda \sim 197 \times 10^3 \text{ fm} \sim 1.97 \times 10^{-10} \text{ m}$$

termalizzare i neutroni

- diffondere i neutroni da nuclei leggeri:
idrogeno, deuterio, carbonio
- ridurre al minimo l'assorbimento
- inserire l'uranio in un moderatore:
acqua / acqua pesante/ grafite
struttura di molti metri cubi
- aspettare che avvengano gli urti necessari:
18 con idrogeno, 31 con deuterio, 118 con
carbonio; 40 μ s di intervallo fra
due interazioni successive con uranio

il fattore tempo e la bomba

- un neutrone impiega tipicamente $0,01\mu\text{s}$ a interagire con un nucleo
- dopo 40 generazioni ($0,4\mu\text{s}$) l'energia prodotta diventa enorme e il materiale si riscalda a $\sim 40 \times 10^6\text{ }^\circ\text{C}$ e tende a sublimare e a disperdersi a $\sim 10^6\text{ m/s}$
- un'espansione di pochi centimetri basta a diminuire la densità sotto il limite critico e a spegnere la reazione a catena
- del borraggio attorno all'uranio rallenta l'espansione
- la catena deve avvenire entro $\sim 0,5\mu\text{s}$

non c'è tempo per termalizzare i neutroni

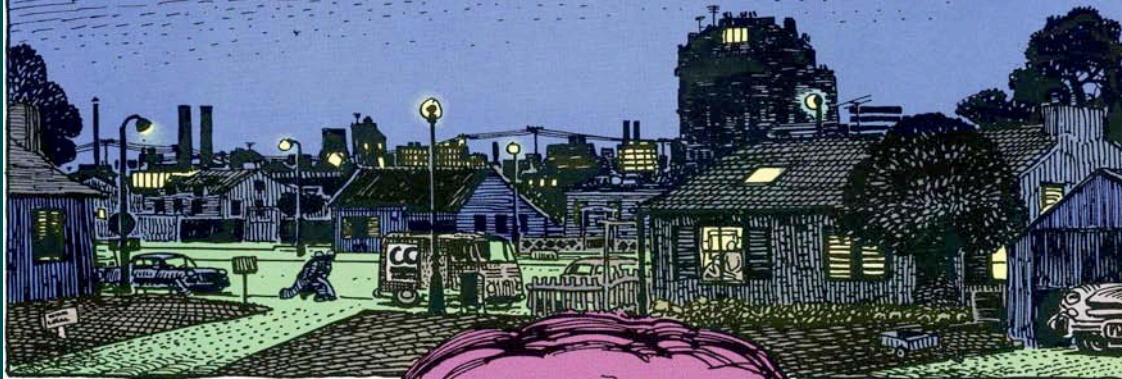
le via della bomba

- neutroni veloci senza moderatore
- bassa frequenza di fissioni
- bassa efficienza
- materiale estremamente arricchito in uranio-235
(uranio militare arricchito a oltre il 90%)
- dimensioni compatte
- reazione veloce libera
- esplosione della bomba

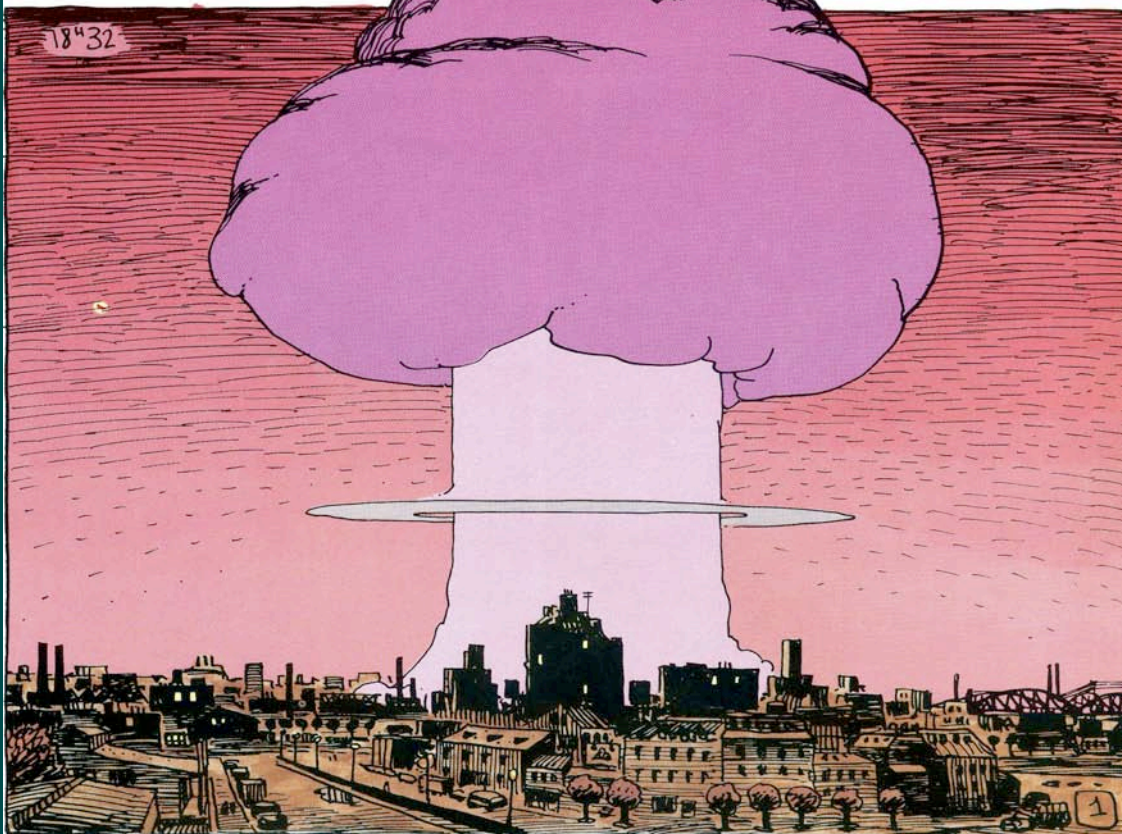
VARIATION N°4070 SUR "LE" THEME

15 OCTOBRE 18^h30

PAR
MOE
BUS



18^h32



le via del reattore

neutroni termici con un moderatore

- alta frequenza di fissioni
- alta efficienza
- uranio naturale o poco arricchito ($LEU < 5\%$)
- reazione lenta e controllata
- il calore prodotto estratto da un refrigerante
- grandi dimensioni
- produzione di energia elettrica in una centrale termica
- una reazione nucleare esplosiva è impossibile

nei reattori la reazione deve mantenersi in modo controllato, né spegnersi, né, soprattutto, divergere

la condizione $k = 1$ è instabile e richiederebbe continui delicati aggiustamenti

- rischioso e inaccettabile da ogni buon ingegnere

- i reattori “salvati” dai neutroni ritardati

 - lo 0,65% dei neutroni sono emessi dopo ~ 10 s

- si può operare in condizione sottocritica lasciando ai neutroni ritardati il compito di mantenere la reazione a catena

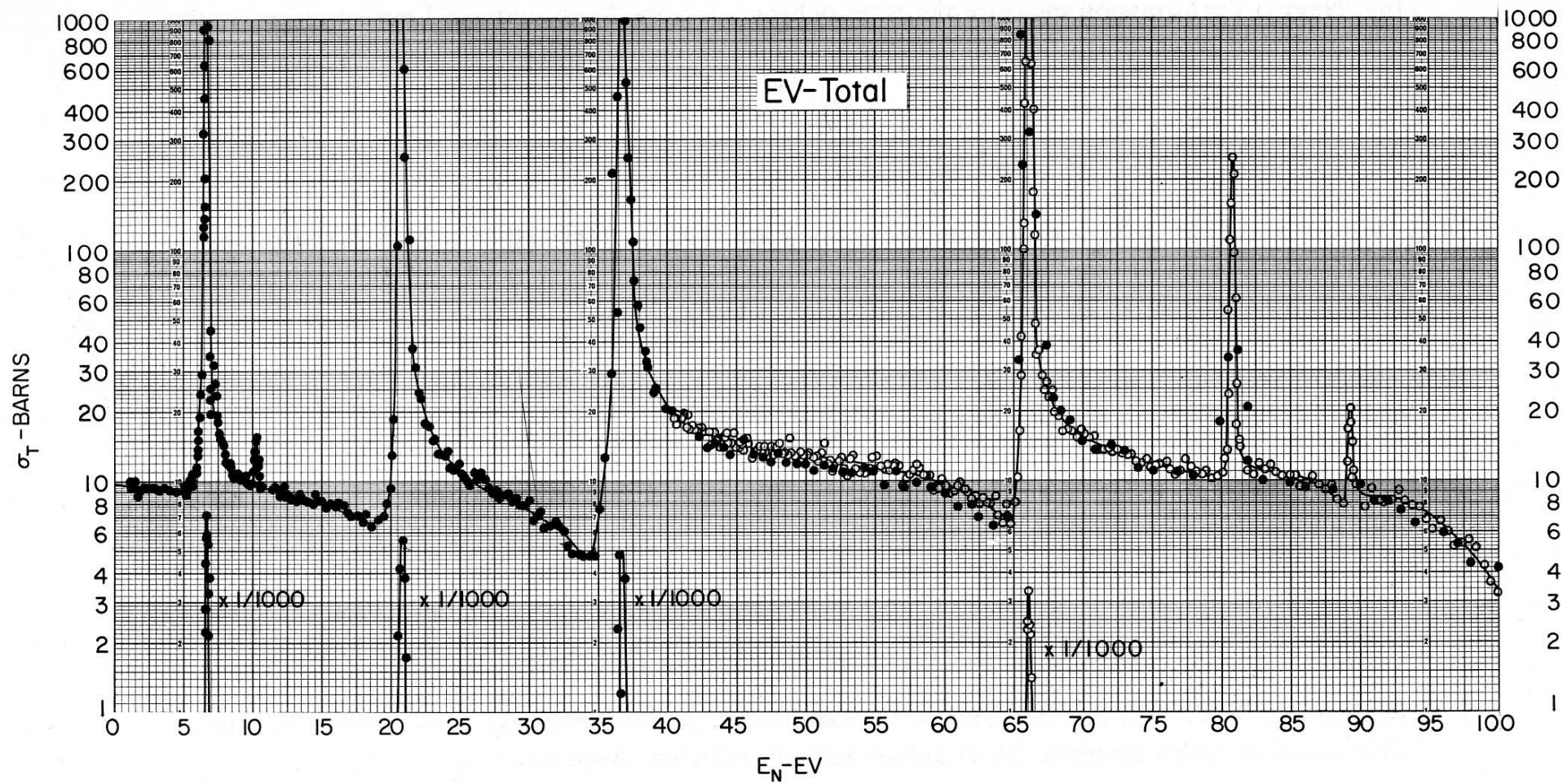


NOEBIUS

fattore intrinseco di sicurezza

**se la reazione inizia a divergere ($k > 1$)
o viene meno il refrigerante**

- l'uranio-238 si riscalda e cresce l'agitazione termica delle molecole**
- l'assorbimento risonante di neutroni avviene non solo per energie "speciali" ma per ampi valori di energia (effetto Doppler)**
- la reazione a catena tende a spegnarsi**



Formula dei “quattro fattori”

$$k_{\infty} = \eta f p \epsilon$$

- k_{∞} *fattore di riproduzione*, rapporto fra il numero di neutroni alla generazione m rispetto a quello della generazione $m - 1$;
- η numero di neutroni veloci emessi per ogni neutrone lento assorbito dall'uranio;
- f *fattore di utilizzazione termica*, frazione dei neutroni termici assorbiti;
- p probabilità di sfuggire alla cattura risonante;
- ϵ *fattore di fissione veloce*, aumento del numero finale di neutroni dovuto alle fissioni prodotte direttamente dai neutroni veloci.

I reattori naturali di Oklo (Gabon)

- 1950 milioni di anni fa
- 17 reattori naturali intermittenti per oltre 150 000 anni
- consumate fra 5 e 6 tonnellate di uranio
- generati 500 gigajoule di energia
(come un reattore nucleare da 1000 MWe in circa 5 anni)

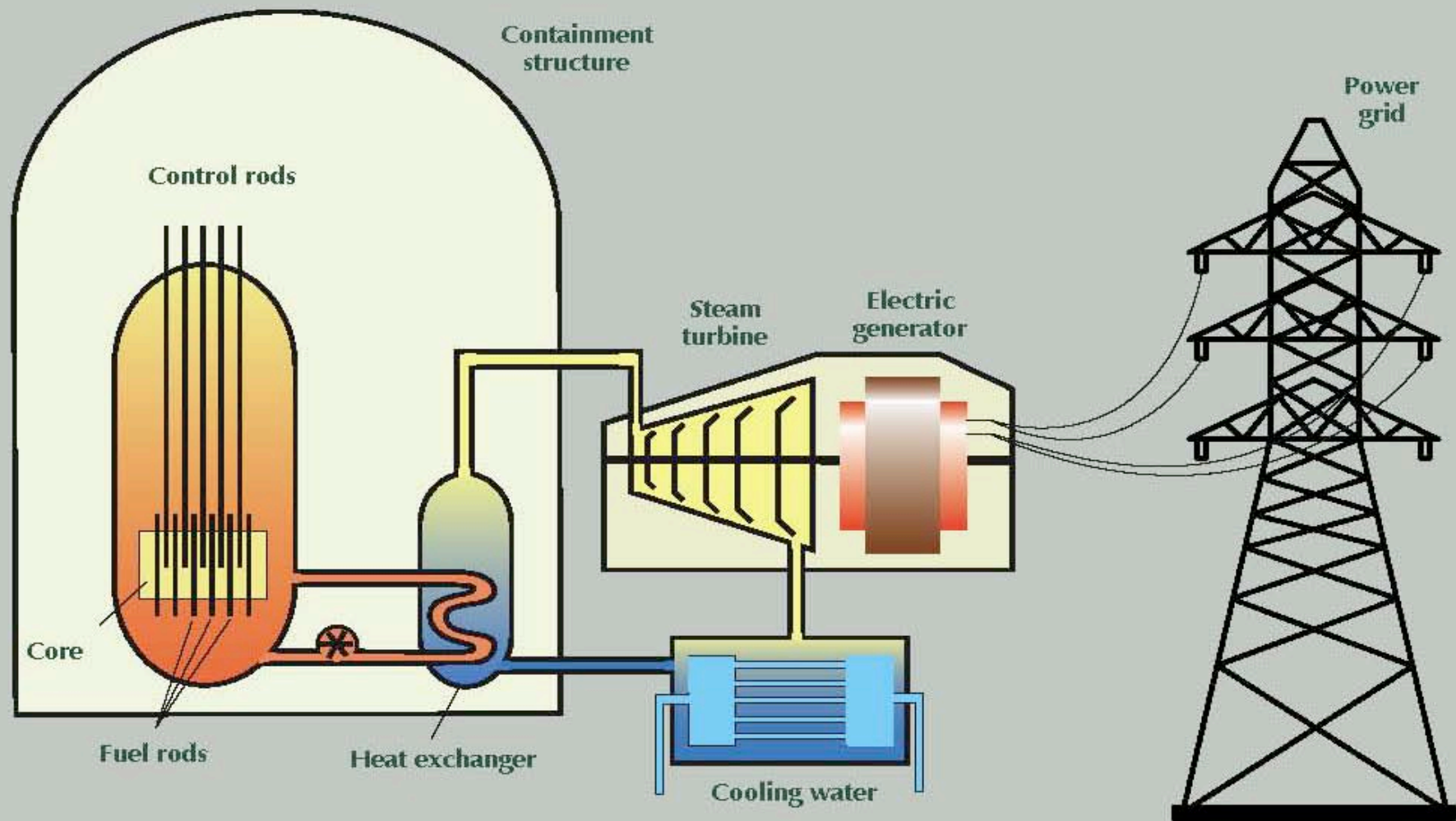


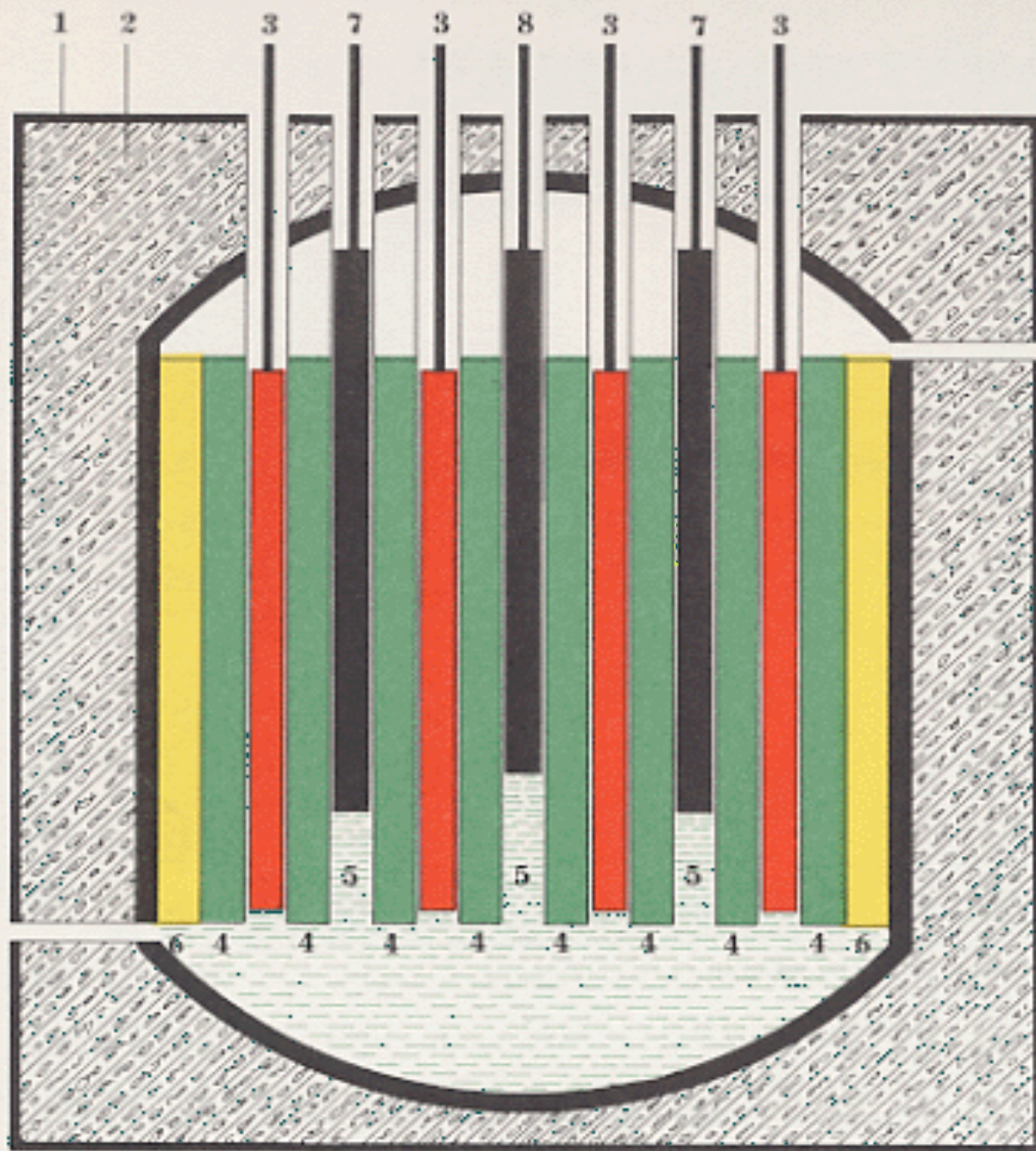
dal nocciolo alla rete

la struttura logica di un impianto elettronucleare

elementi strutturali di una centrale nucleare

- nocciolo ove si sviluppa la reazione a catena e si produce calore
- sistema di estrazione del calore
- schermatura per contenere le radiazioni
- sistemi di regolazione della potenza mediante controllo della reazione a catena
- materiali che riflettano all'interno i neutroni che raggiungono le pareti





Elementi di combustibile

- pastiglie di ossido di uranio UO_2 ceramiche
1 cm diametro e 1,5 cm lunghezza
- barre di combustibile lunghe alcuni metri
in un tubo di zirconio
permeabile ai neutroni e
resistente alla corrosione
- nei reattori ad acqua rifornimento a reattore
spento solitamente ogni 2 anni
- nei reattori a grafite o acqua pesante ogni
elemento estraibile indipendentemente

elementi fondamentali di un reattore elettronucleare

neutroni attivi: termici / veloci

**combustibile: uranio naturale /
uranio arricchito / uranio-plutonio**

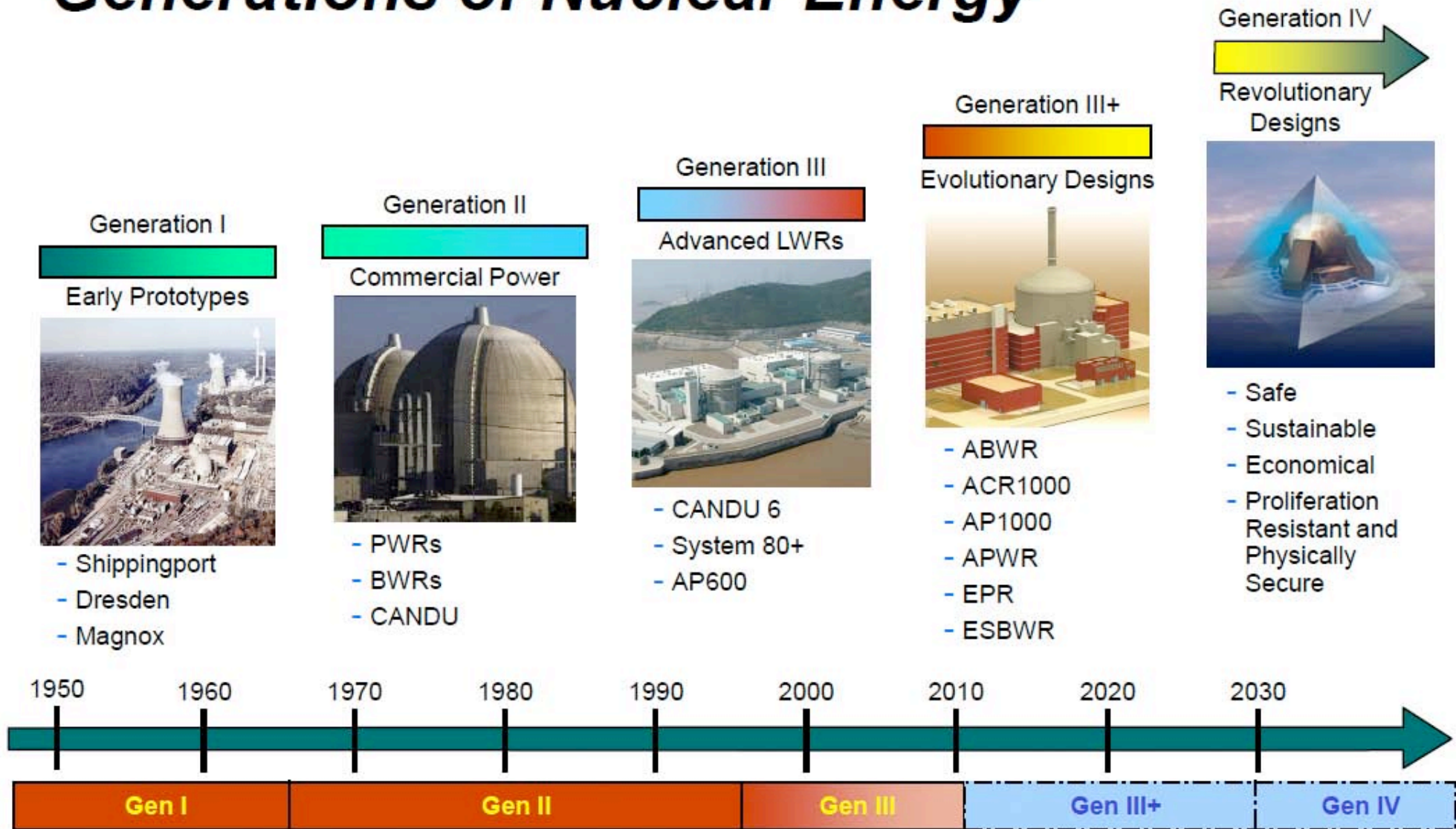
**moderatore: niente / grafite / acqua /
acqua pesante**

**refrigerante: gas / sodio liquido / acqua /
acqua pesante**

Tipi di impianti elettronucleari in operazione

Tipo di reattori	sigla	combustibile	moderatore	refrigerante
Reattori ad acqua pressurizzata	PWR	LEU UO_2	acqua	acqua
Reattori ad acqua bollente	BWR	LEU UO_2	acqua	acqua
Reattori raffreddati a gas	Magnox	U naturale metallico	grafite	CO_2
CANDU	PHWR	UO_2 naturale	acqua pesante	acqua pesante
Reattori ad acqua e grafite	RBMK	LEU UO_2	grafite	acqua
Reattori a neutroni veloci	FBR	UO_2 PuO_2	nessuno	sodio liquido

Generations of Nuclear Energy

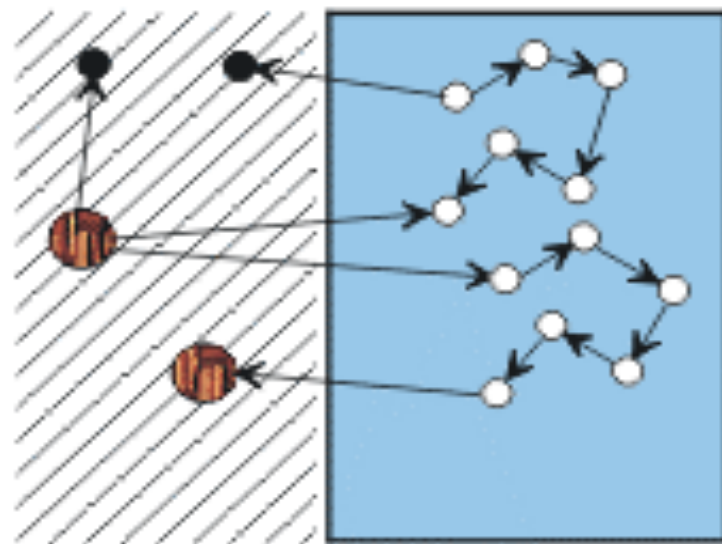


**fattore intrinseco di sicurezza dei reattori moderati e refrigerati ad acqua o acqua pesante:
reazione negativa fra reattività e vapore**

**se la reazione inizia a divergere ($k > 1$)
o viene meno il raffreddamento**

- l'acqua del moderatore si riscalda ed evapora**
- il vapore non è in grado di moderare i neutroni**
- la reazione a catena si spegne**

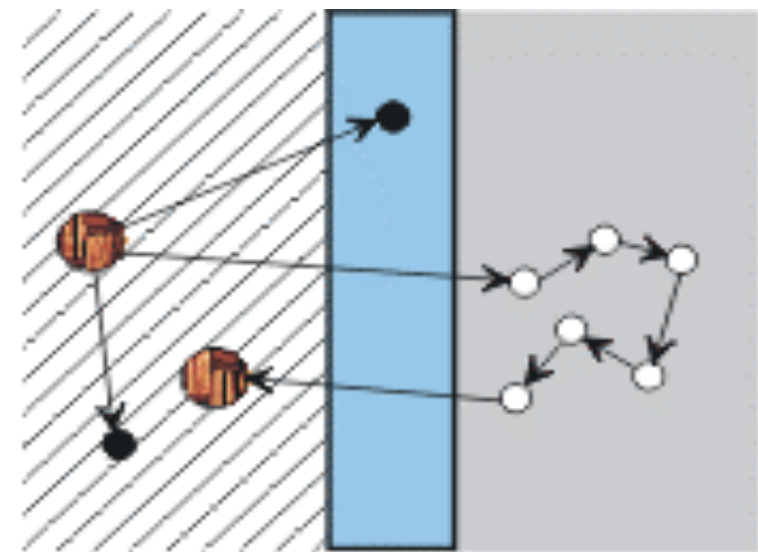
A



Uranium

Water

A

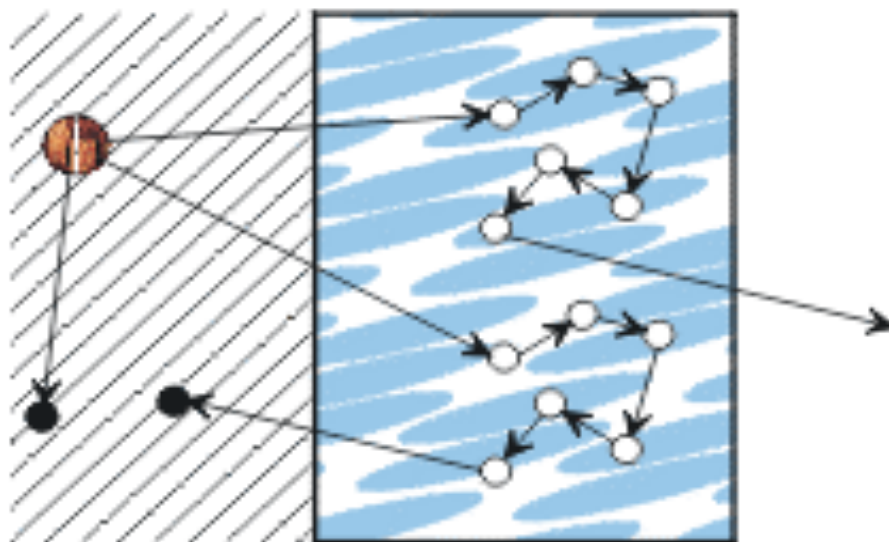


Uranium

Water

Graphite

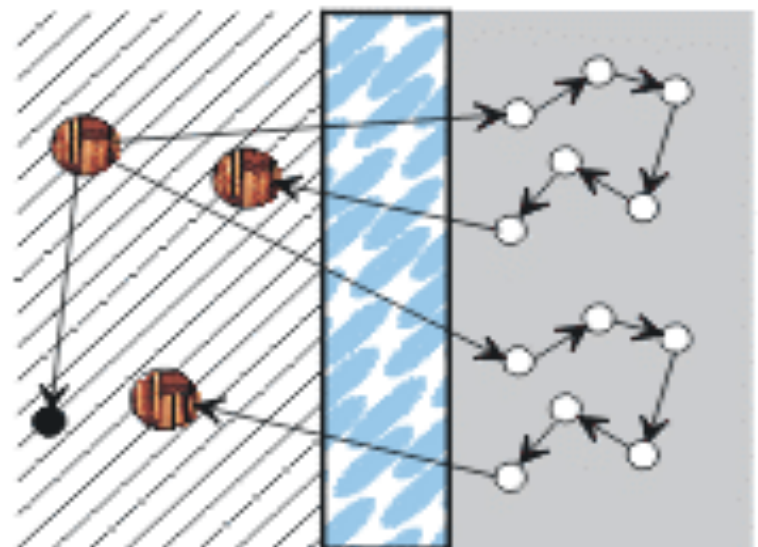
B



Uranium

Water steam

B



Uranium

Steam

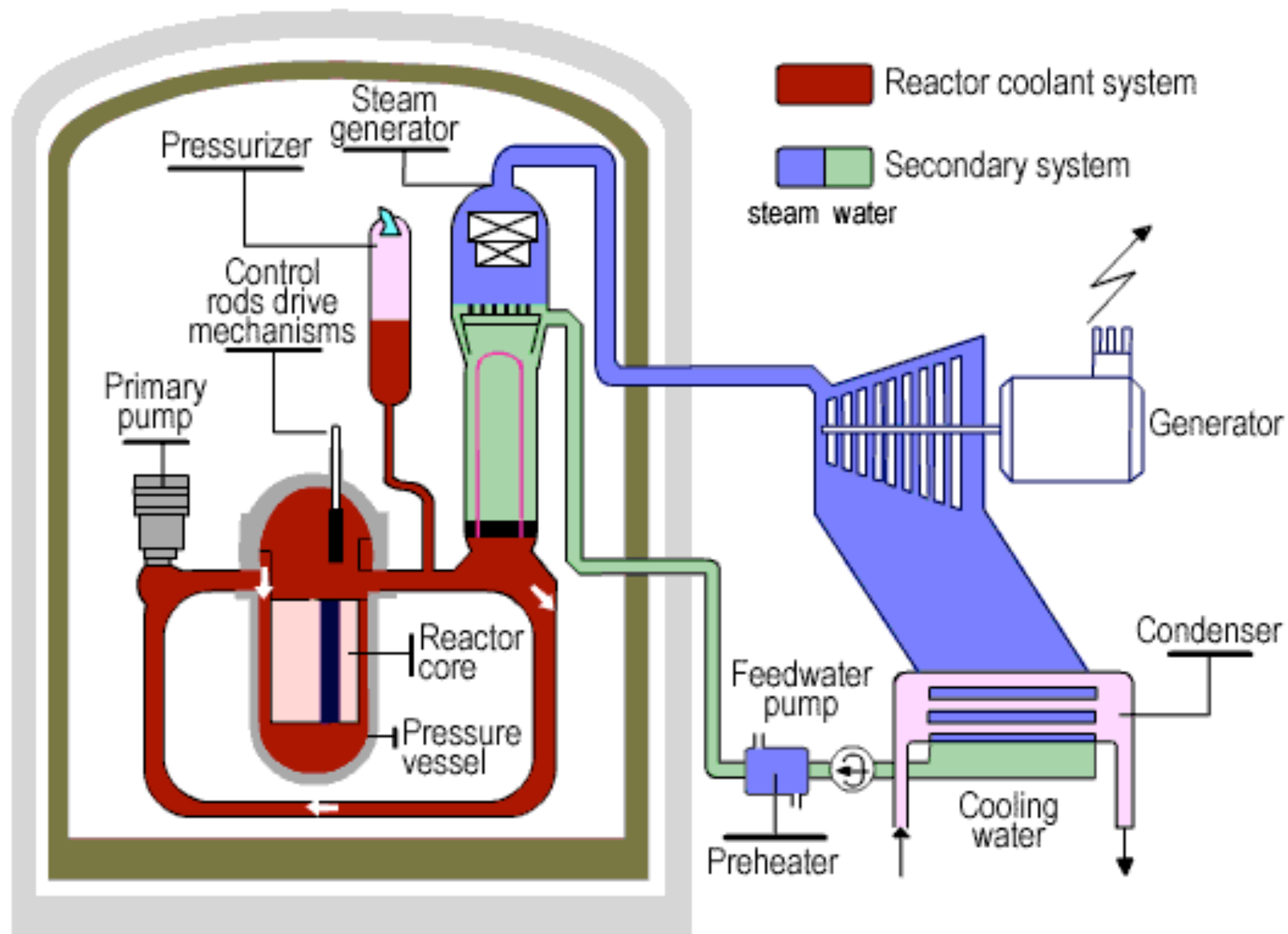
Graphite

Reactors PWR and VVER

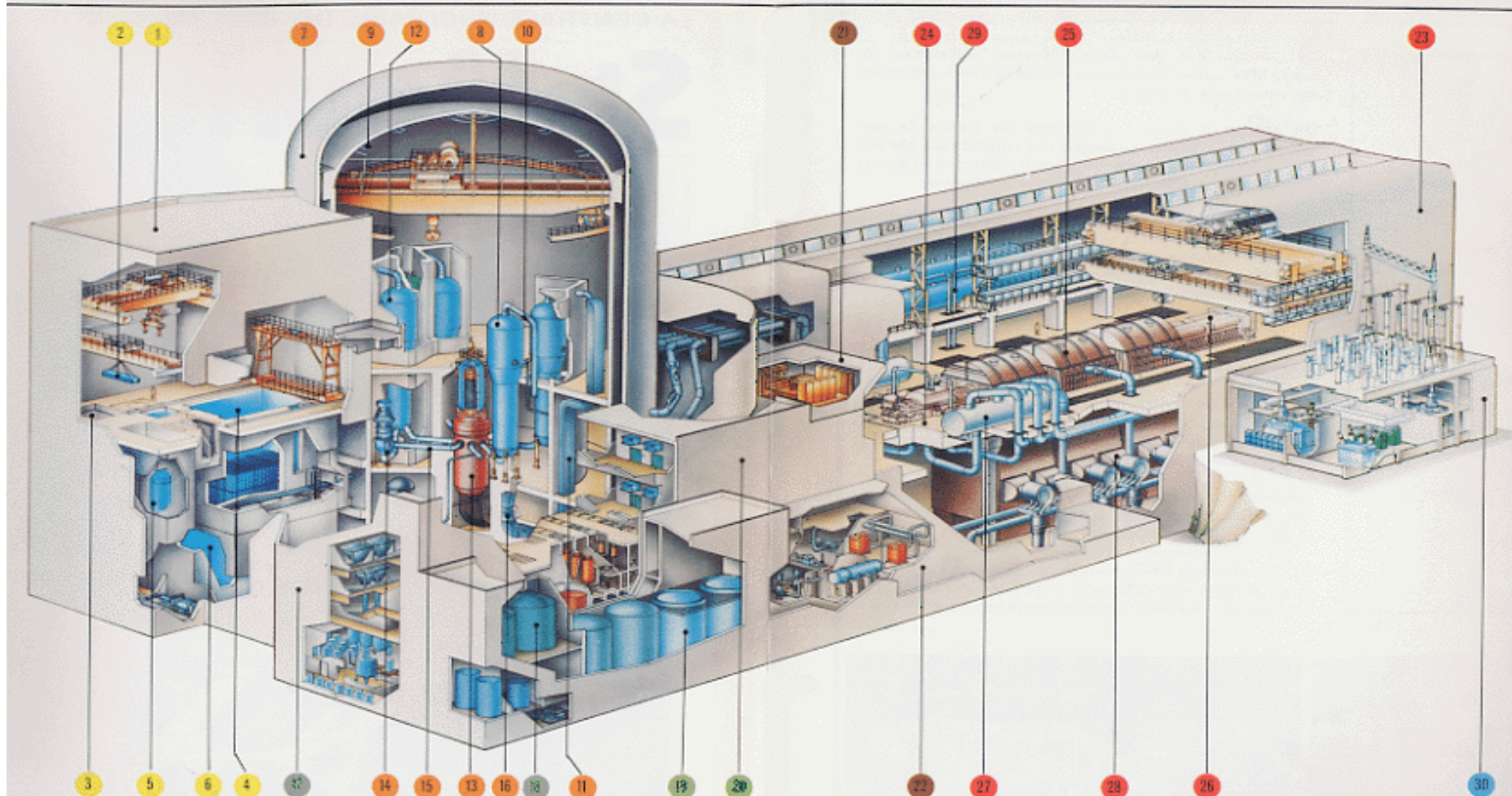
Reactor RBMK (Chernobyl)

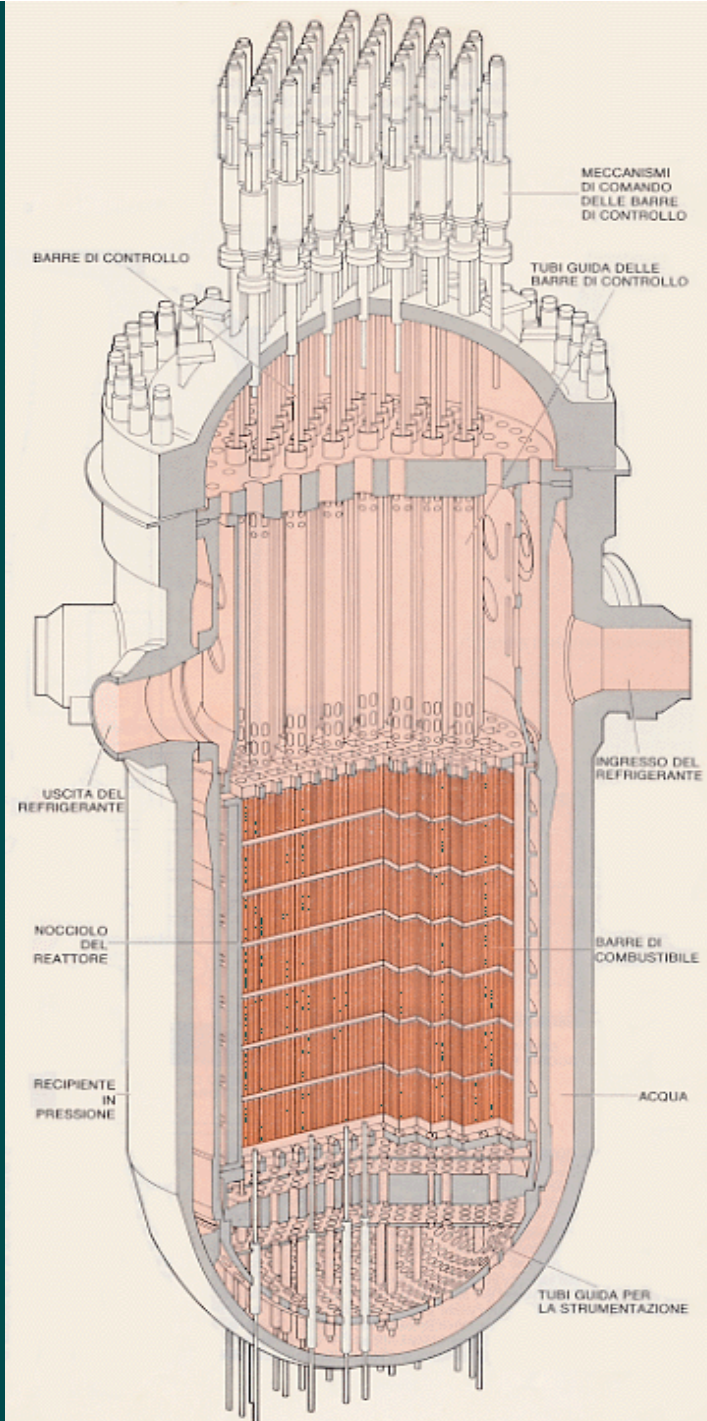
Reattori ad acqua in pressione (PWR)

- originati per reattori navali
- due circuiti di refrigerazione separati
- 150-250 elementi di combustibile composti da 200-300 barre per 80-100 t di uranio
- temperatura dell'acqua ~325 °C
- pressione dell'acqua 150 atmosfere
- nocciolo alto 15 m e diametro 5 m



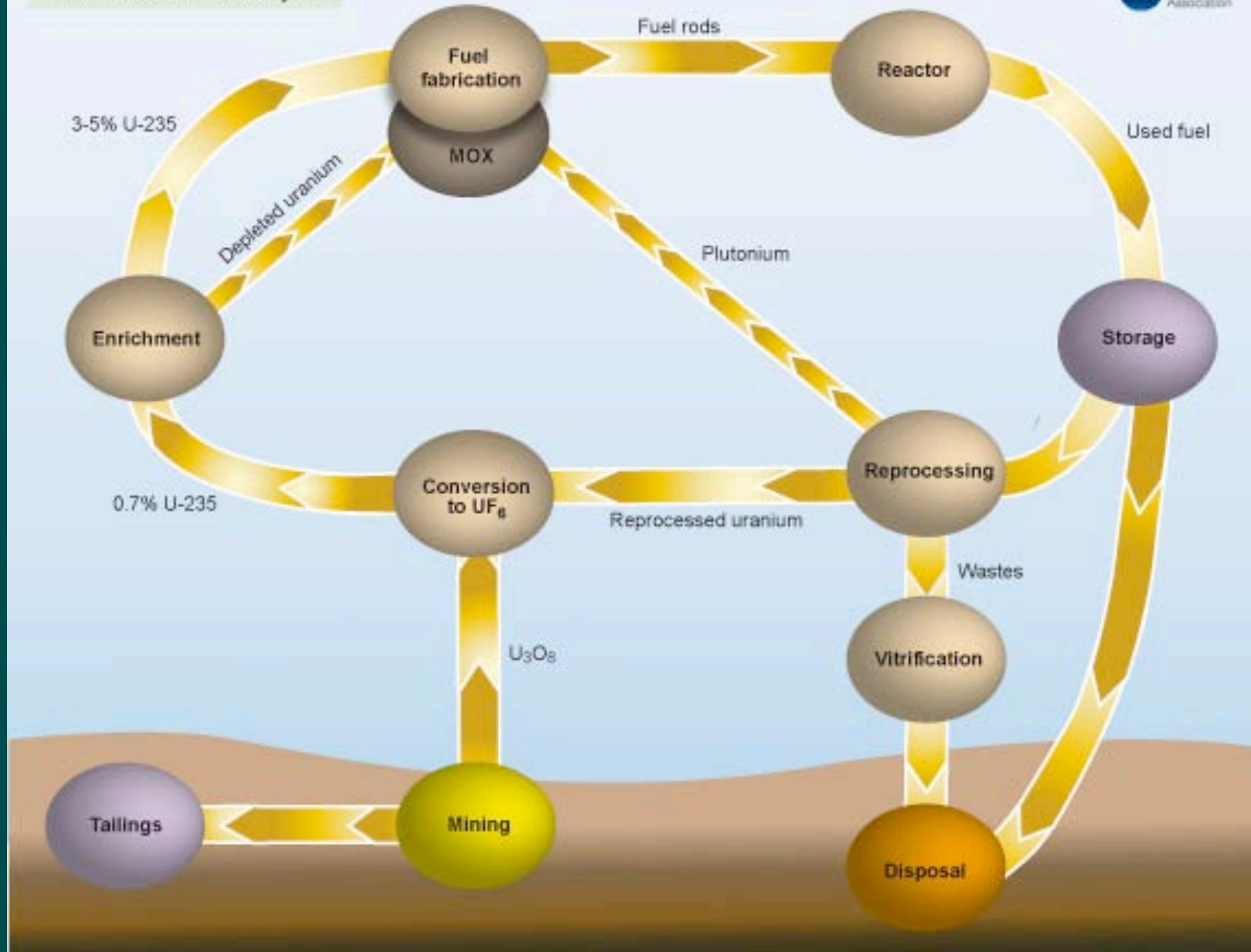
TRANCHE NUCLÉAIRE DE 1300 MW A EAU LÉGÈRE SOUS PRESSION





Ciclo del combustibile

The Nuclear Fuel Cycle



The following figures may be regarded as typical for the annual operation of a 1000 MWe nuclear power reactor:^a

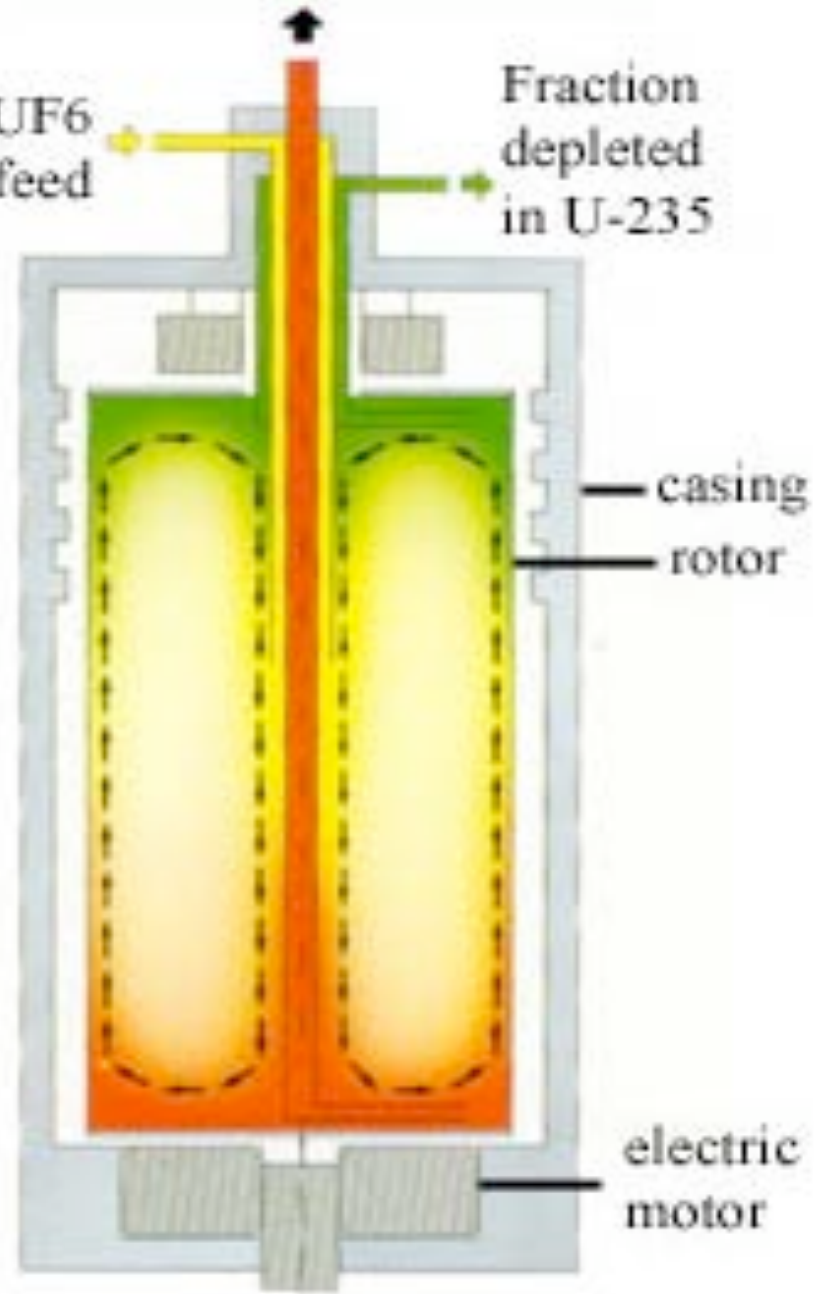
Mining	20,000 tonnes of 1% uranium ore
Milling	230 tonnes of uranium oxide concentrate (which contains 195 tonnes of uranium)
Conversion	288 tonnes uranium hexafluoride, UF ₆ (with 195 t U)
Enrichment	35 tonnes enriched UF ₆ (containing 24 t enriched U) - balance is 'tails'
Fuel fabrication	27 tonnes UO ₂ (with 24 t enriched U)
Reactor operation	8640 million kWh (8.64 TWh) of electricity at full output
Used fuel	27 tonnes containing 240 kg plutonium, 23 t uranium (0.8% U-235), 720kg fission products, also transuranics.



Fraction enriched in U-235

UF₆
feed

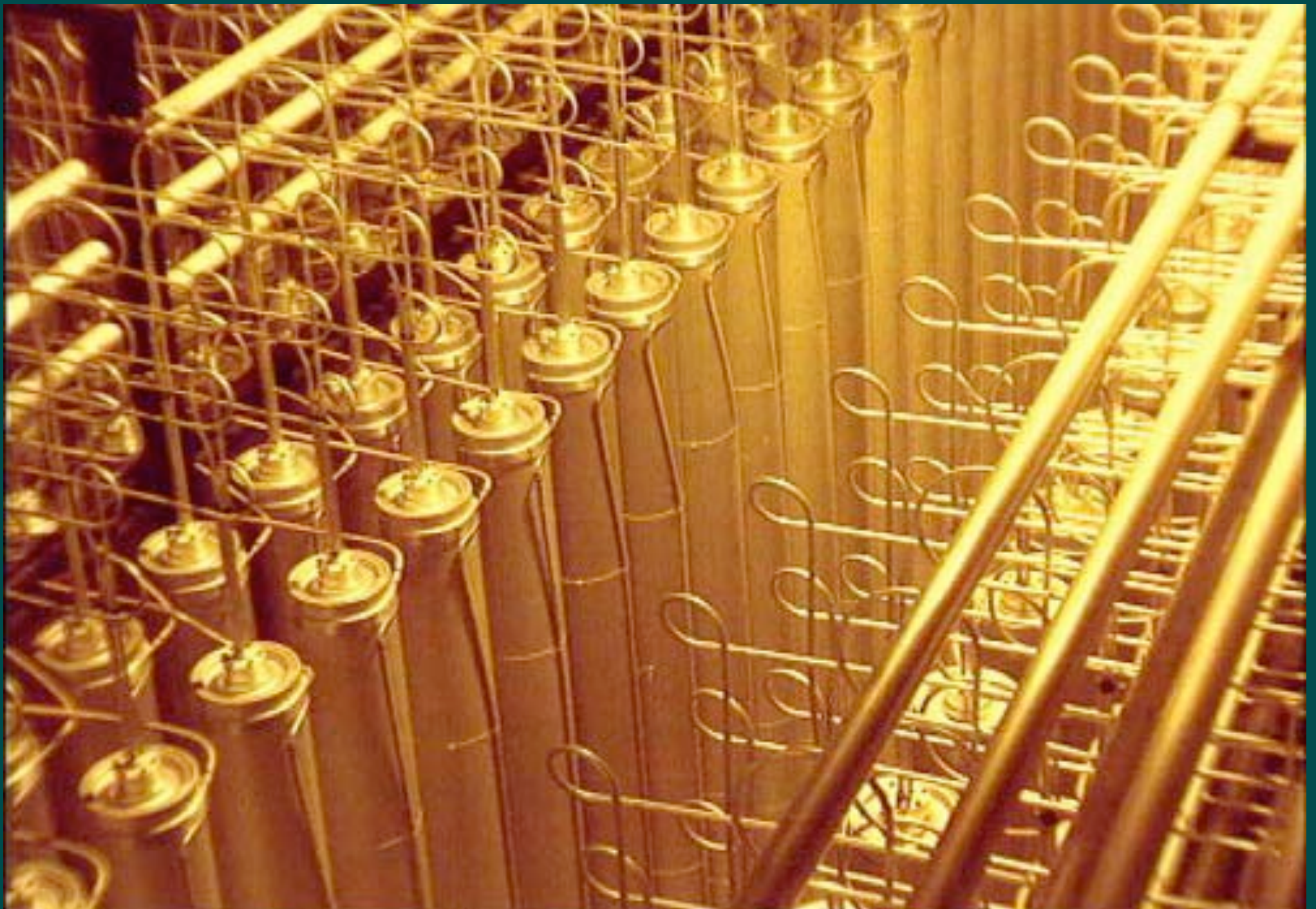
Fraction
depleted
in U-235



casing

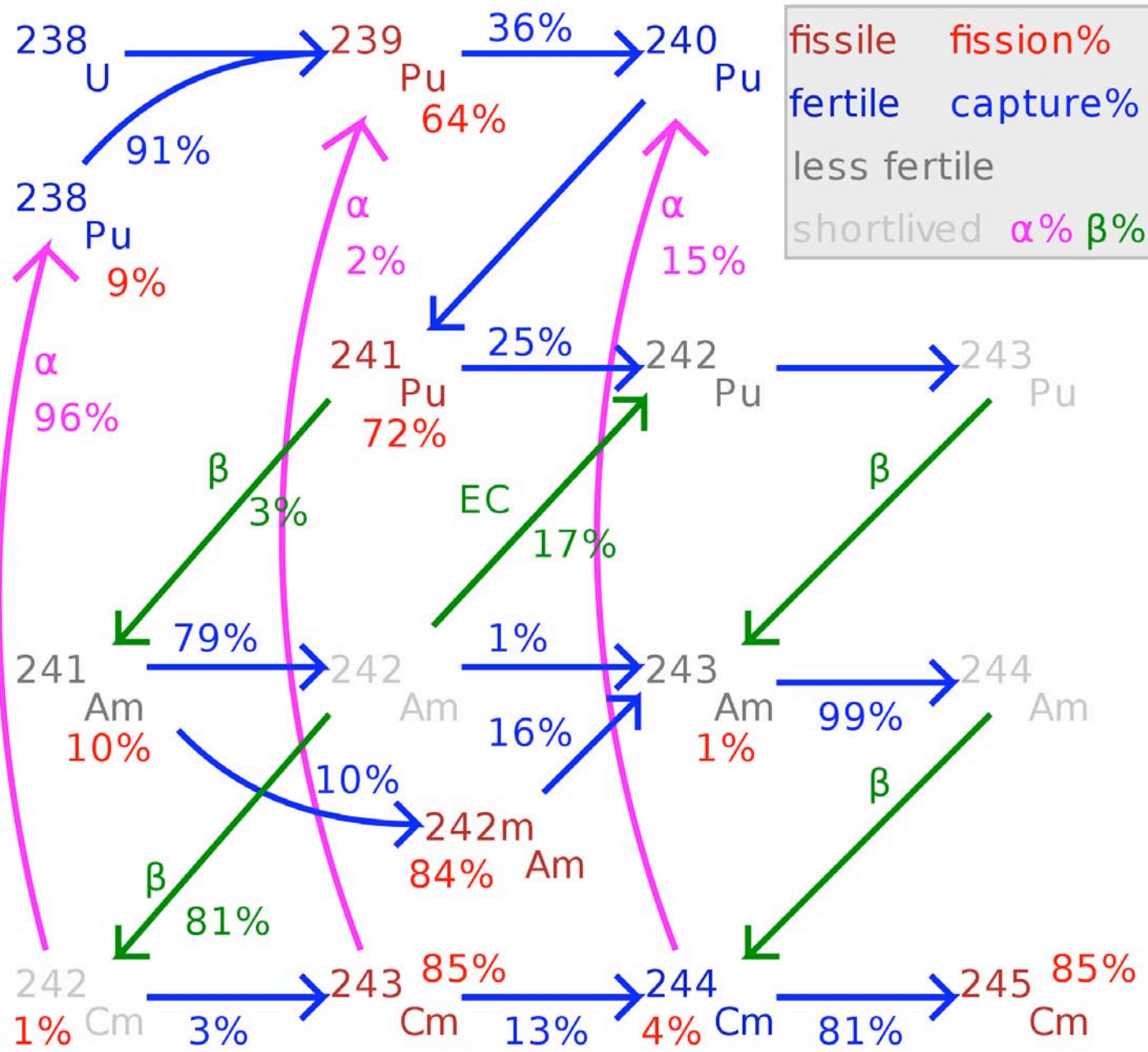
rotor

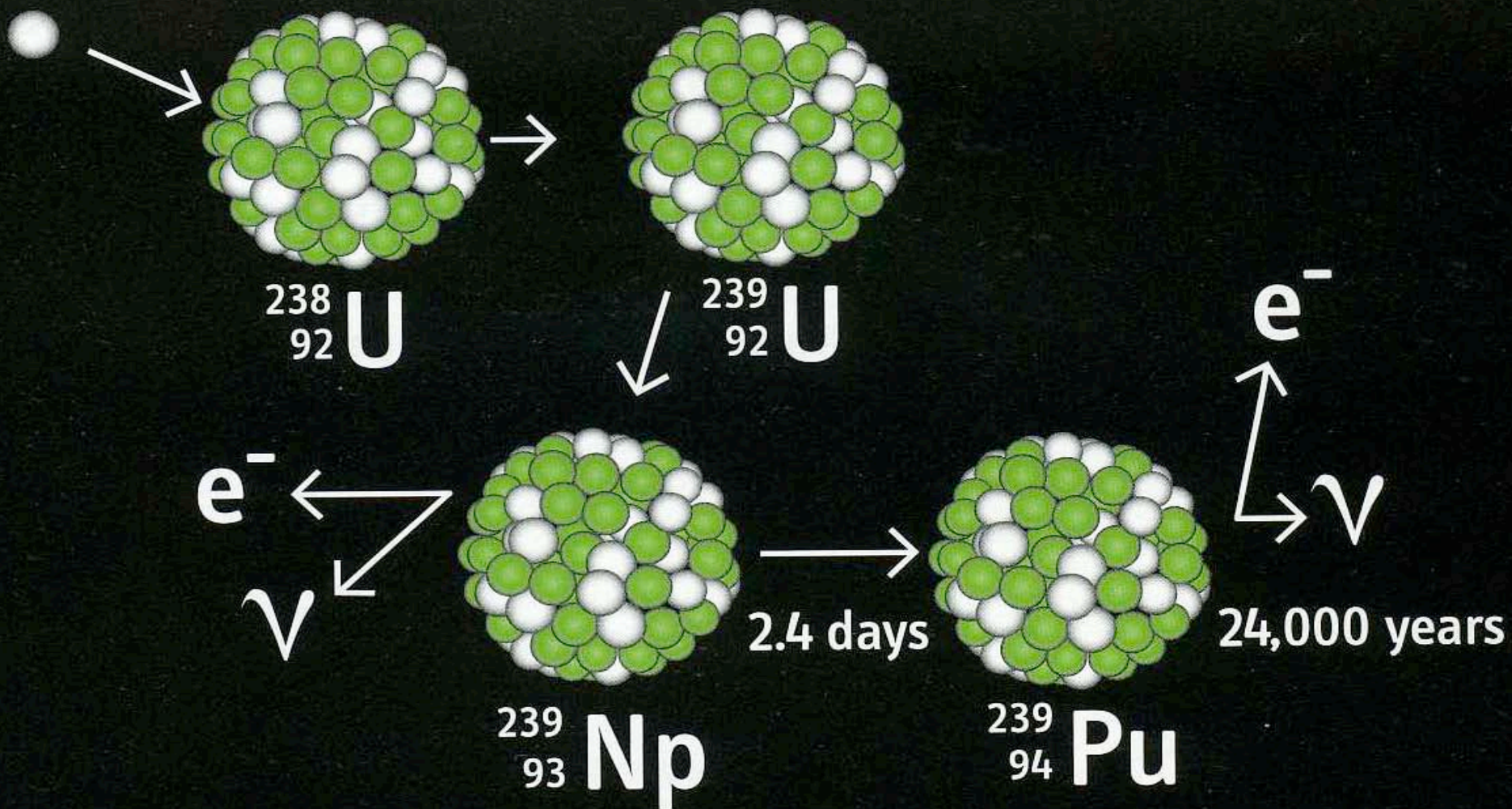
electric
motor



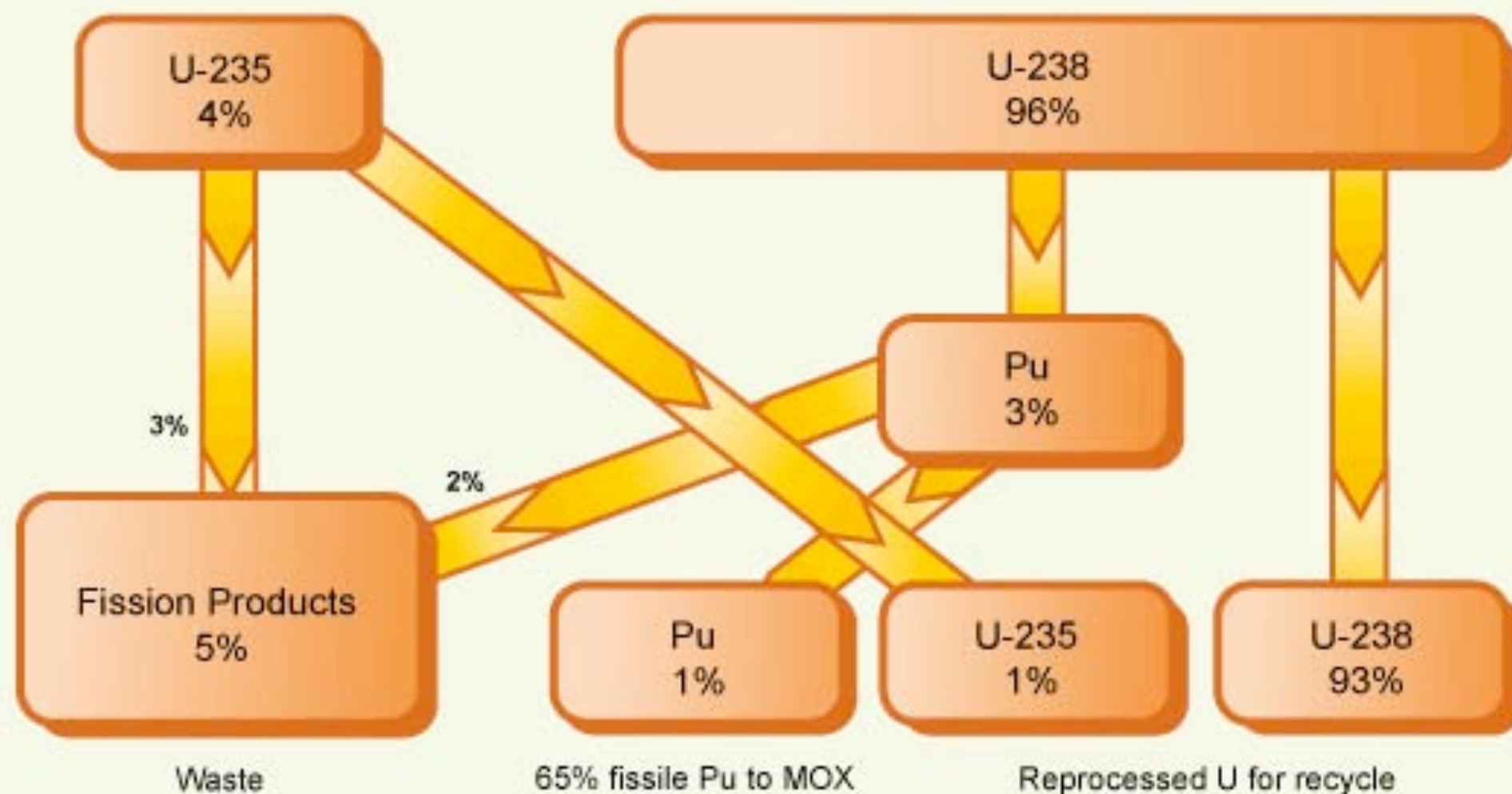
Nel mondo vi sono 22 impianti di arricchimento, in funzione o in costruzione: Brasile, Cina, Francia, Germania, Giappone, India, Iran, Olanda, Pakistan, Russia, UK e USA

- in India e Pakistan sotto il controllo militare**
- tutti gli altri per applicazioni civili.**



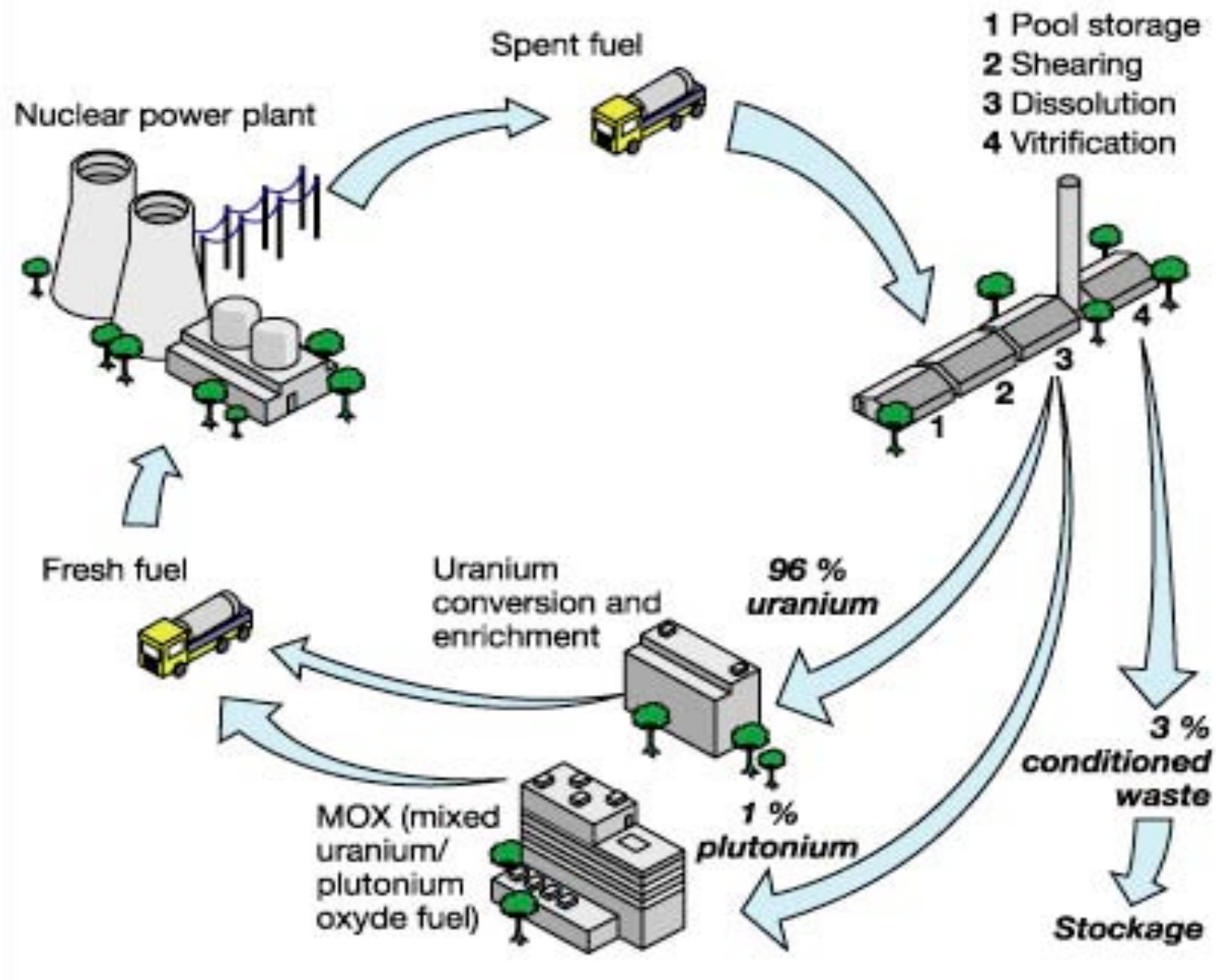


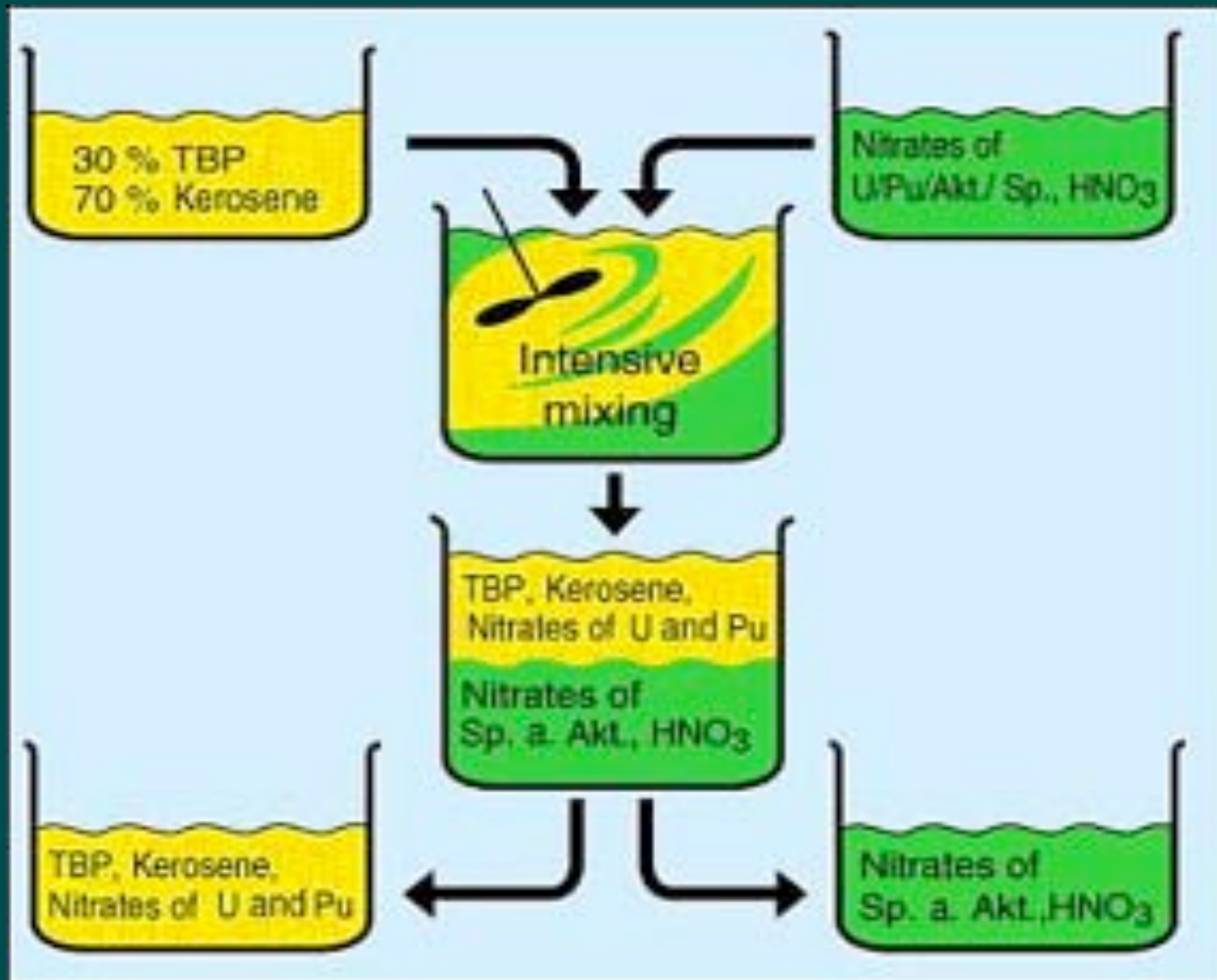
Reaction in standard UO_2 fuel



Basis: 45,000 MWd/t burn-up, ignores minor actinides

Fuel reprocessing and recycling





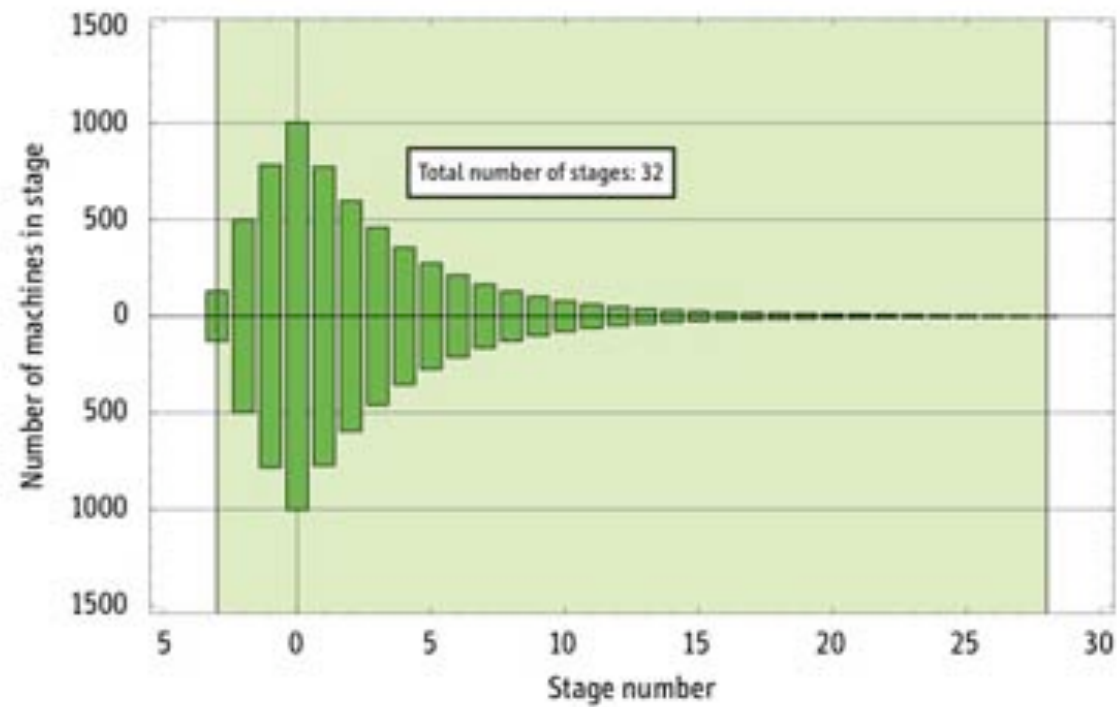
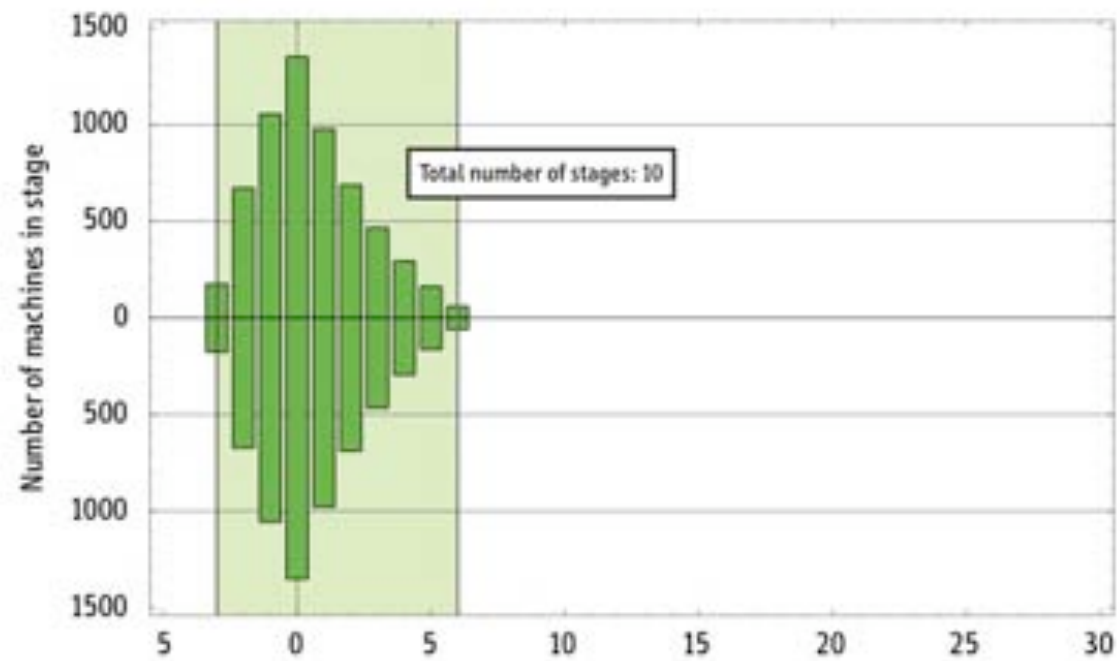
Impianti di riprocessamento

paese \impianti	numero	capacità t/anno	applicazione	stato
Corea del Nord	1	50-200	militare	in chiusura
Francia	2	200	civile	operativi
Giappone	2	1010	civile	operativi
India	3	250	militare	operativi
Israele	1	40-100	militare	operativo
Pakistan	1	10-20	militare	operativo
Russia	3	9900	civile	operativi
UK	2	2400	civile	in chiusura
USA	1	15	civile	operativo

Nucleare civile/nucleare militare

impianti civili $\Rightarrow$ armi nucleari

armi nucleari $\Rightarrow$ energia nucleare civile

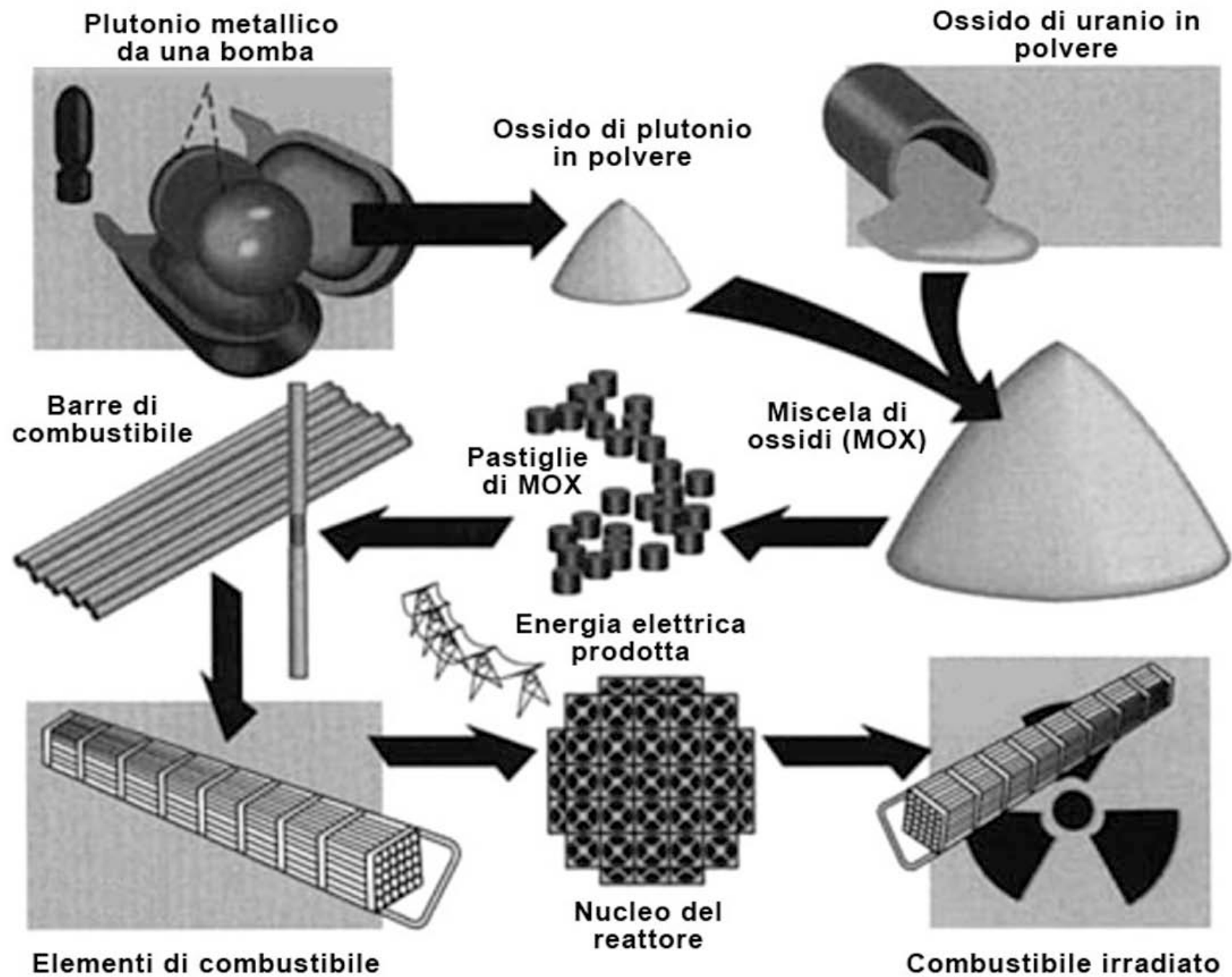


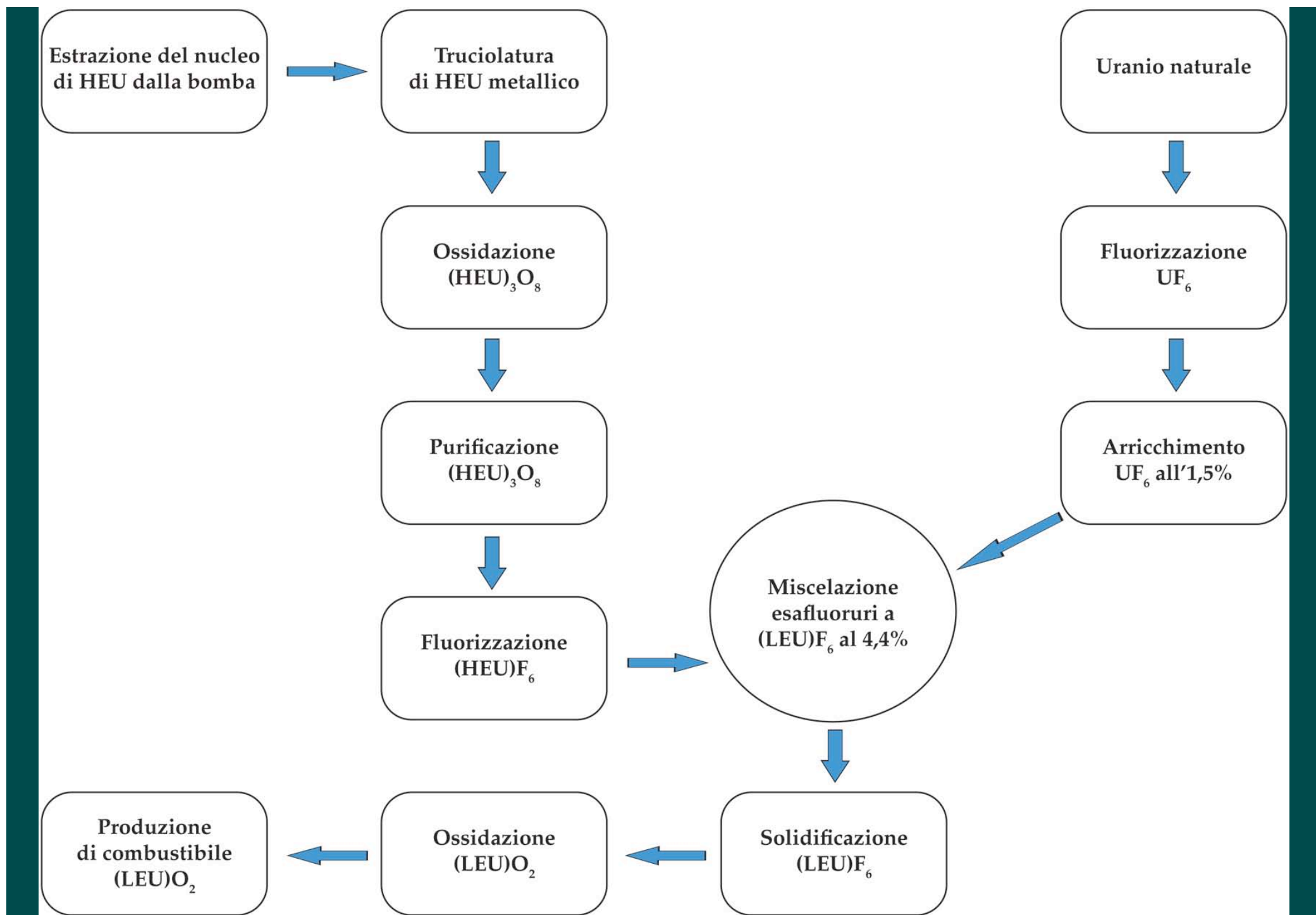
Material and separative work required to fuel a 1000 MWe light-water reactor

Feed		Product	Separative Work	Time
150,000 kg	U(nat) at 0.71%	20,000 kg LEU at 4% (Tails at 0.20%)	129,800 SWU	1 year

Material and separative work required to produce enough HEU for four bombs per year

Feed		Product	Separative Work	Time
150,000 kg	U(nat) at 0.71%	820 kg HEU at 93% (Tails at 0.20%)	192,300 SWU	
150,000 kg	U(nat) at 0.71%	100 kg HEU at 93% (Tails at 0.65%)	14,200 SWU	40 days
20,000 kg	LEU at 4%	100 kg HEU at 93% (Tails at 3.55%)	2,800 SWU	8 days





Pierot

Pierot