

Fukushima
11-30 marzo 2011

una primavera senza hanamy

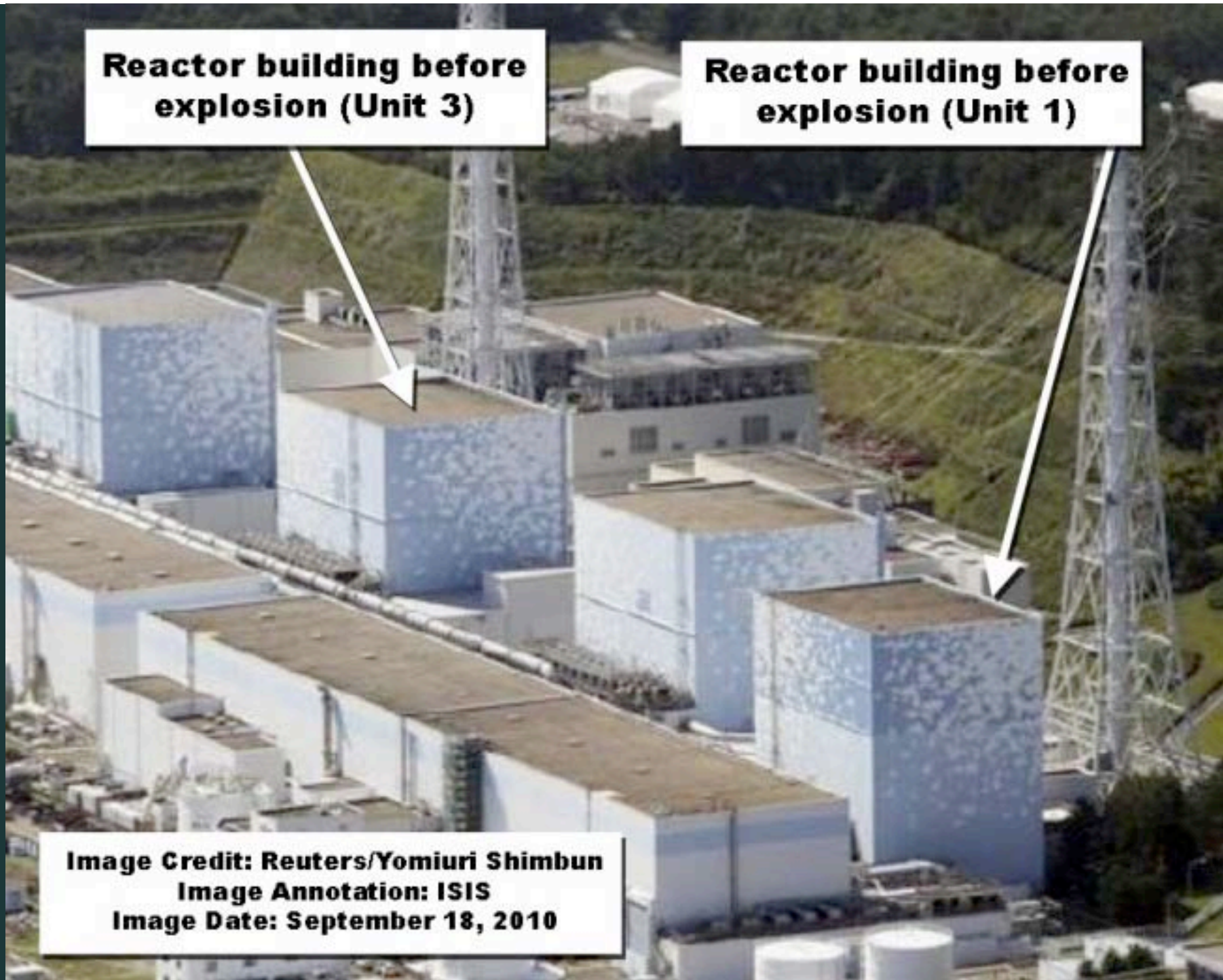




**Reactor building before
explosion (Unit 3)**

**Reactor building before
explosion (Unit 1)**

**Image Credit: Reuters/Yomiuri Shimbun
Image Annotation: ISIS
Image Date: September 18, 2010**



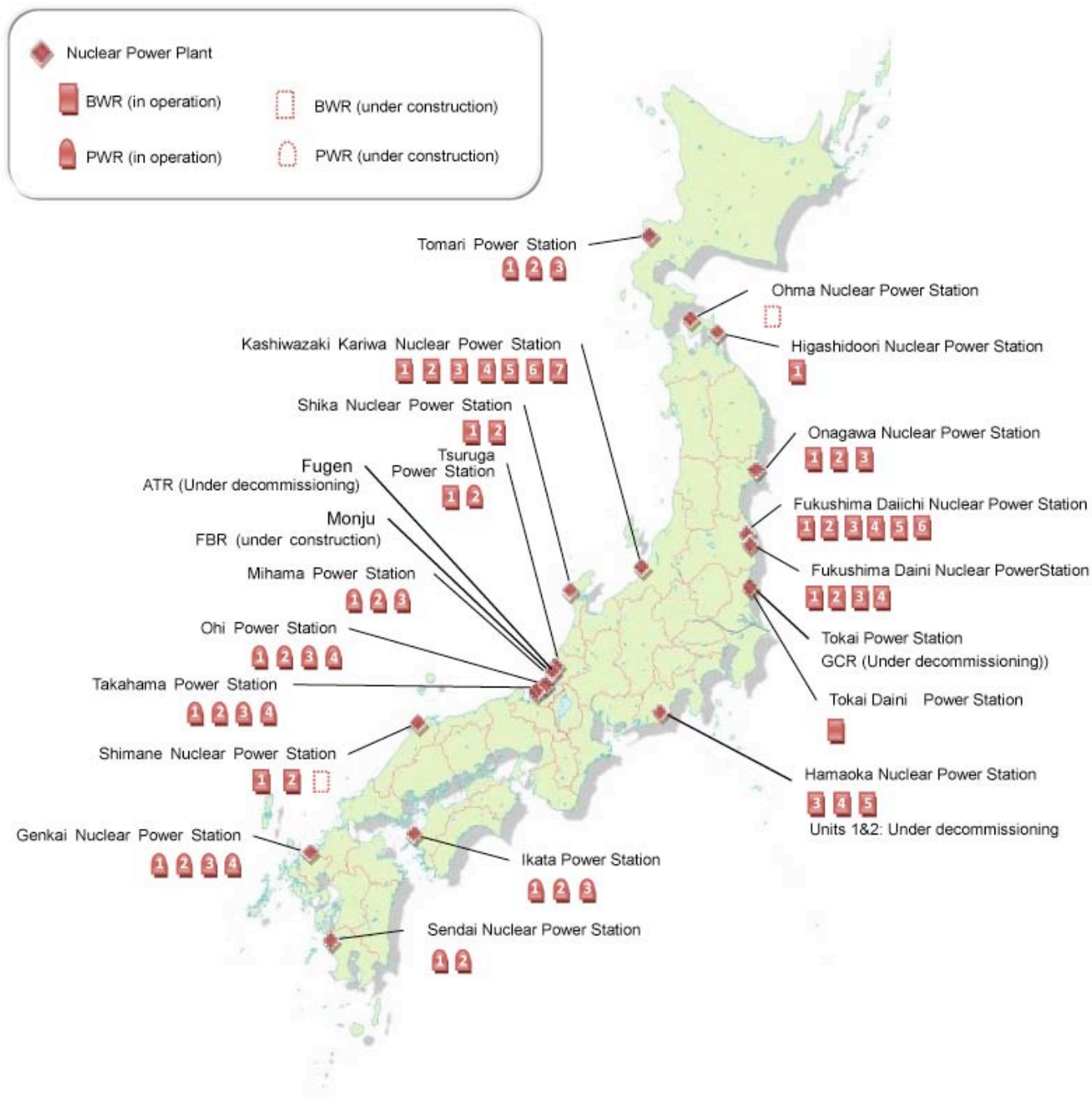
Reactor data

Unit	Type ^[16]	Start construction ^[17]	First criticality ^[17]	Commercial operation ^[17]	Electric power ^[17]	Reactor supplier ^[16]	Architecture ^[4]	Construction ^[4]	Fuel
Fukushima I – 1	BWR-3	July 25, 1967	October 10, 1970	March 26, 1971	460 MW	General Electric	Ebasco	Kajima	LEU
Fukushima I – 2	BWR-4	June 9, 1969	May 10, 1973	July 18, 1974	784 MW	General Electric	Ebasco	Kajima	LEU
Fukushima I – 3	BWR-4	December 28, 1970	September 6, 1974	March 27, 1976	784 MW	Toshiba	Toshiba	Kajima	LEU/MOX ^[6]
Fukushima I – 4	BWR-4	February 12, 1973	January 28, 1978	October 12, 1978	784 MW	Hitachi	Hitachi	Kajima	
Fukushima I – 5	BWR-4	May 22, 1972	August 26, 1977	April 18, 1978	784 MW	Toshiba	Toshiba	Kajima	
Fukushima I – 6	BWR-5	October 26, 1973	March 9, 1979	October 24, 1979	1,100 MW	General Electric	Ebasco	Kajima	
Fukushima I – 7 (planned) ^[18]	ABWR	April 2012		October 2016	1,380 MW				
Fukushima I – 8 (planned) ^[18]	ABWR	April 2012		October 2017	1,380 MW				

Tutti i reattori sono progettati per resistere a sismi previsti su basi storiche esaminati dopo il terremoto Miyagi del 1978 (accelerazione 122 Gal per 30 s) non hanno patito danni

nel 2008 la resistenza sismica è stata portata ad accelerazioni fra 441 e 489 Gal, a seconda delle unità

la centrale è protetta dai tsunami da un muro verso il mare alto 5,7 m



Energia elettronucleare in Giappone (dati 2009)

reattori in rete 54

potenza intallata 47,5 GWe

energia prodotta 263 TWh

frazione necleare 29,2 %

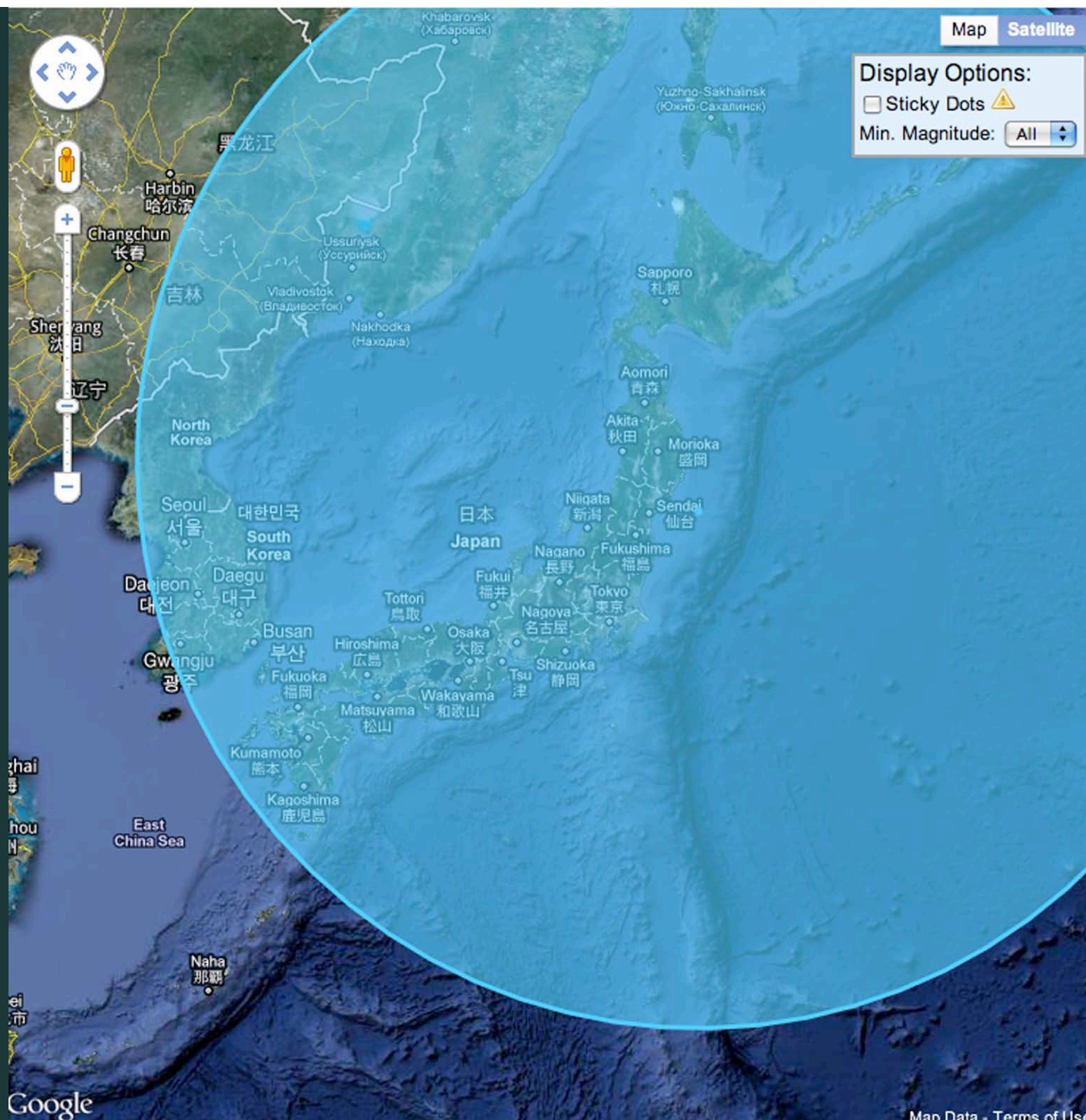
il terremoto e lo tsunami

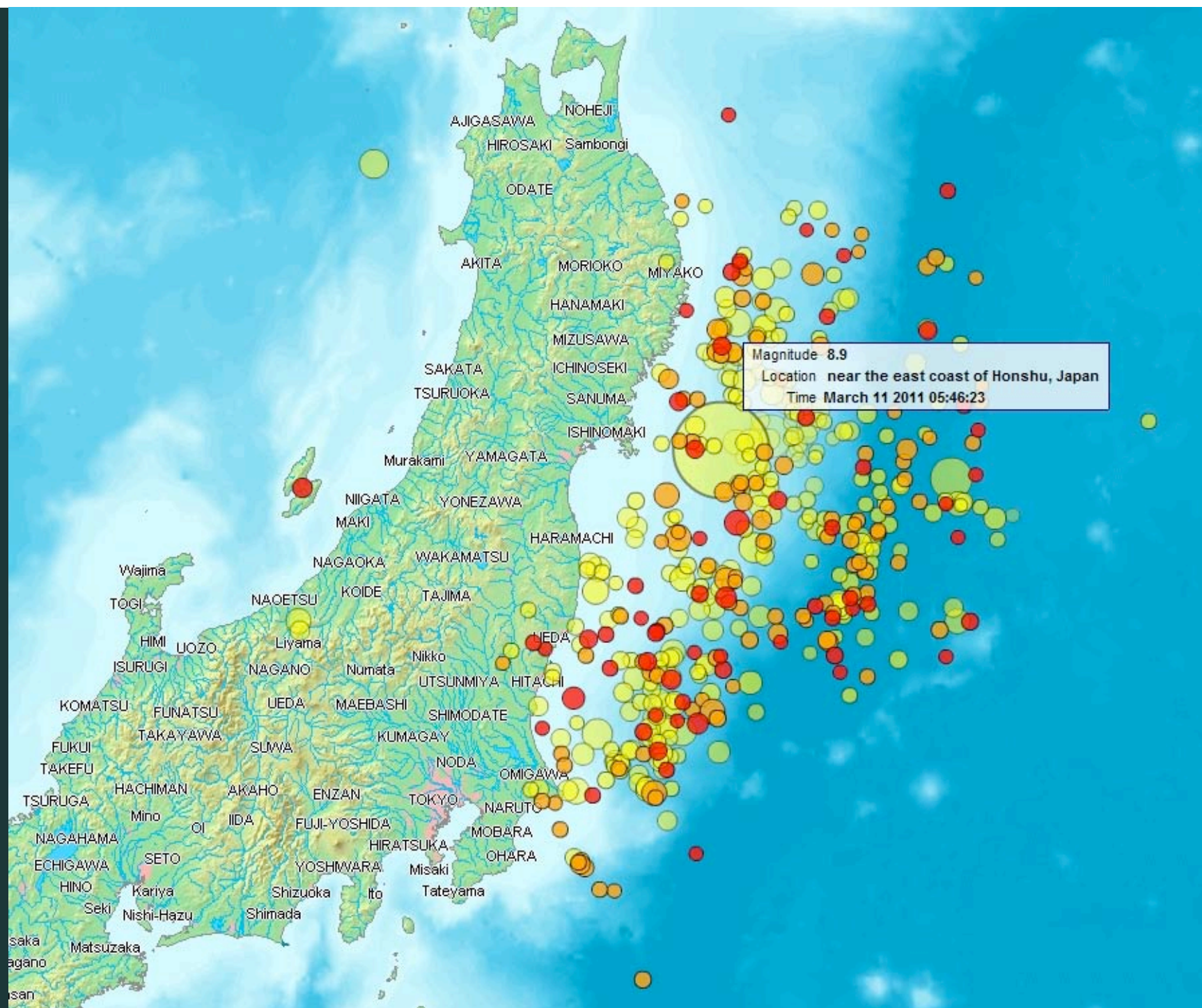
Alle 14.46 (ora locale) dell'11 marzo un terremoto di magnitudine 9 MMS con epicentro in mare a 130 km dalla città di Sendai sulla costa orientale dell'isola di Honshu

- energia liberata $1,9 \times 10^{17}$ J,
come 45.000 bombe su Hiroshima
- accelerazione 29,33 Gal
- tsunami con onde alte fino a 29,6 m

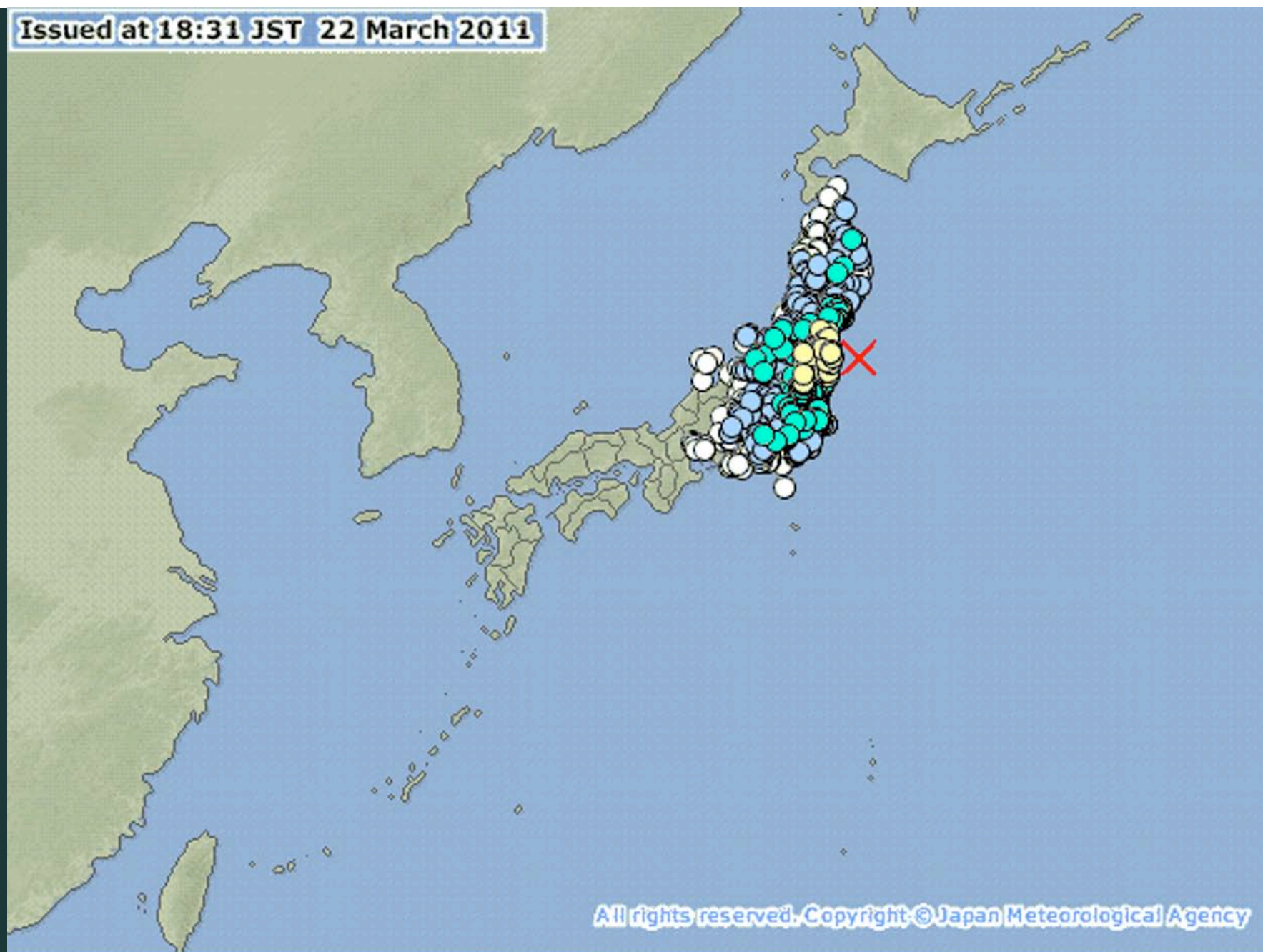
Il terremoto ha avuto un precursore il 9 marzo (magnitudo 7,2 MMS)

e finora è stato seguito da oltre 850 scosse superiori a 4,5 MMS.





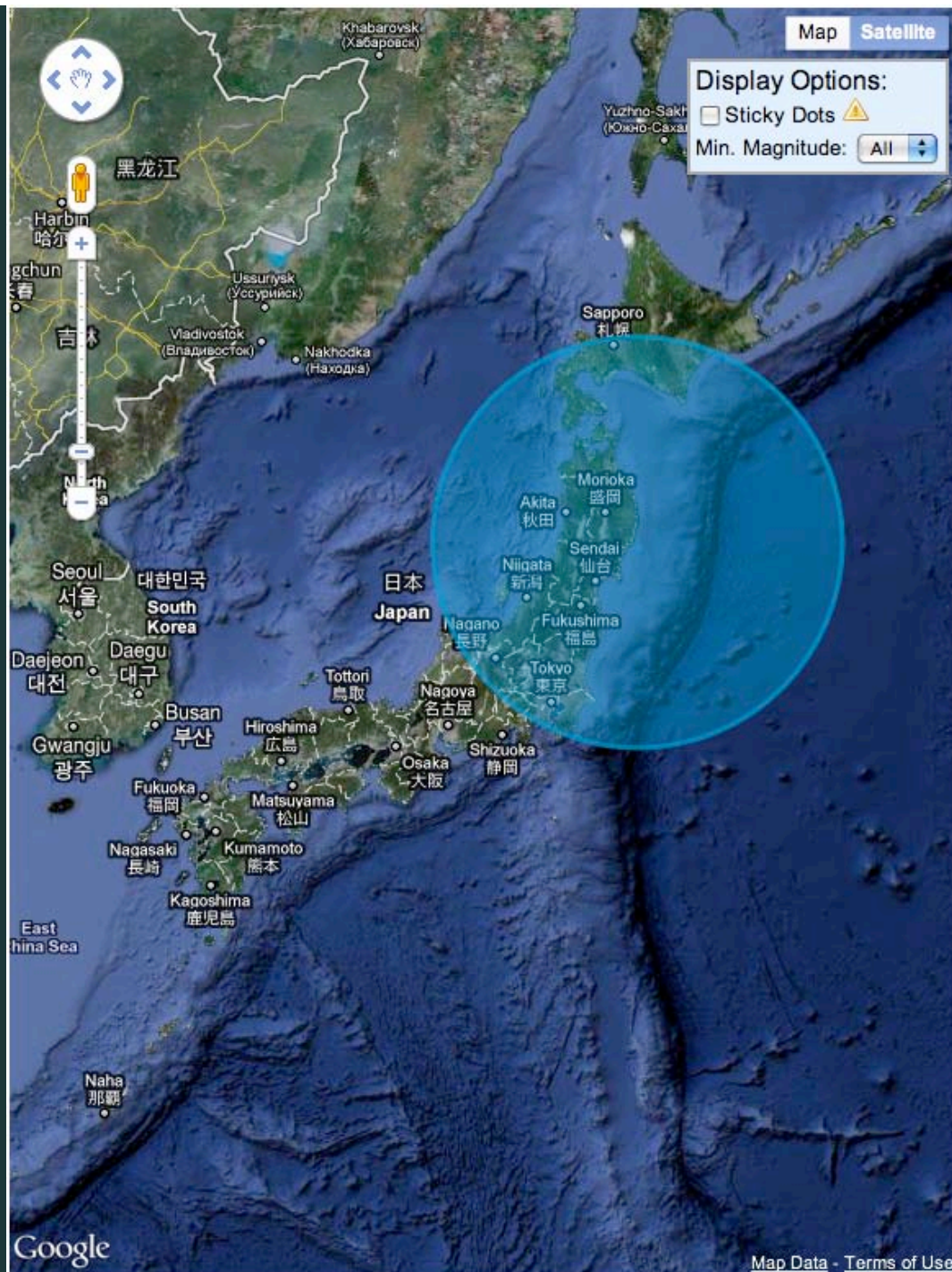
Issued at 18:31 JST 22 March 2011



All rights reserved. Copyright © Japan Meteorological Agency

Notes X Epicenter JMA Seismic Intensity

7	6Upper	6Lower	5Upper	5Lower
4	3	2	1	



Thu Mar 31 2011 16:30 JST

Jump to: last [3](#) / [6](#) / [9](#) / [12](#) / [24](#) hours

Show day:

Last 7 days (99)

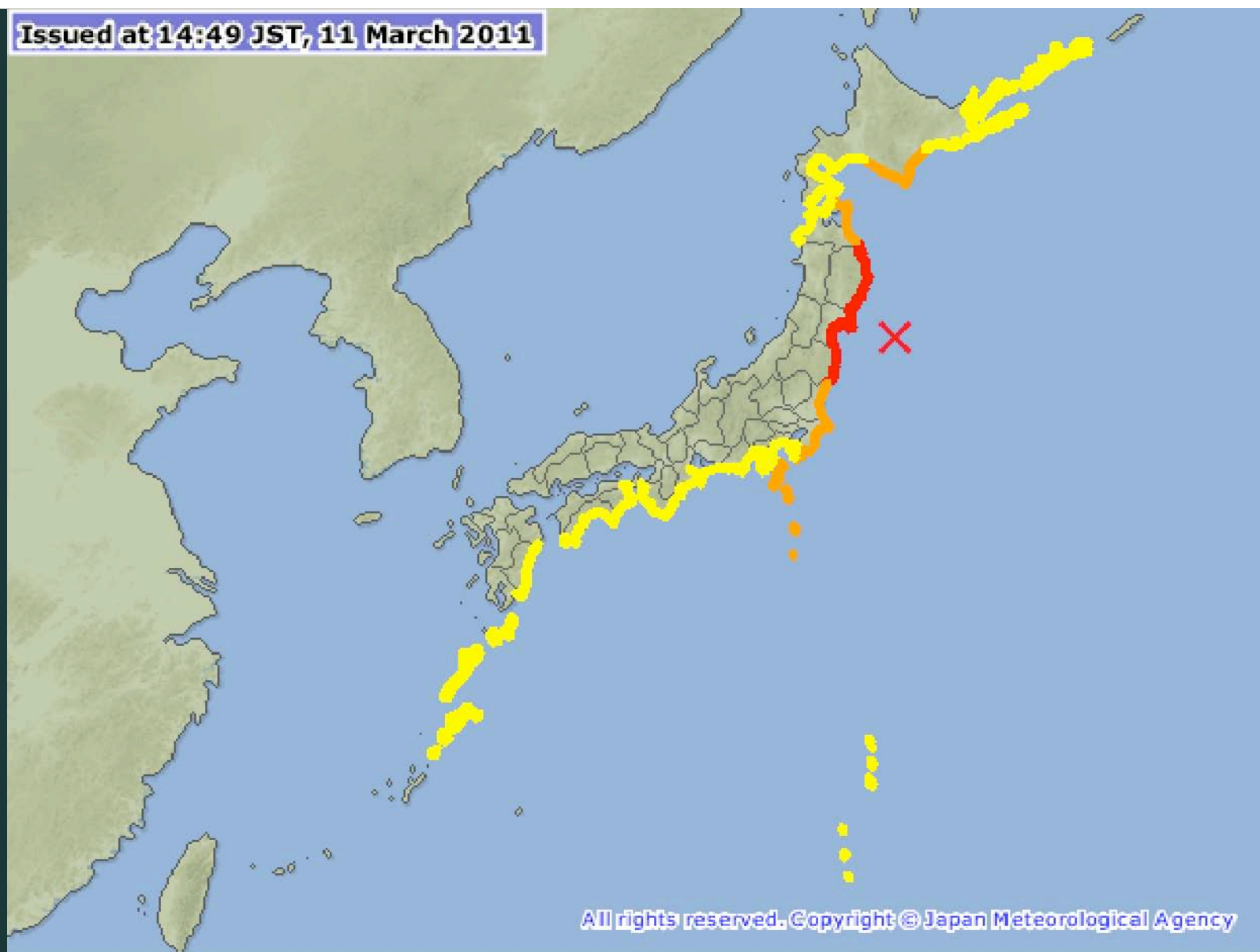
14 of 14 quakes (99 total):

6.2M, depth: 40km 31/3/2011 16:15
 4.7M, depth: 27km 31/3/2011 15:27
 4.5M, depth: 37km 31/3/2011 14:03
 4.7M, depth: 38km 31/3/2011 12:25
 4.9M, depth: 35km 31/3/2011 11:31
 4.7M, depth: 37km 31/3/2011 10:28
 4.6M, depth: 34km 31/3/2011 05:00
 4.5M, depth: 7km 31/3/2011 03:58
 4.6M, depth: 9km 31/3/2011 03:11
 4.8M, depth: 20km 31/3/2011 01:13
 4.7M, depth: 21km 30/3/2011 23:45
 5.1M, depth: 53km 30/3/2011 22:19
 5M, depth: 48km 30/3/2011 22:00
 5.3M, depth: 26km 30/3/2011 21:51

Japan Earthquake (March 2011) - Daily Energy Release



Issued at 14:49 JST, 11 March 2011



All rights reserved. Copyright © Japan Meteorological Agency

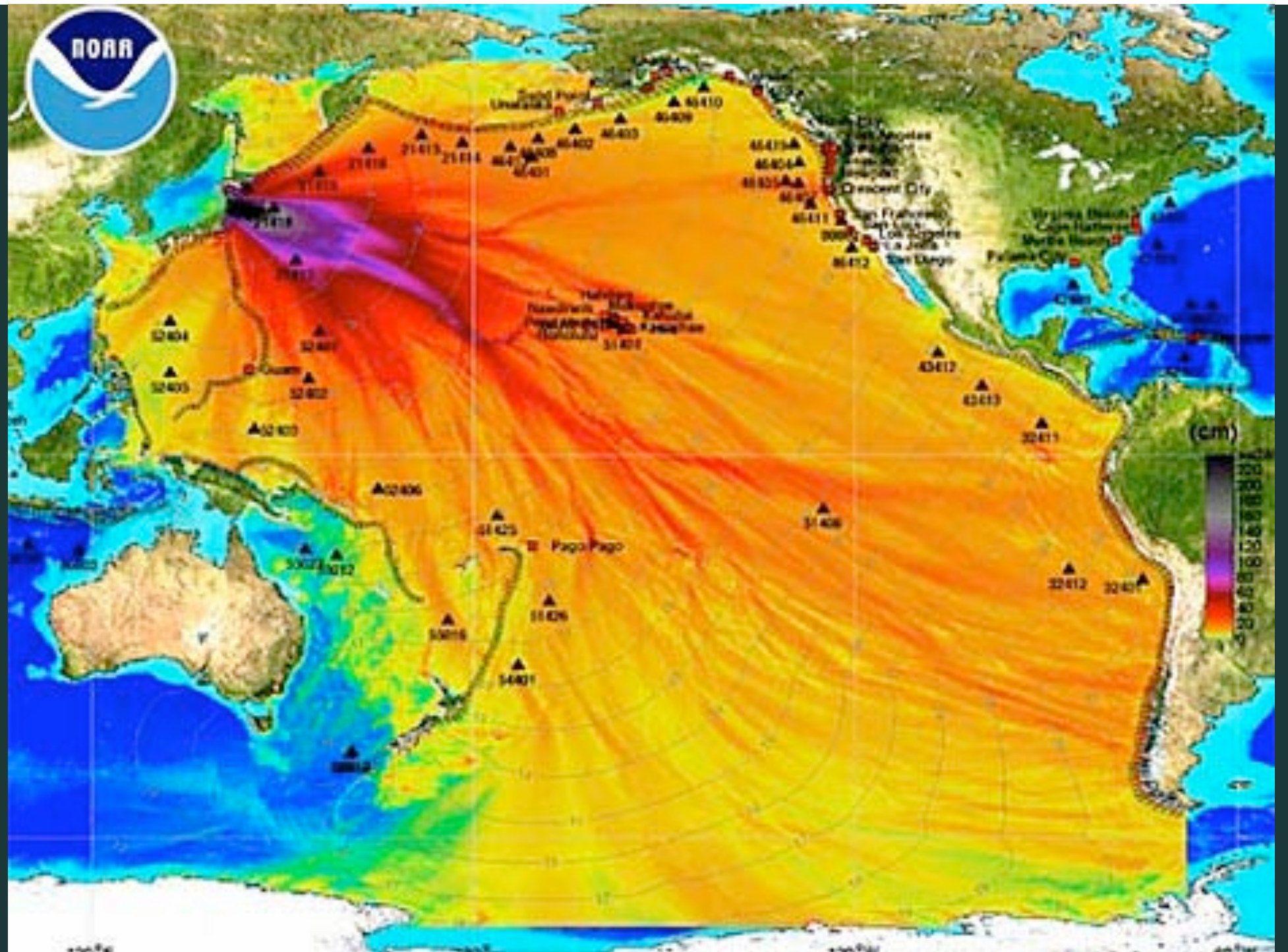
Tsunami Warning

Tsunami Advisory

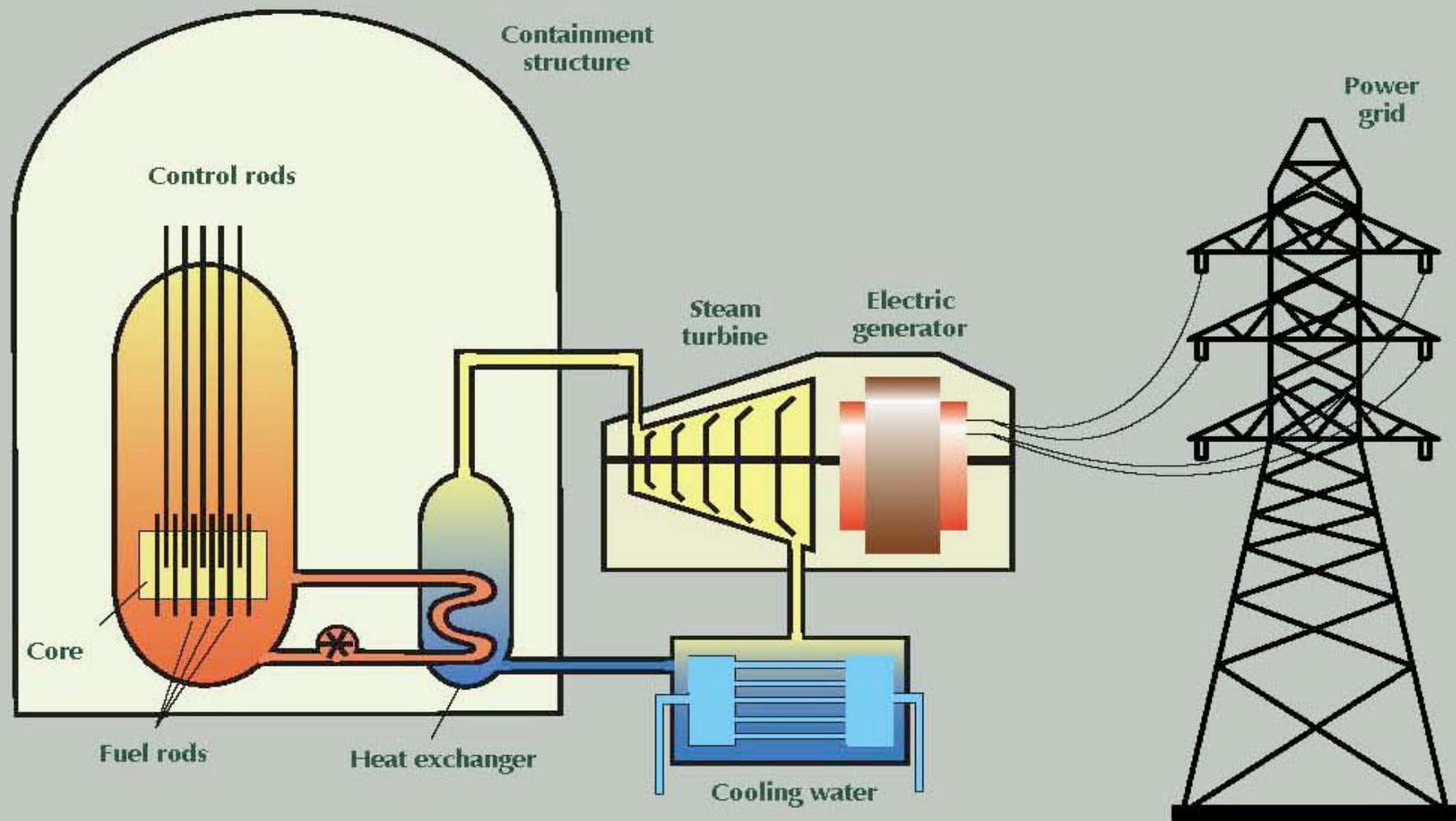
Notes

- Major Tsunami** Tsunami height is estimated to be 3 meters or more
- Tsunami** Tsunami height is estimated to be up to 2 meters

- Tsunami** Tsunami height is estimated to be about 0.5 meter
- X** Epicenter

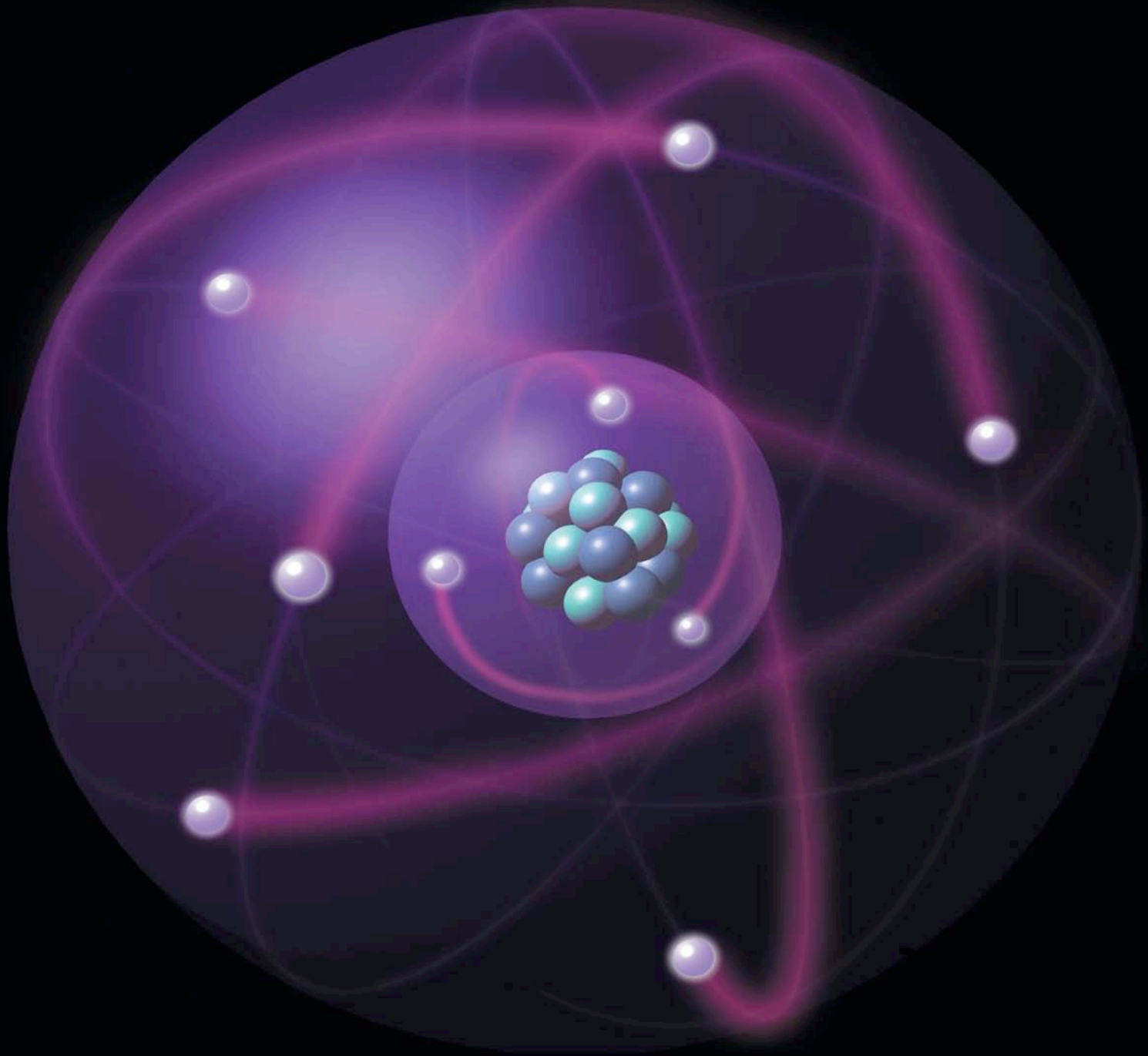












- il nucleo degli atomi è piccolissimo
raggio del nucleo/raggio atomo $\sim 10^{-5}$
 - il nucleo ha carica elettrica positiva, a bilanciare quella negativa degli elettroni
 - il nucleo è composto da due tipi di particelle molto simili a parte la carica elettrica, i nucleoni:
 - * protone, carico positivamente
 - * 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



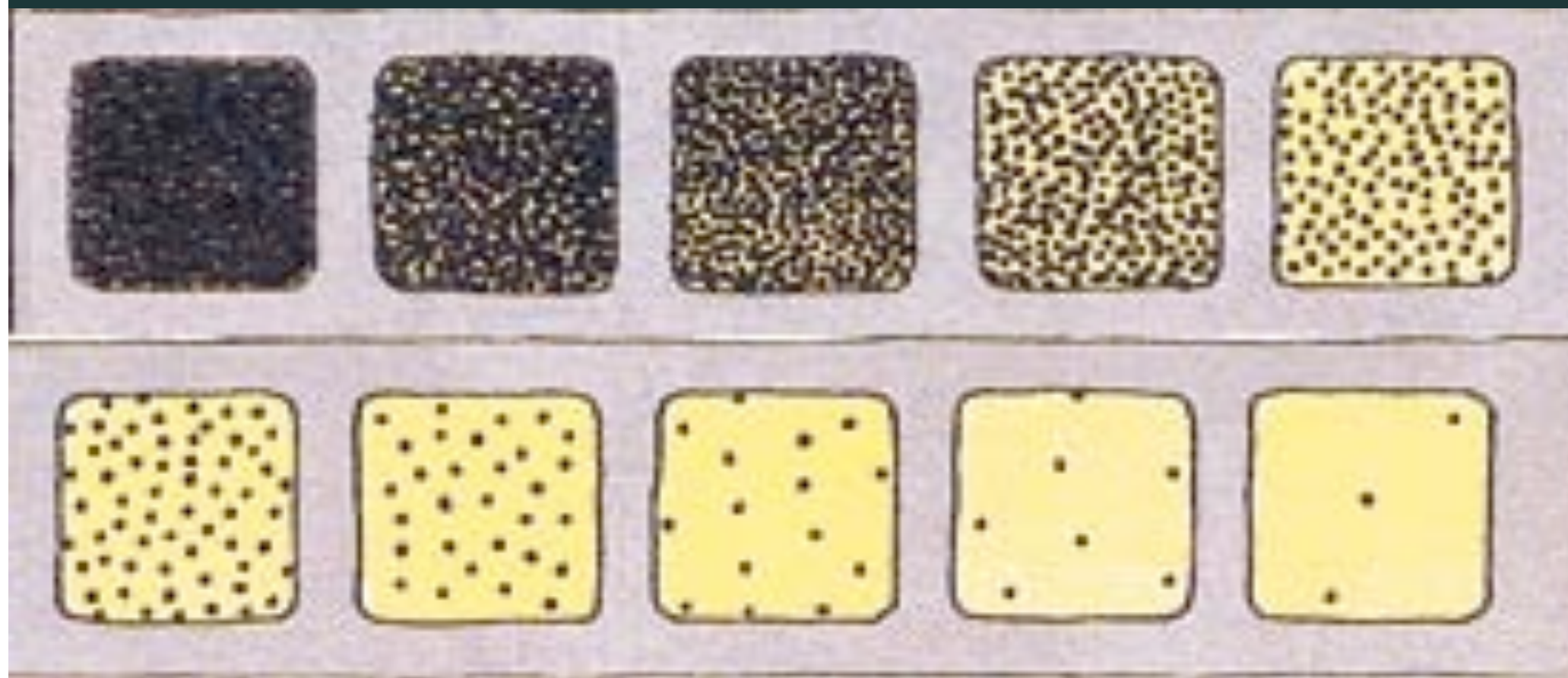
isotopi differenti dello stesso elemento hanno le stesse proprietà chimiche, ma possono avere enormi differenze fisiche

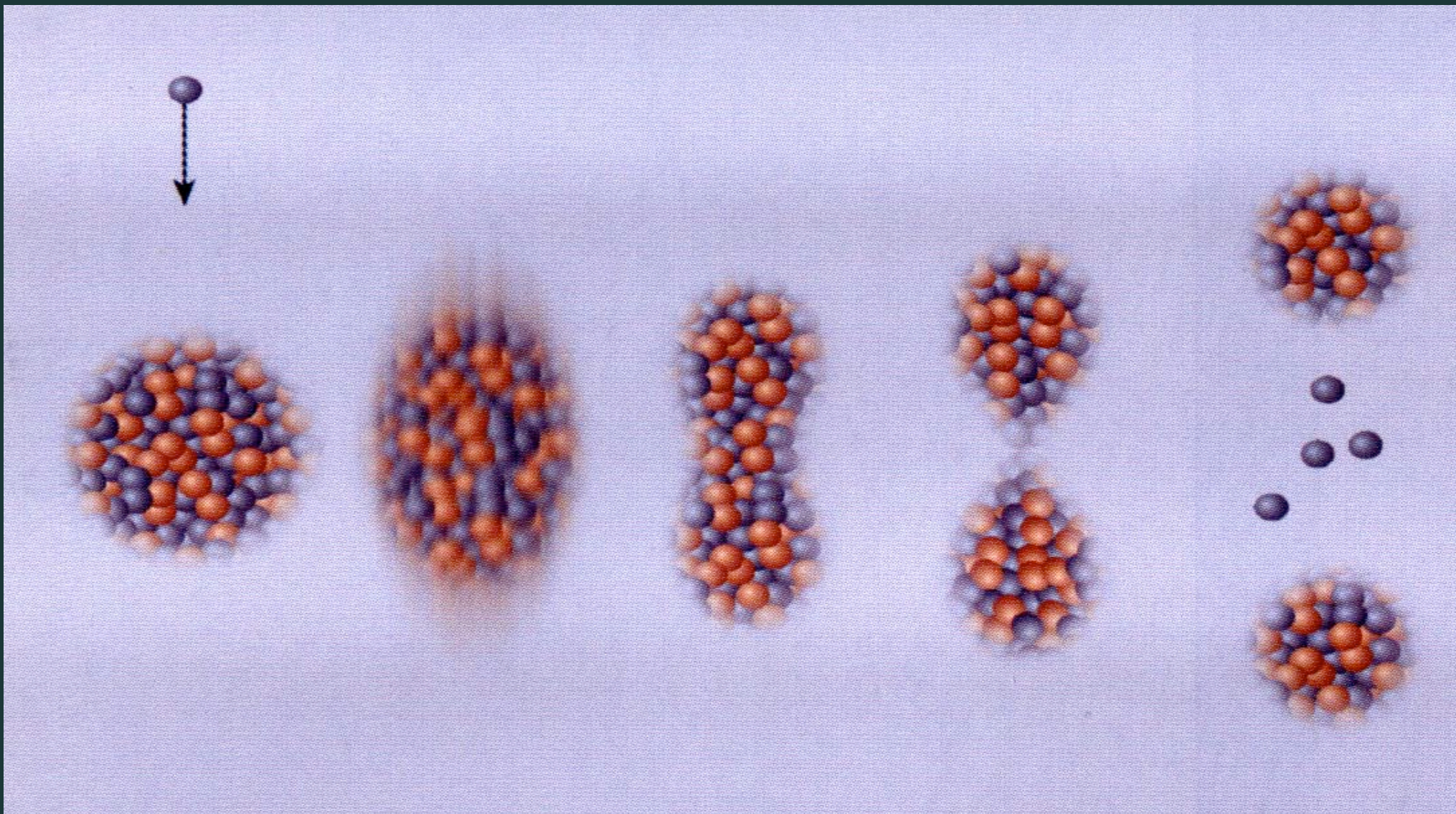
Uranio naturale $Z=92$ tre isotopi

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
-------	-------	-----------	-------------------------

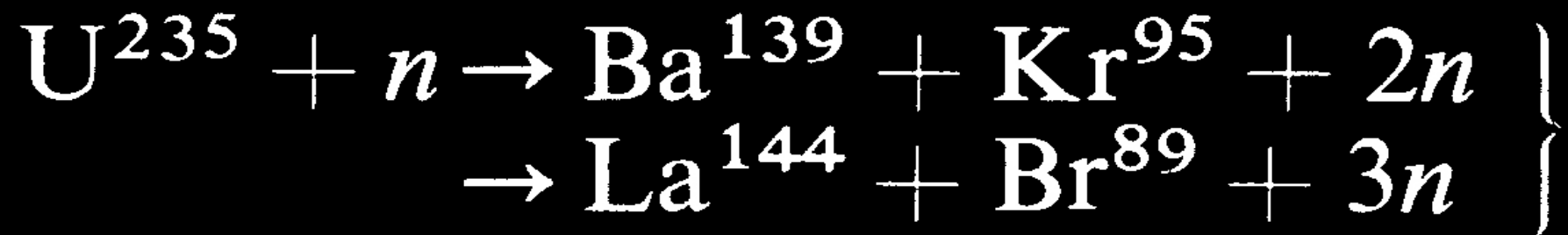
U-234	0,0055%	$T_{1/2}$	$2,455 \cdot 10^5$ anni
-------	---------	-----------	-------------------------







Reazioni di fissione



sorpresa!

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

Niels Bohr, primavera 1939

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”

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

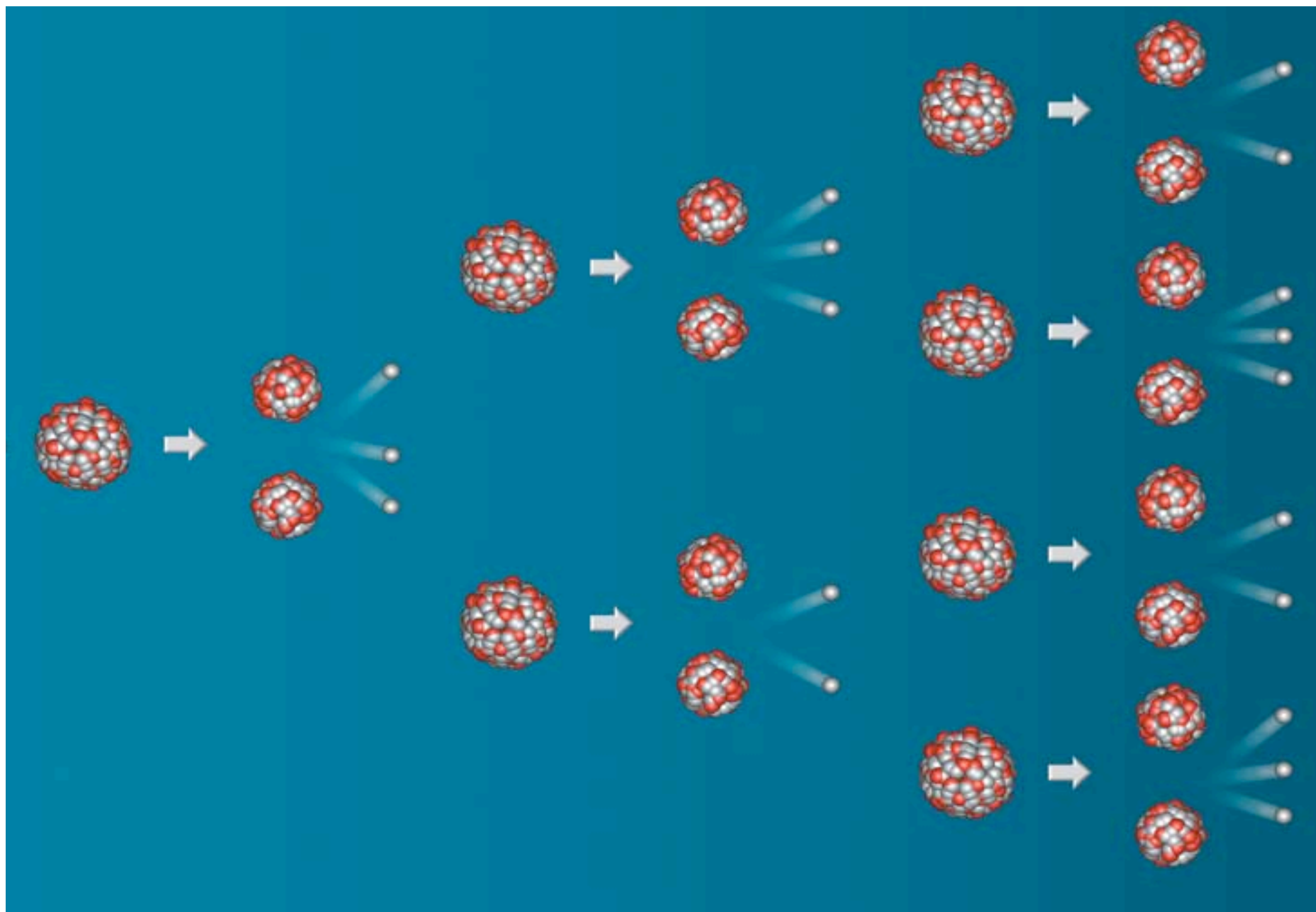
Il fattore 20 milioni

- 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

**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

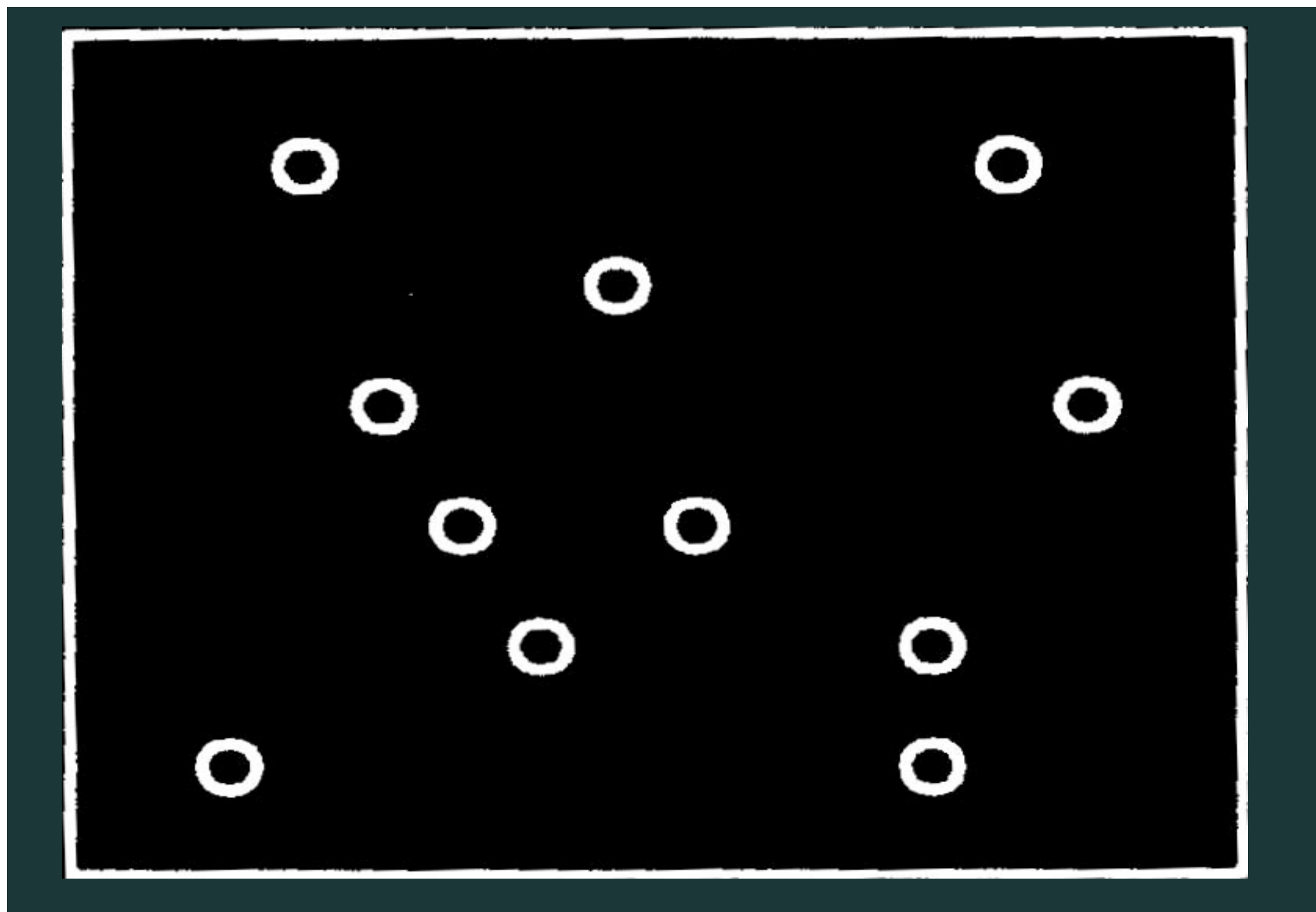
la reazione a catena si mantiene

$k > 1$ condizione supercritica

la reazione a catena cresce fuori controllo

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



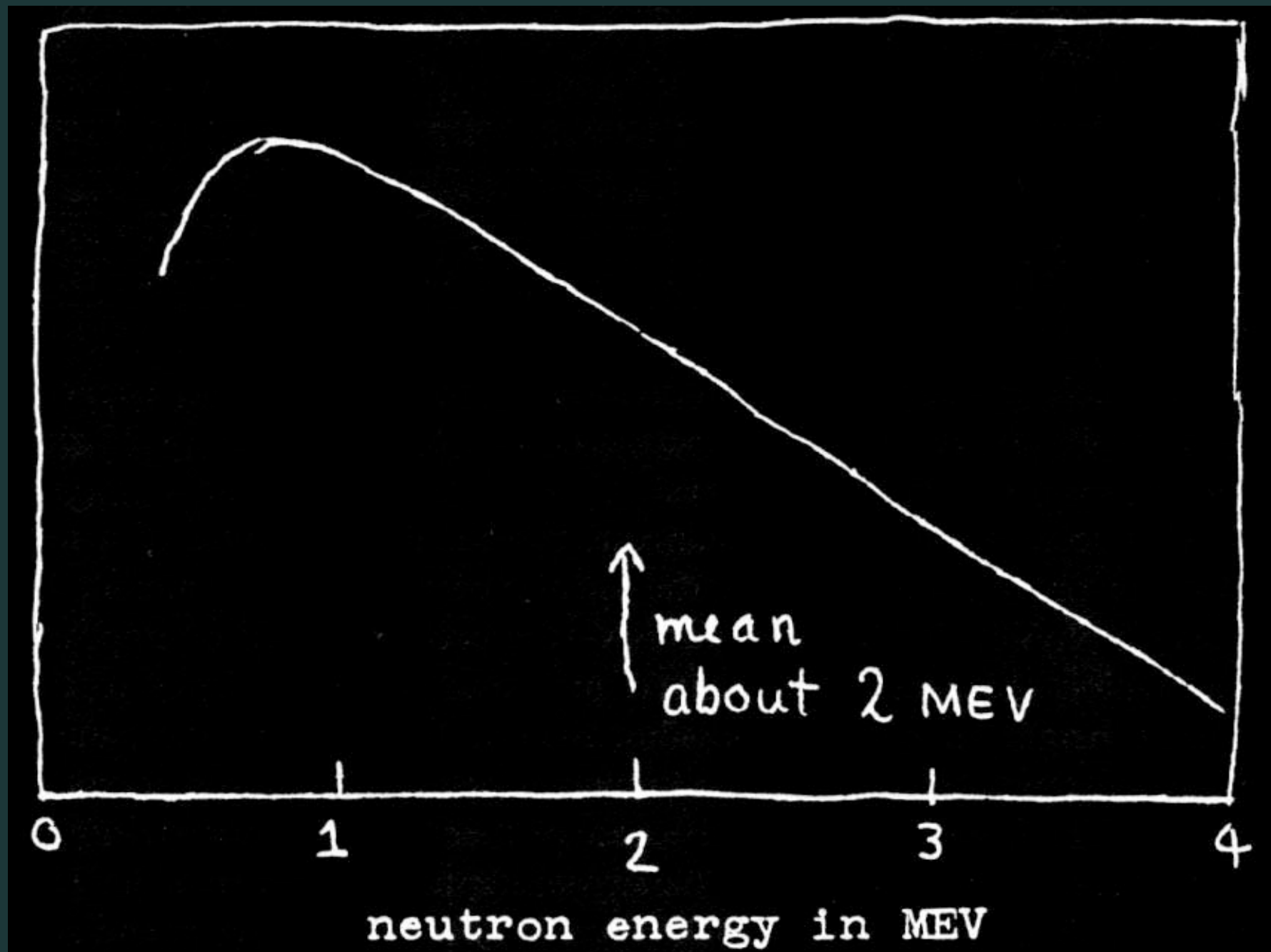
Processi alternativi nell'interazione neutrone-uranio

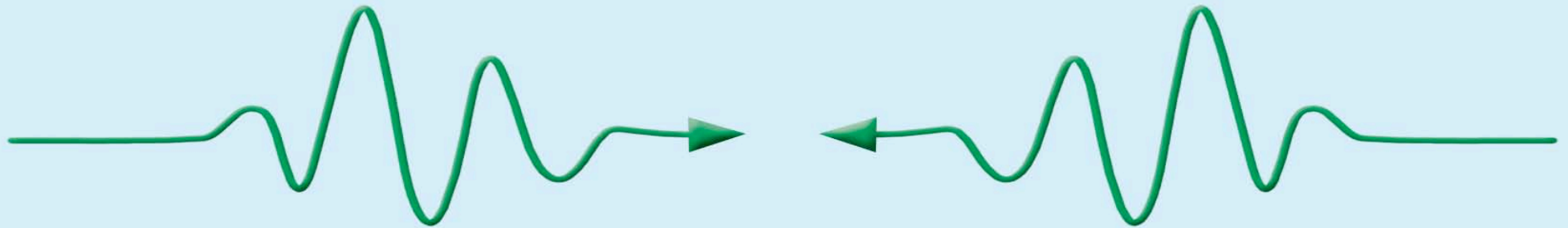
- diffusione elastica
 - diffusione con perdita di energia
 - assorbimento senza fissione
 - reazioni nucleari
-
- ogni processo avviene con una precisa probabilità
 - le probabilità dipendono dall'energia del neutrone

Neutroni 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

	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



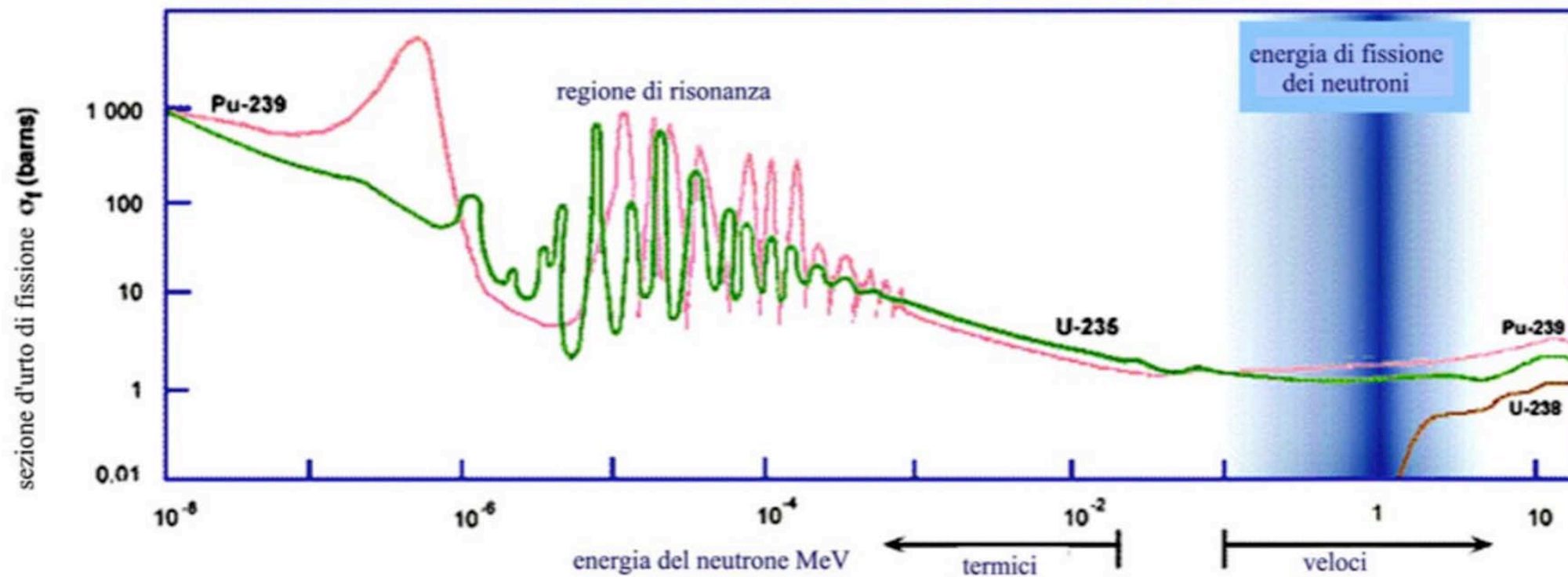


pacchetti d'onda grossi



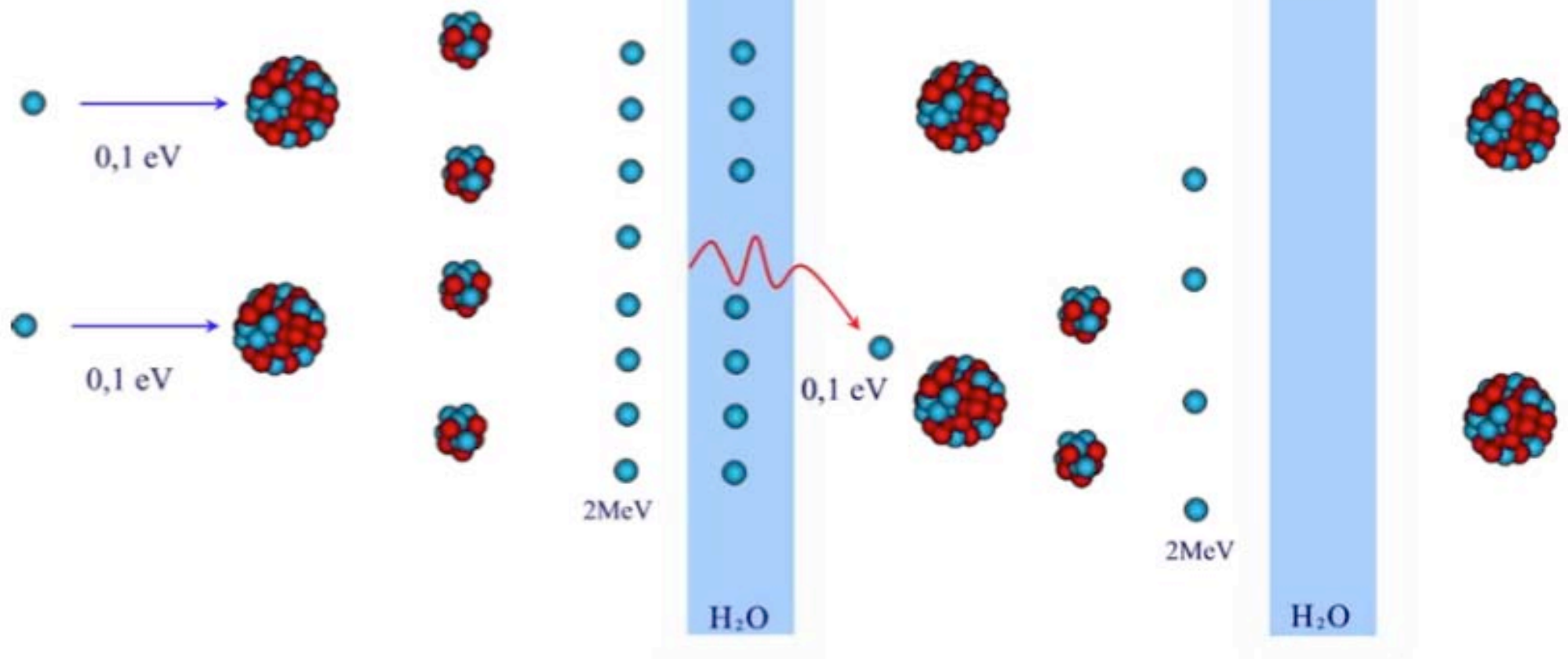
pacchetti d'onda piccoli

sezione d'urto di fissione - Uranio e Plutonio



termalizzare i neutroni

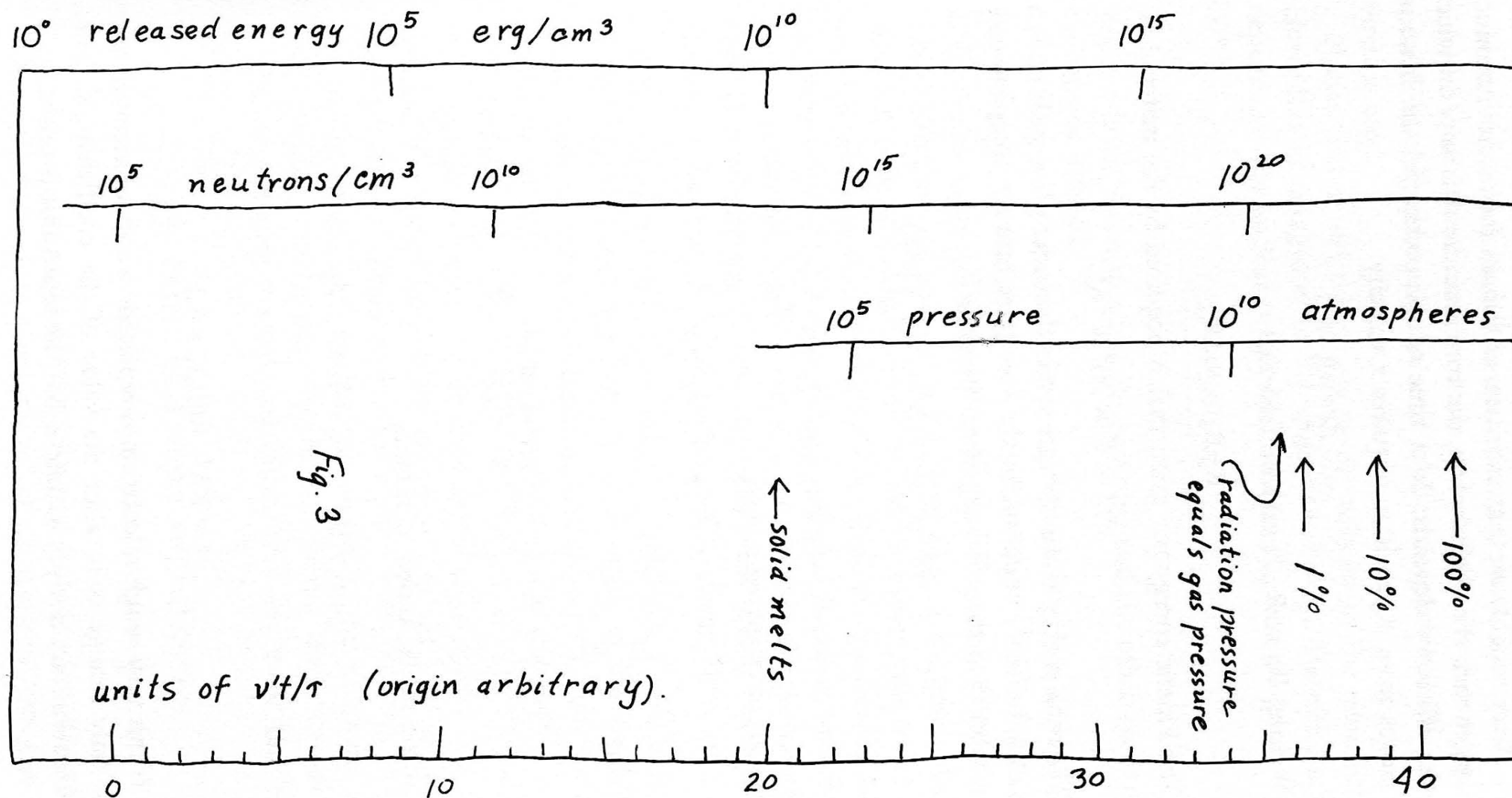
- diffondere i neutroni da nuclei leggeri:
idrogeno, deuterio, carbonio
- ridurre al minimo l'assorbimento
- inserire l'uranio in un moderatore:
acqua / acqua pesante/ grafite
struttura di molti metri cubi
- aspettare che avvengano gli urti necessari:
18 con idrogeno, 31 con deuterio, 118 con
carbonio;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



il fattore tempo e la bomba

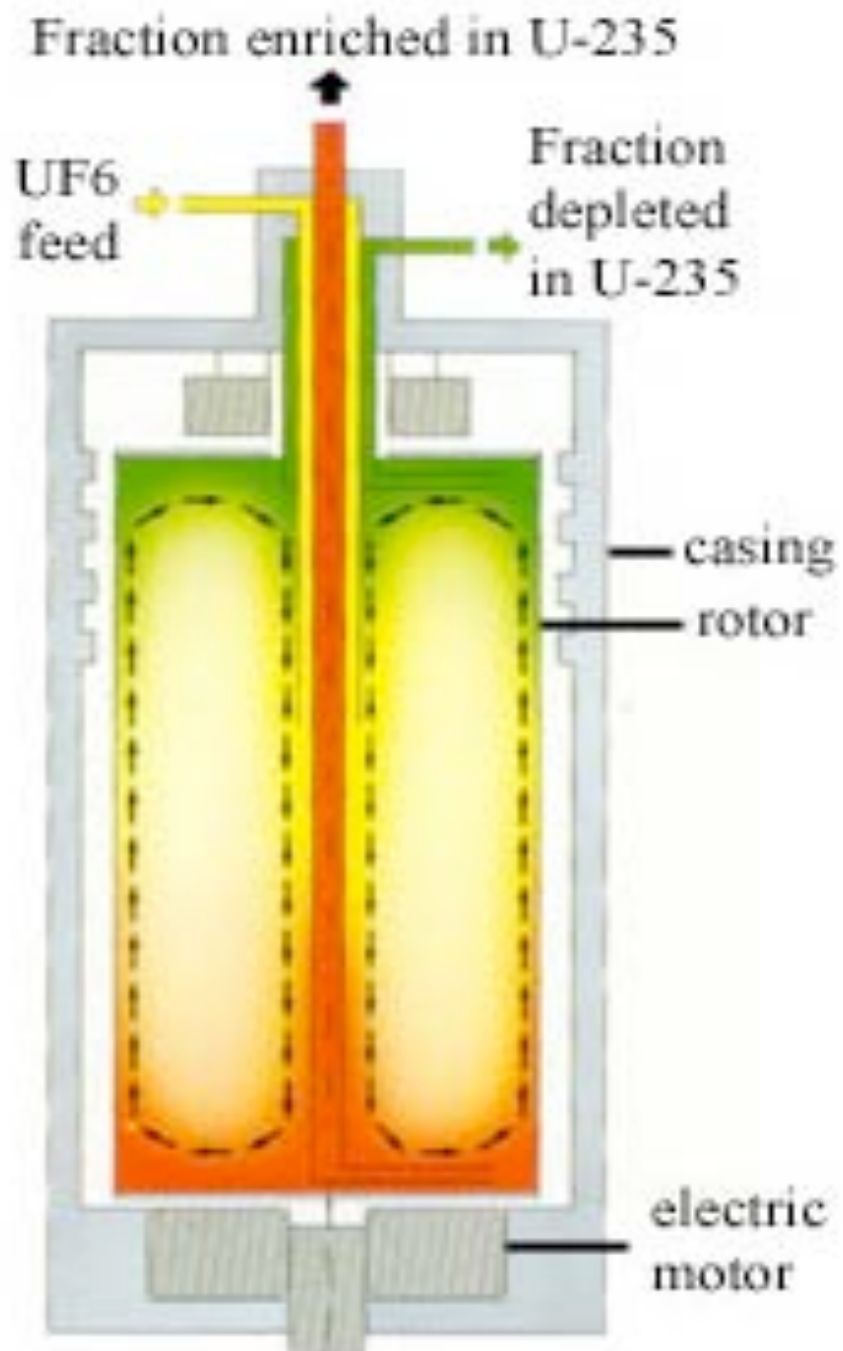
- un neutrone impiega tipicamente $0,01\mu\text{s}$ a interagire con un nucleo
- dopo 40 generazioni ($0,4\mu\text{s}$) l'energia prodotta diventa enorme e il materiale si riscalda a $\sim 40 \times 10^6\text{ }^\circ\text{C}$ e tende a sublimare e a disperdersi a $\sim 10^6\text{ m/s}$
- un'espansione 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 $\sim 0,5\mu\text{s}$

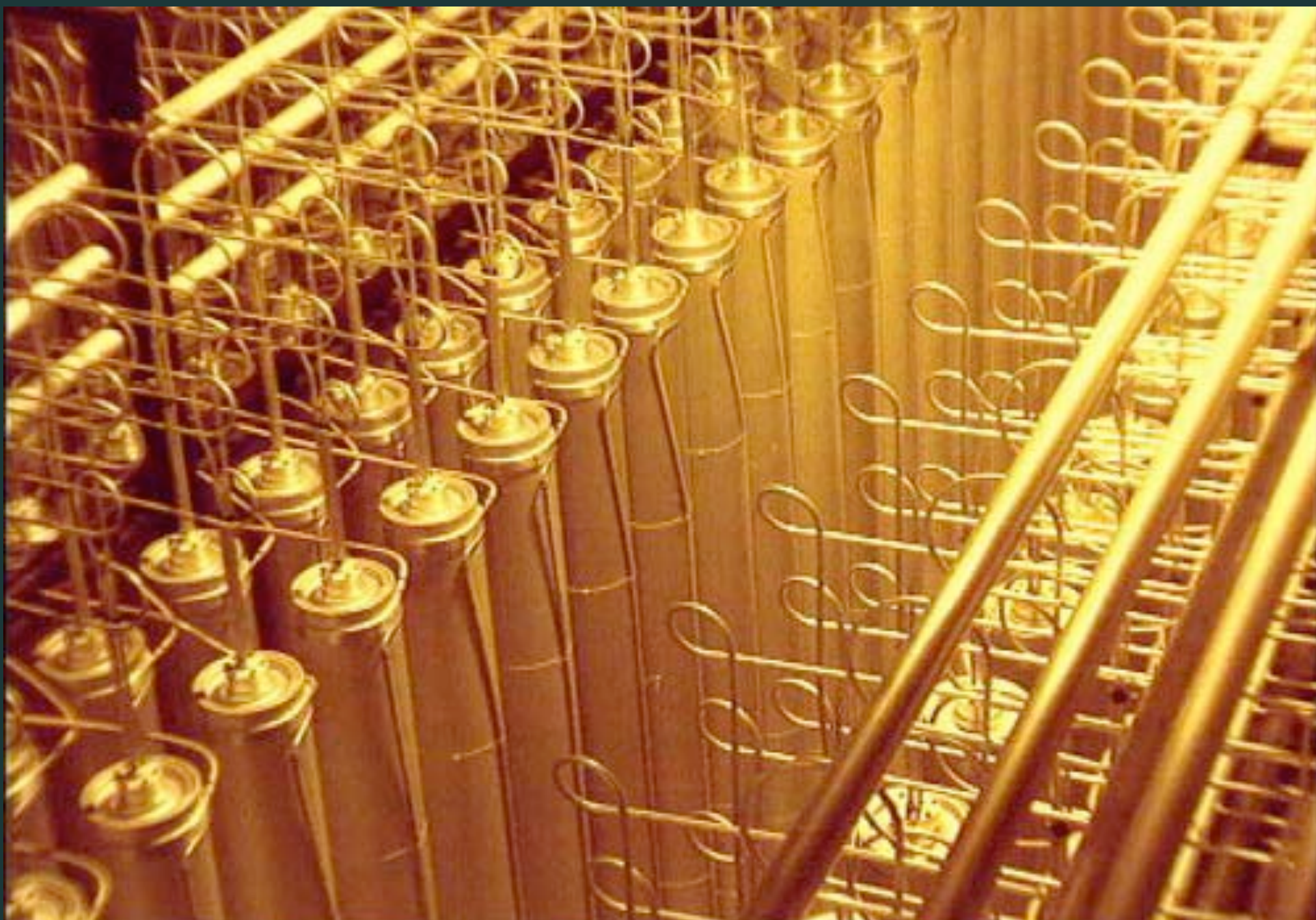
non c'è tempo per termalizzare i neutroni



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





meccanismi di detonazione

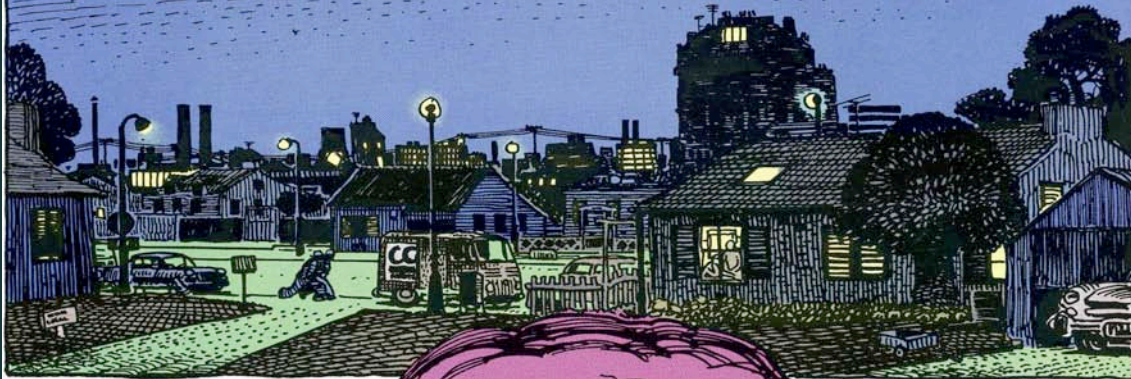
- l'ordigno deve rimanere inerte e sicuro fino all'innesco della reazione a catena
(fattore di moltiplicazione k inferiore a 1)
- l'innesco deve creare in tempi rapidissimi le condizioni per una reazione a catena divergente
(fattore di moltiplicazione k superiore a 2)
- occorre introdurre un fiotto di neutroni alle condizioni ottimali
- va evitata una predetonazione
- va impedita la dispersione dell'esplosivo prima della fissione della quantità necessaria per un dato effetto

tempo utile di innesco $< 0,4\text{ms}$

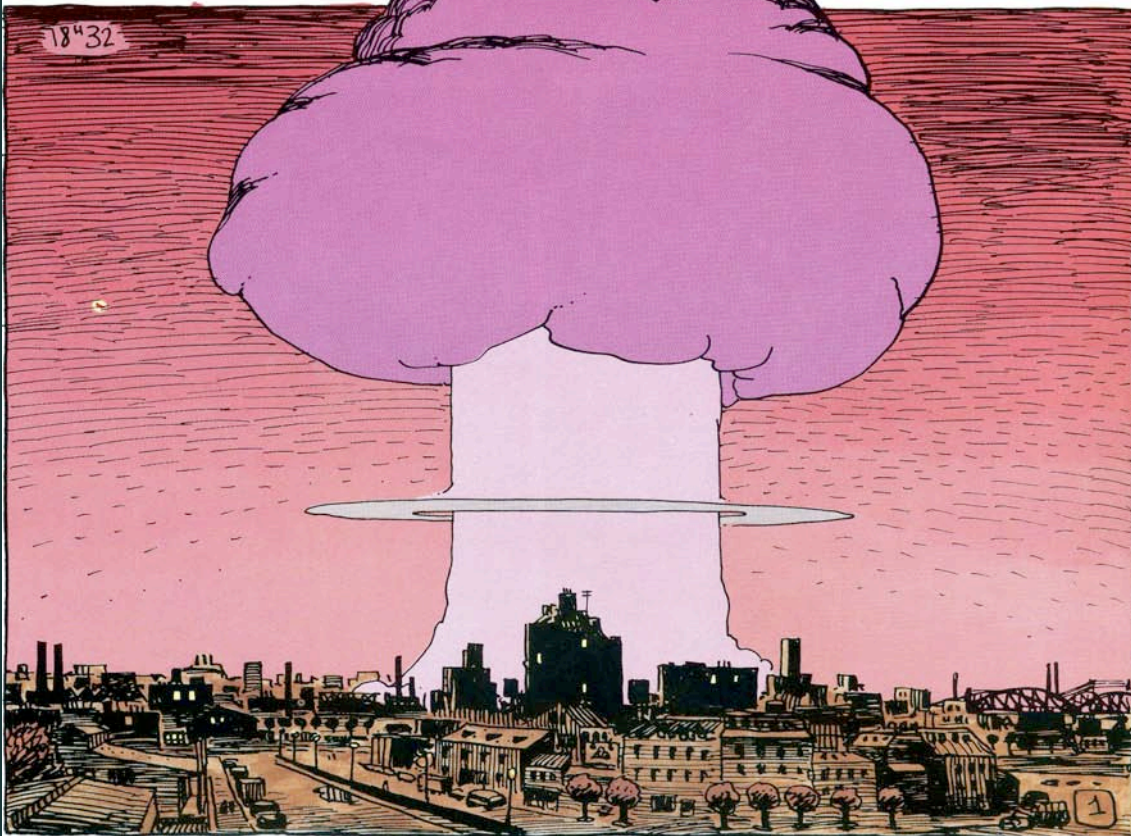
VARIATION N°4070 SUR "LE" THEME

15 OCTOBRE 18^h30

PAR
MOE
BUS



18^h32



la via del reattore

neutroni termici con un moderatore

- alta frequenza di fissioni
- alta efficienza
- uranio naturale o poco arricchito ($\text{LEU} < 5\%$)
- 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

I reattori naturali di Oklo (Gabon)

- 1950 milioni di anni fa
- 17 reattori naturali intermittenti per oltre 150000 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)



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**

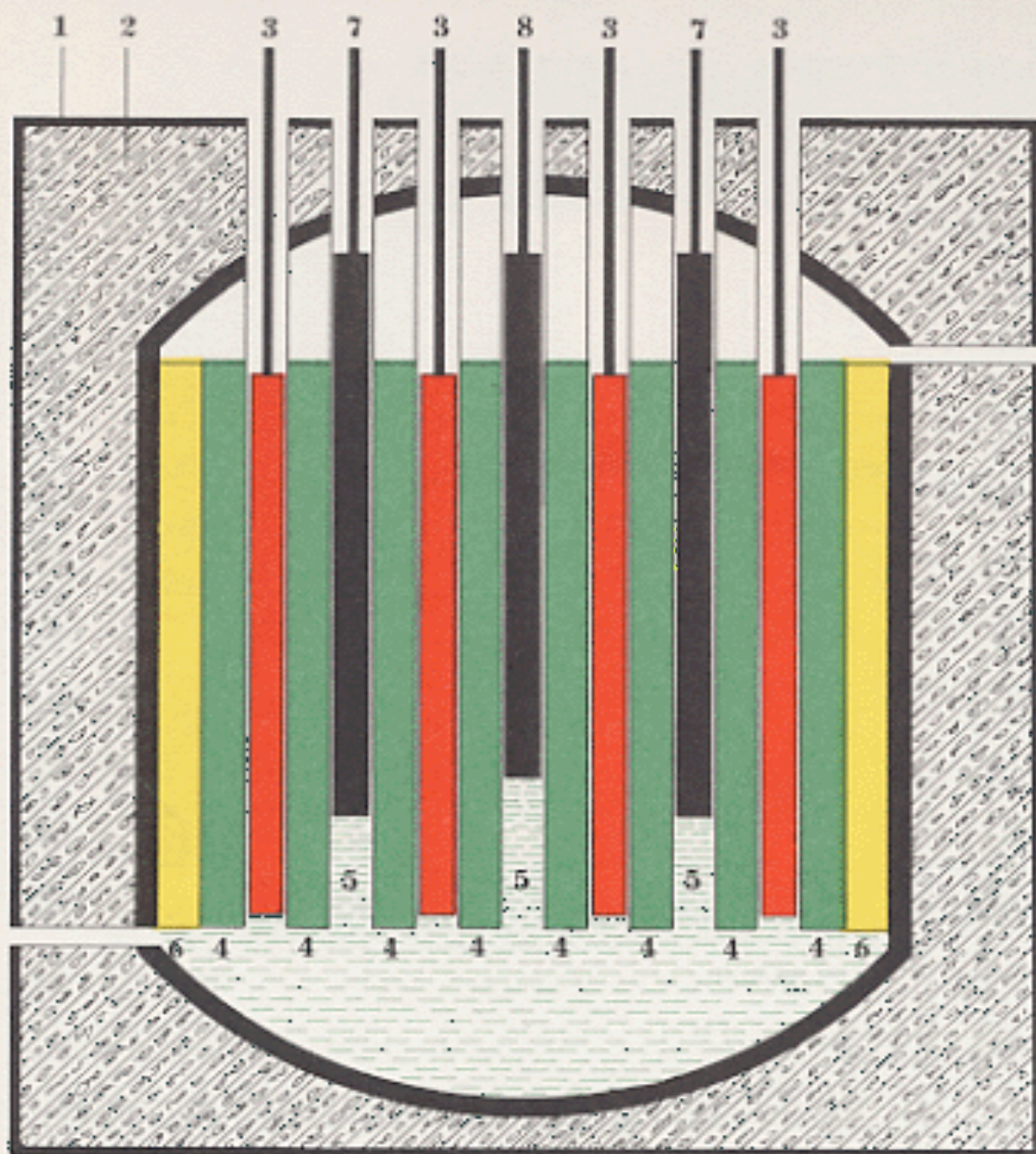
- l'uranio-238 si riscalda e cresce l'agitazione termica delle molecole**
- l'assorbimento risonante di neutroni avviene non solo per energie "speciali" ma per ampi valori di energia (effetto Doppler)**
- la reazione a catena tende a spegnarsi**

dal nocciolo alla rete

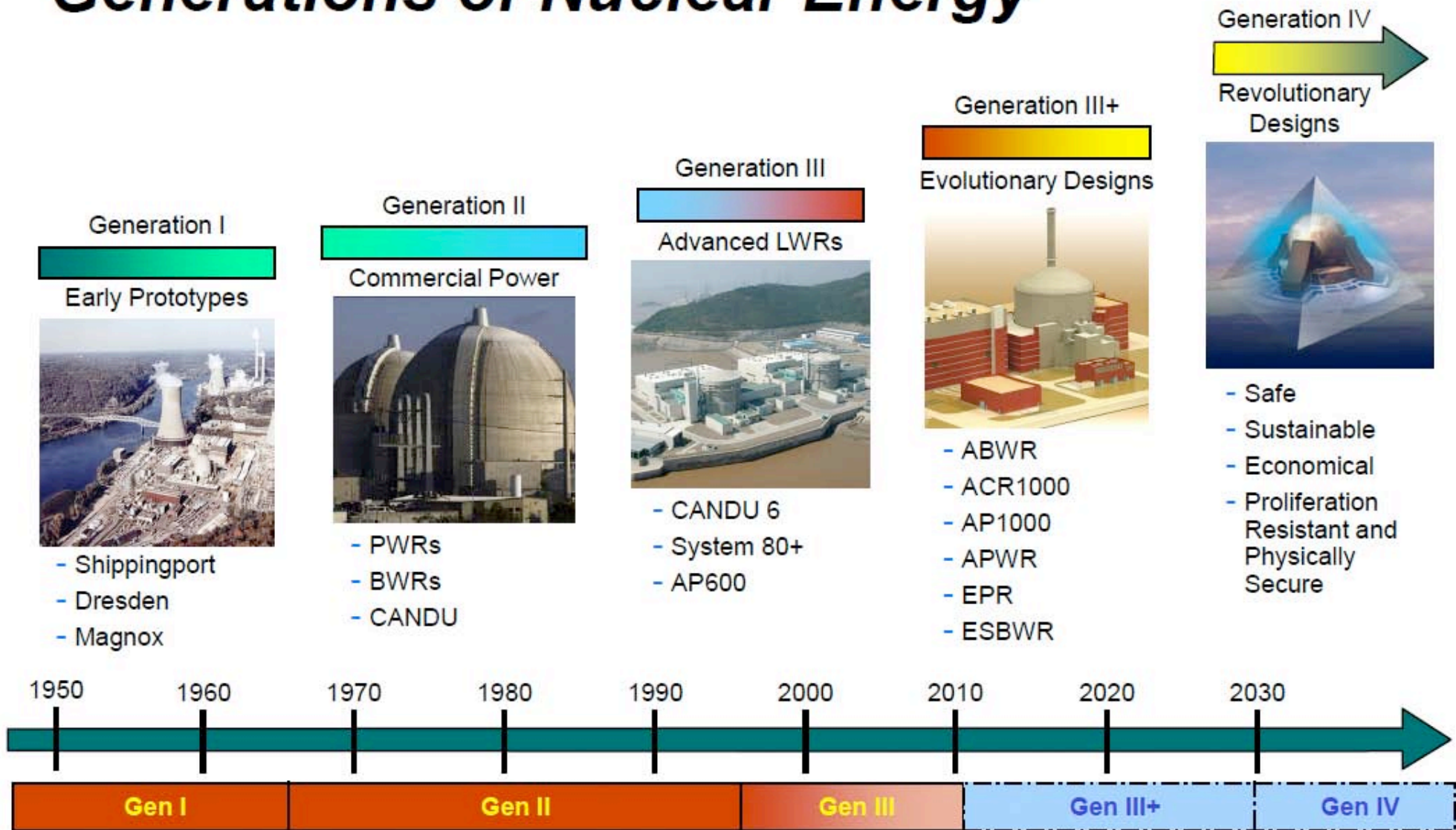
la struttura logica di un impianto elettronucleare

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
- vasca per gli elementi di combustibile esausto



Generations of Nuclear Energy



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

**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**

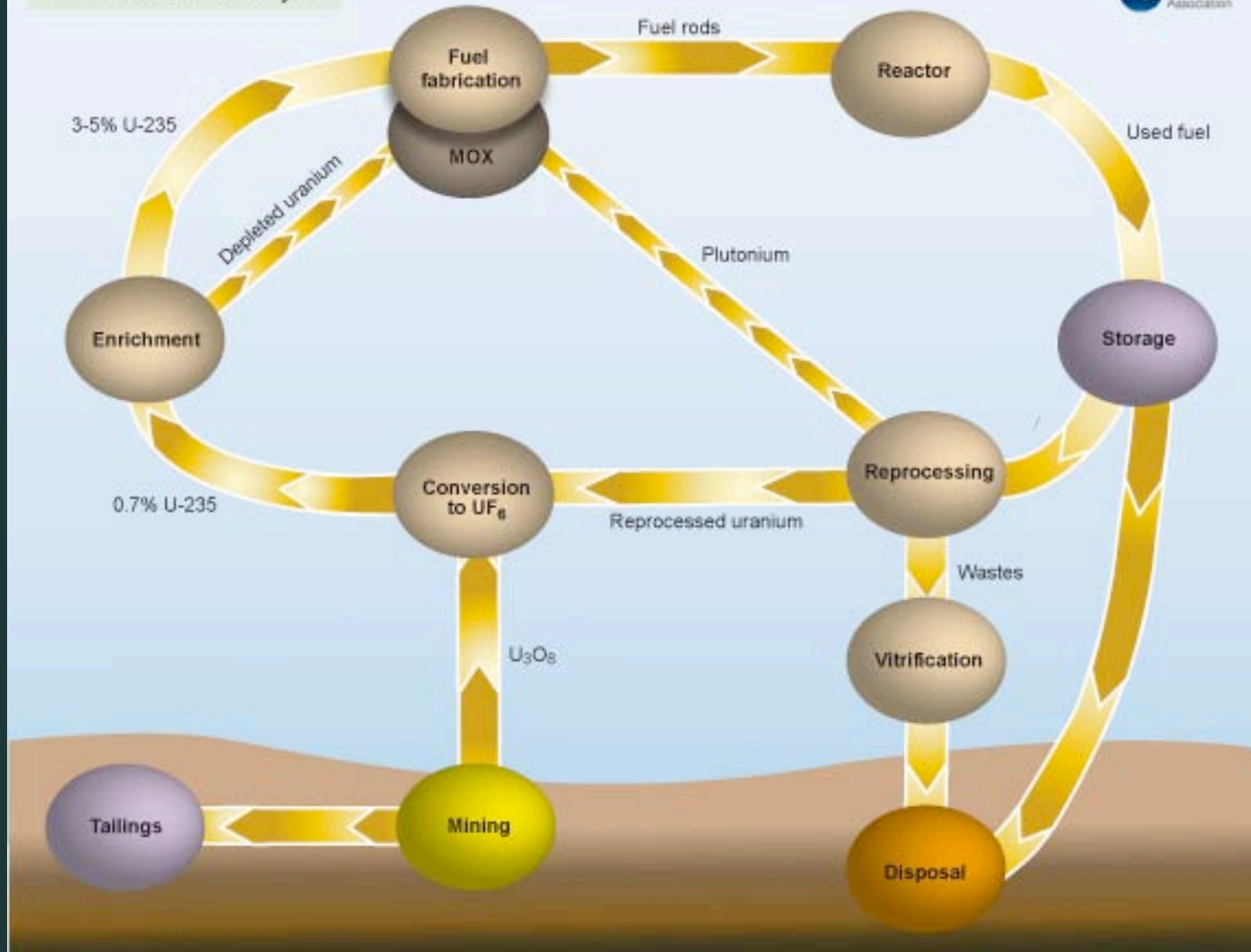
Elementi di combustibile

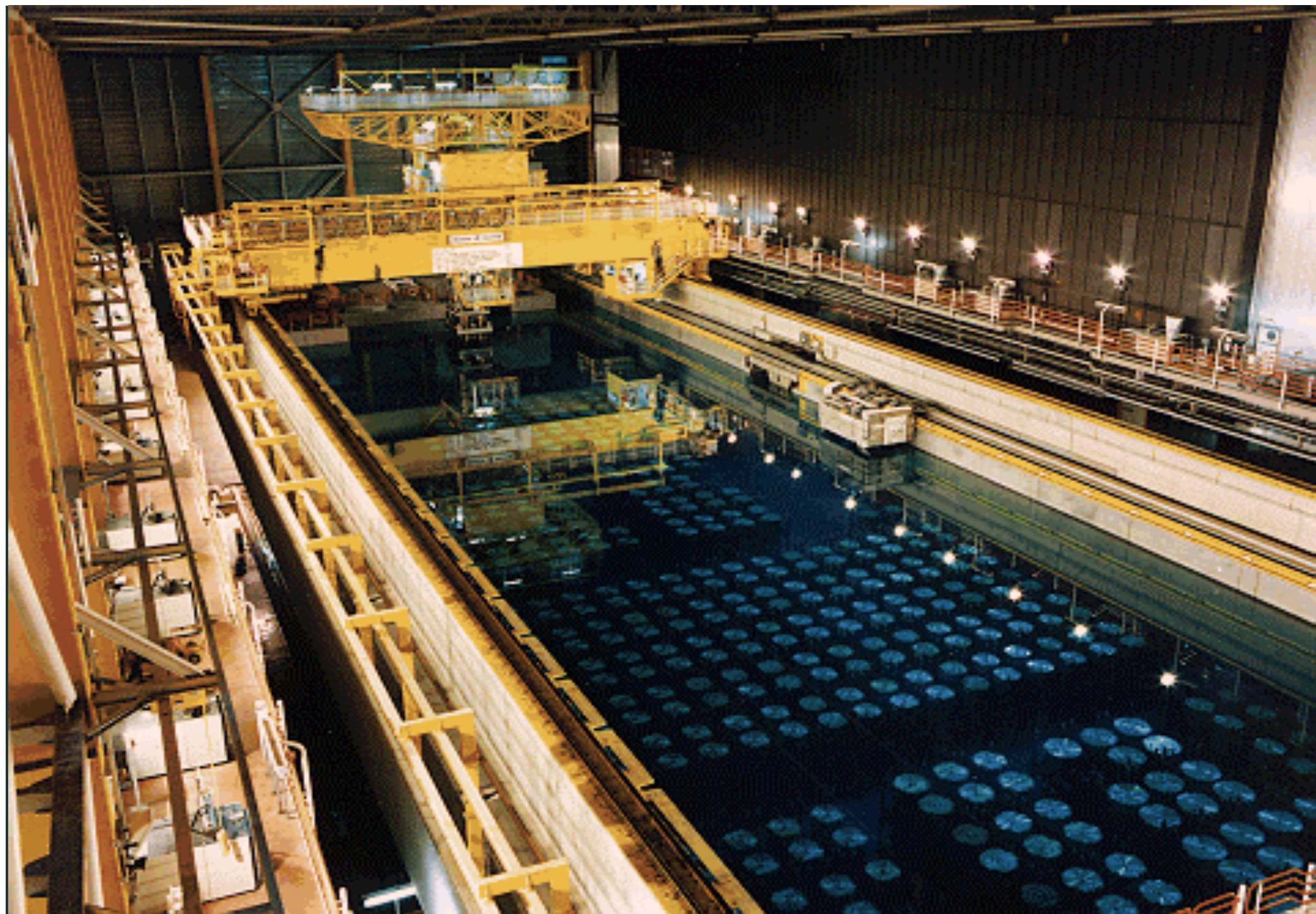
- pastiglie di ossido di uranio UO_2 ceramiche
1 cm diametro e 1,5 cm lunghezza
- barre di combustibile lunghe alcuni metri
in un tubo di zirconio permeabile ai neutroni e
resistente alla corrosione
- nei reattori ad acqua rifornimento a reattore
spento solitamente ogni 2 anni
- nei reattori a grafite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

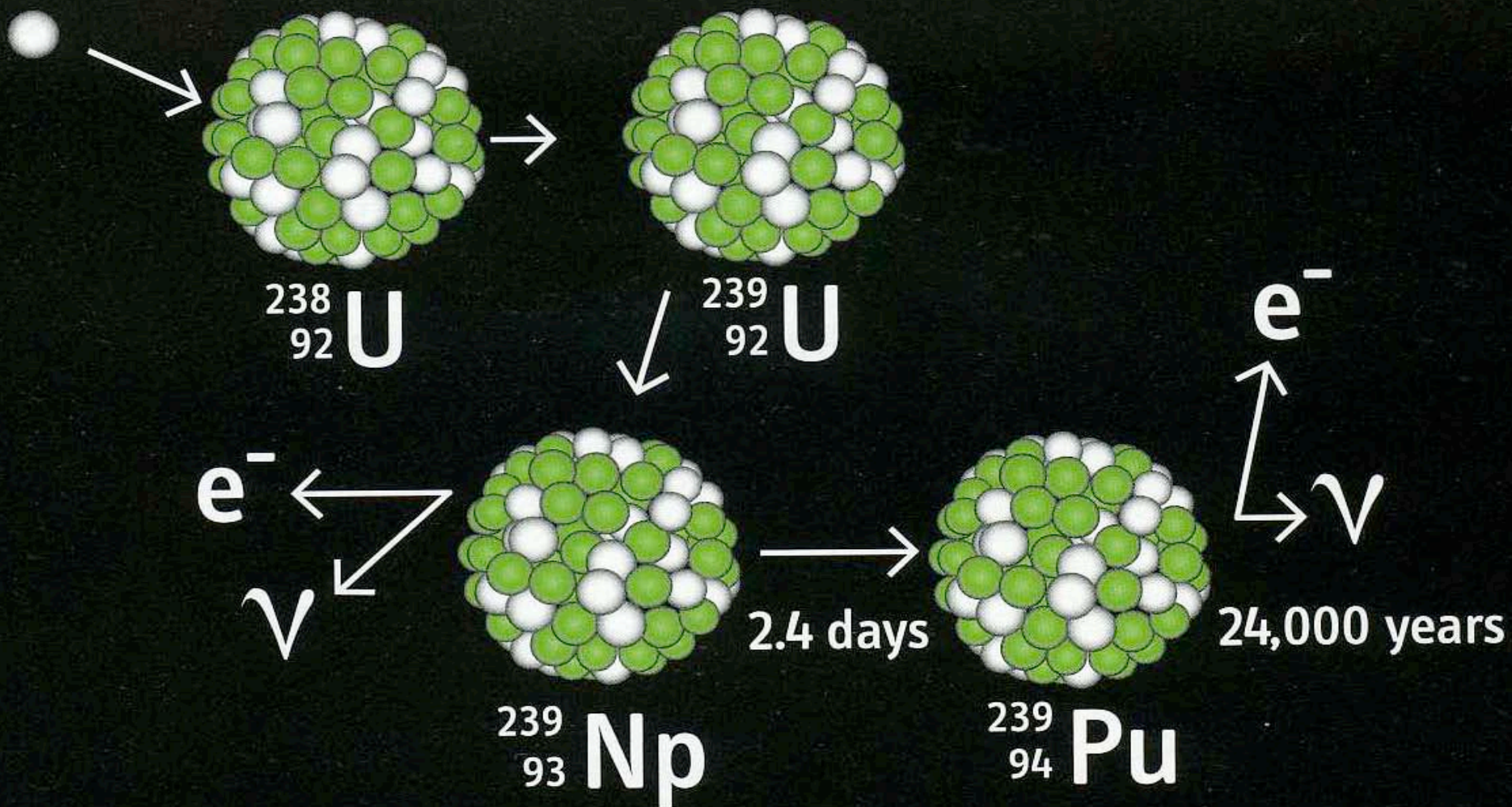
combustibile

- ossido di uranio leggermente arricchito
 - ~ 2,5% per i BWR
 - ~ 4,5% per i PWR
- MOX miscela di ossidi di uranio naturale o impoverito con ~ 5% di plutonio

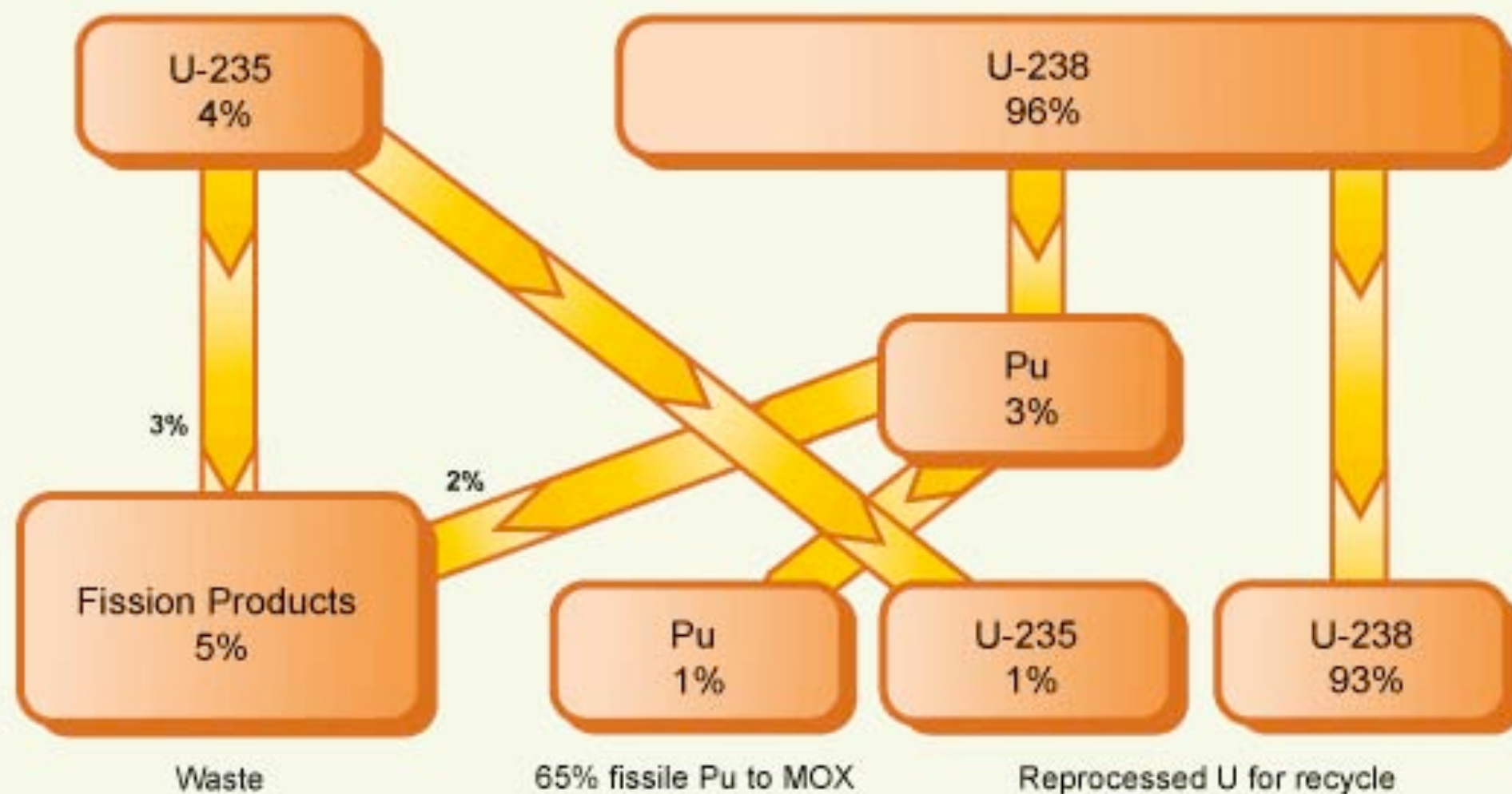
The Nuclear Fuel Cycle







Reaction in standard UO_2 fuel

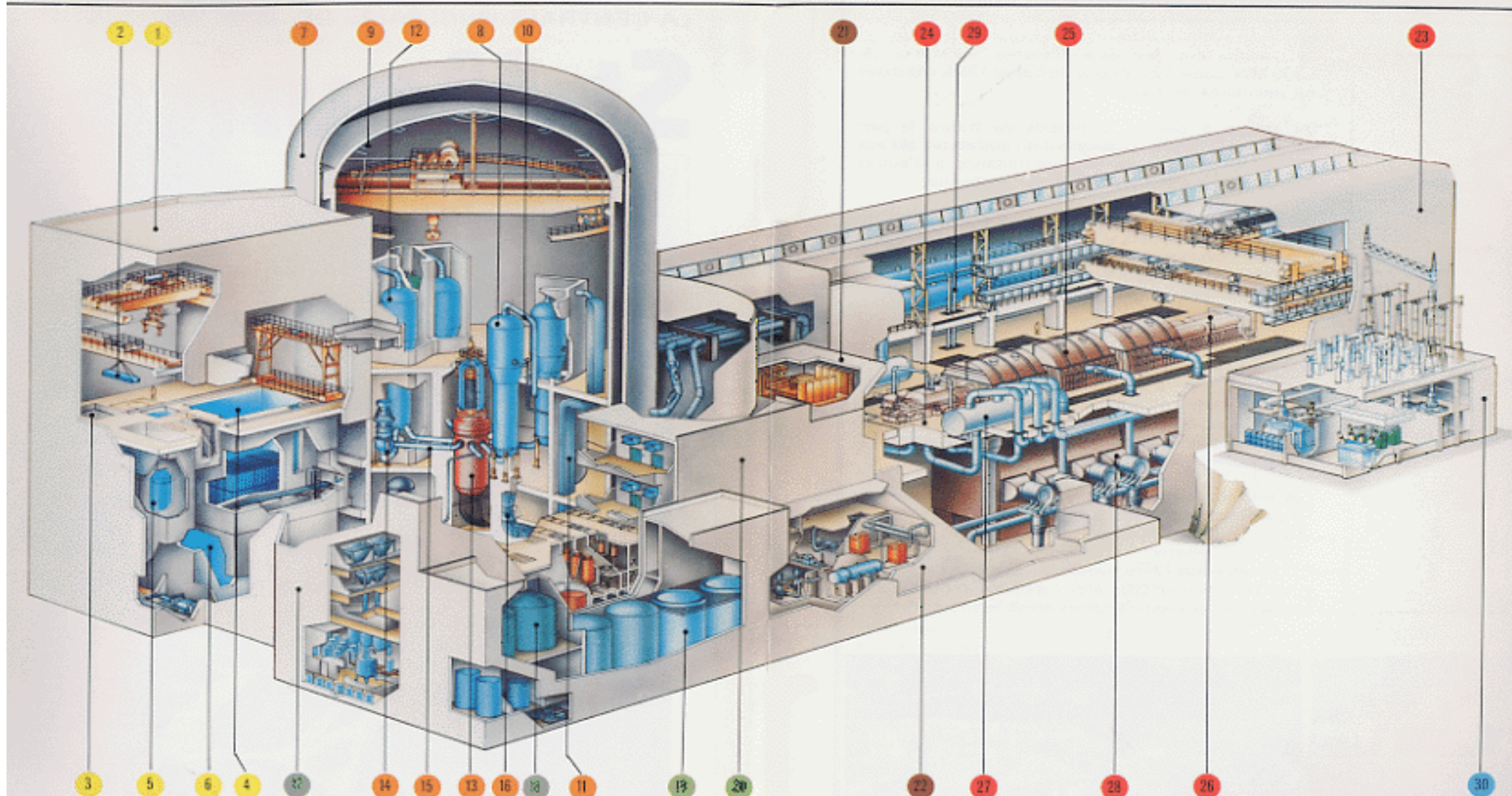


Basis: 45,000 MWd/t burn-up, ignores minor actinides

Reattori ad acqua in pressione (PWR)

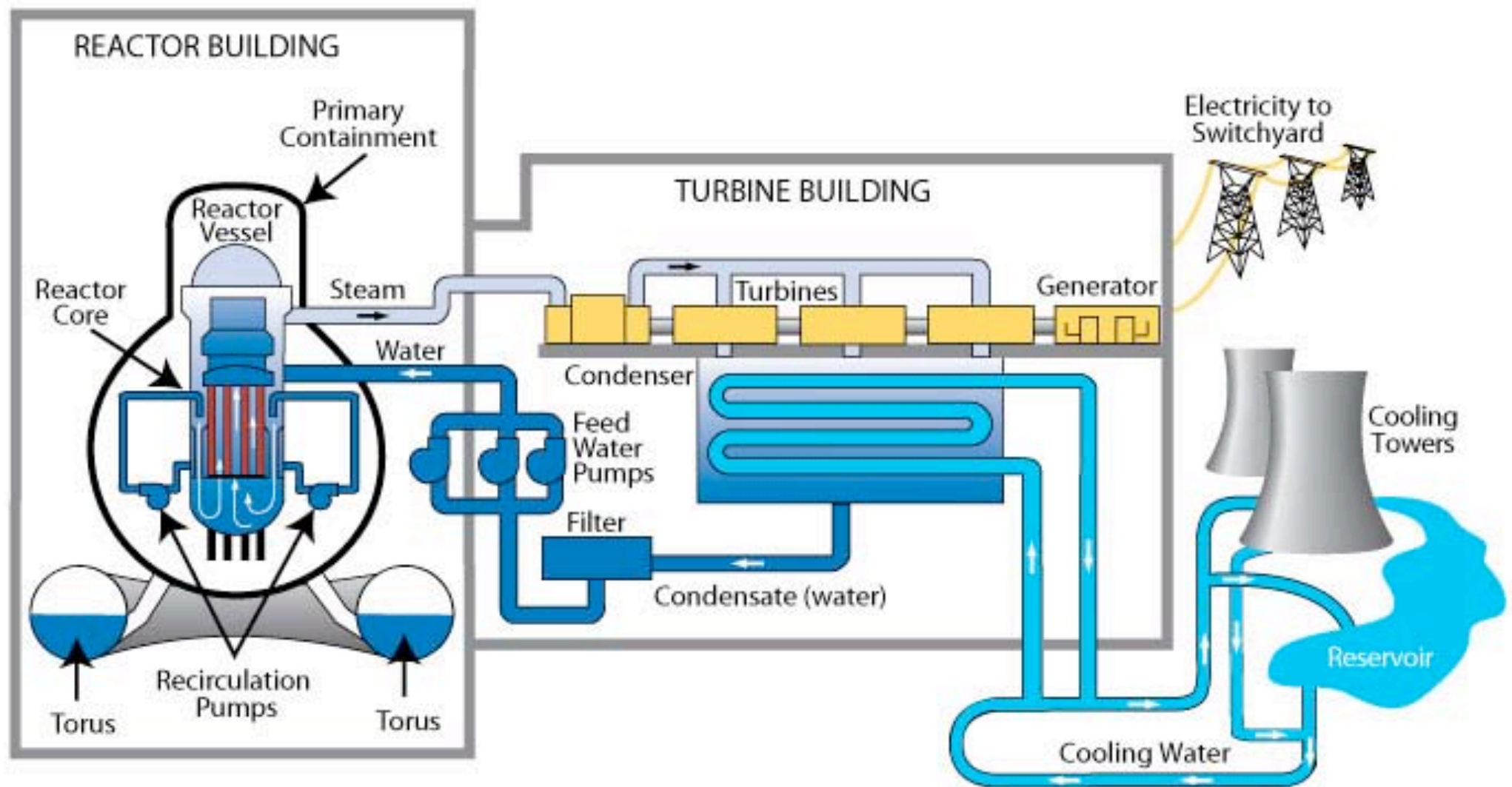
- originati per reattori navali
- due circuiti di refrigerante separati
- 150-250 elementi di combustibile composti da 200-300 barre per 80-100 t di uranio
- temperatura dell'acqua ~325 C
- pressione dell'acqua 150 atmosfere
- nocciolo alto 15 m e diametro 5 m

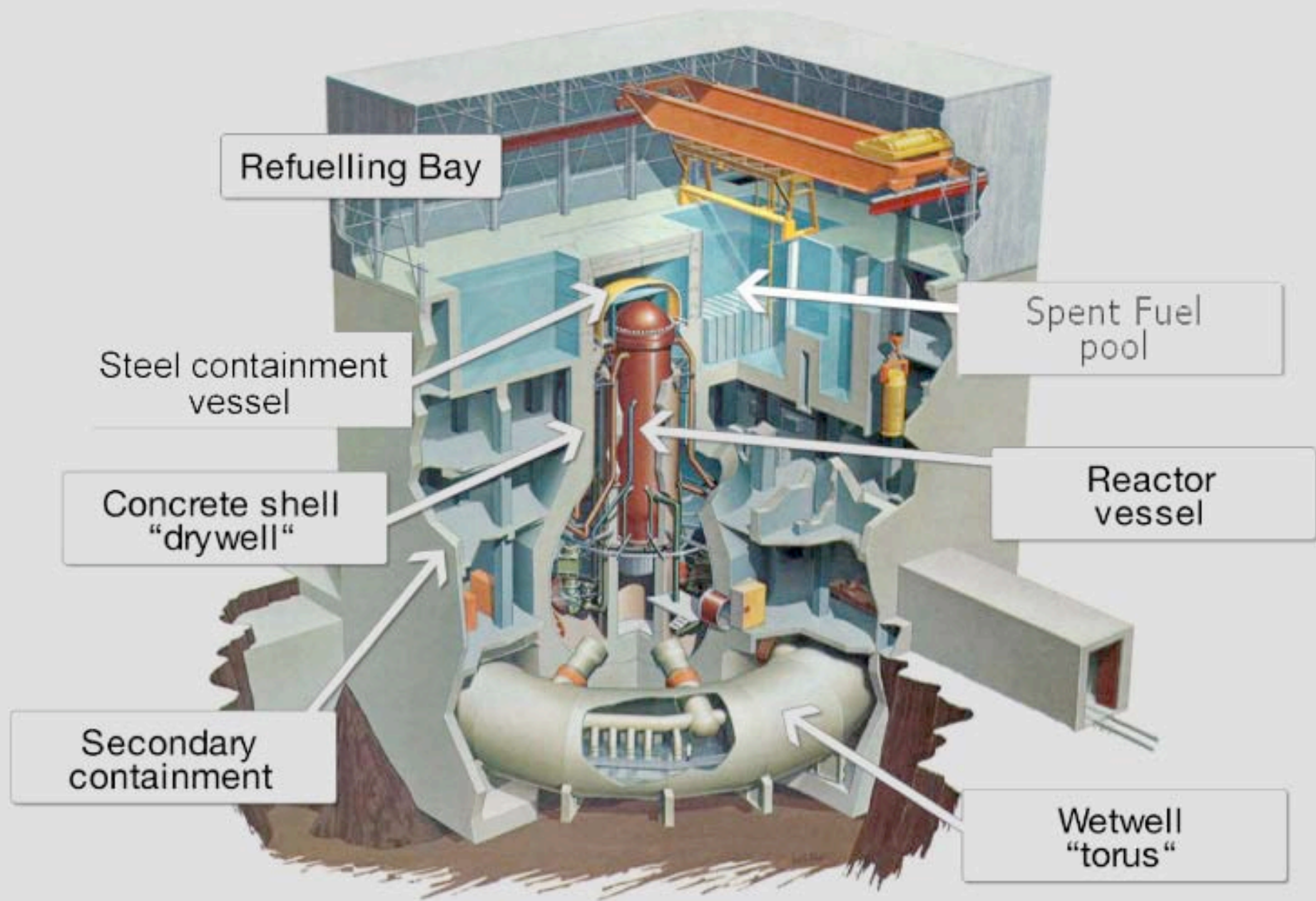
TRANCHE NUCLÉAIRE DE 1300 MW A EAU LÉGÈRE SOUS PRESSION

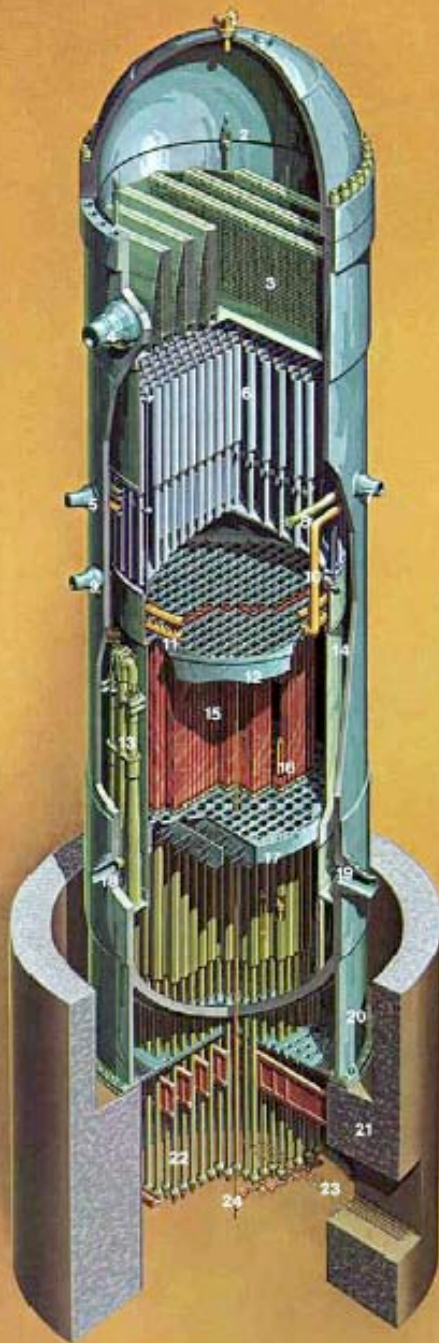


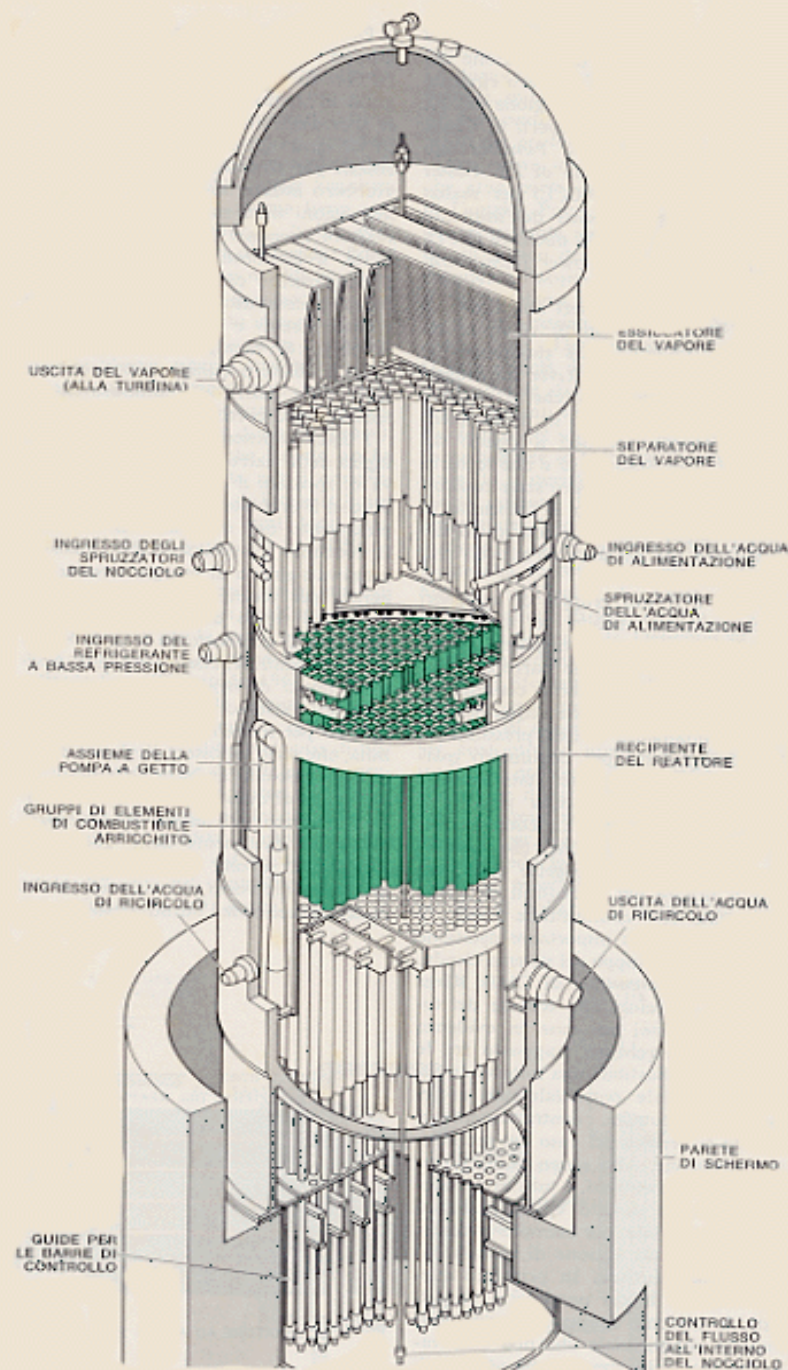
Reattori ad acqua bollente (BWR)

- unico circuito di raffreddamento primario
- l'acqua bollendo genera il vapore per le turbine
- temperatura dell'acqua $\sim 285^{\circ}\text{C}$
- pressione dell'acqua ~ 75 atmosfere
- nocciolo alto ~ 20 m e diametro 6 m
- 750 elementi di combustibile di 90-100 barre
carico totale 165 t di combustibile
- vapore nella parte superiore del reattore viene essicato prima di uscire dal "vessel"

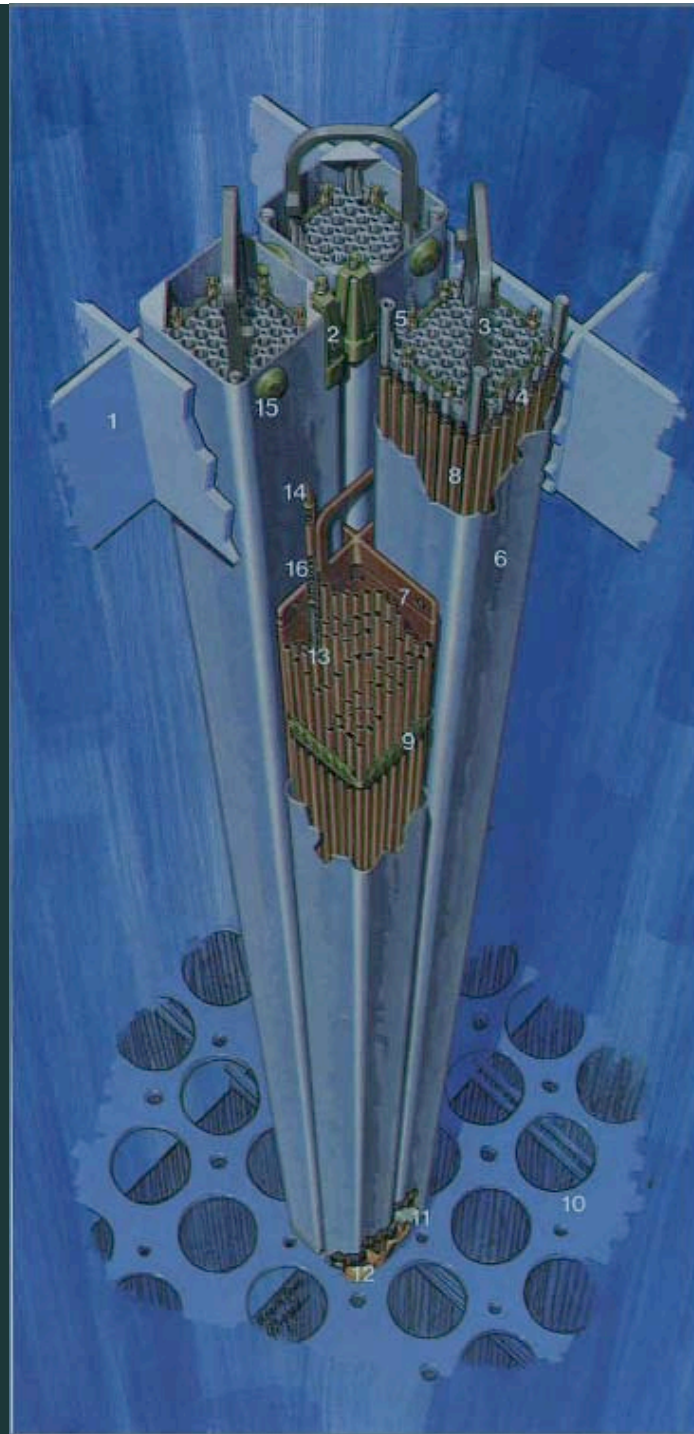


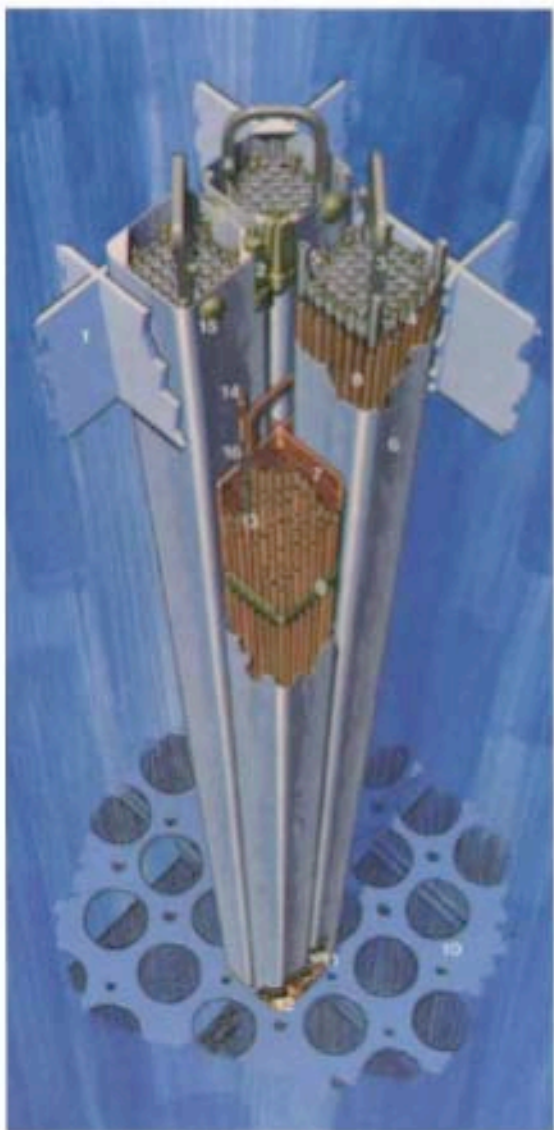






Il reattore ad acqua bollente richiede un sistema a circuito chiuso.





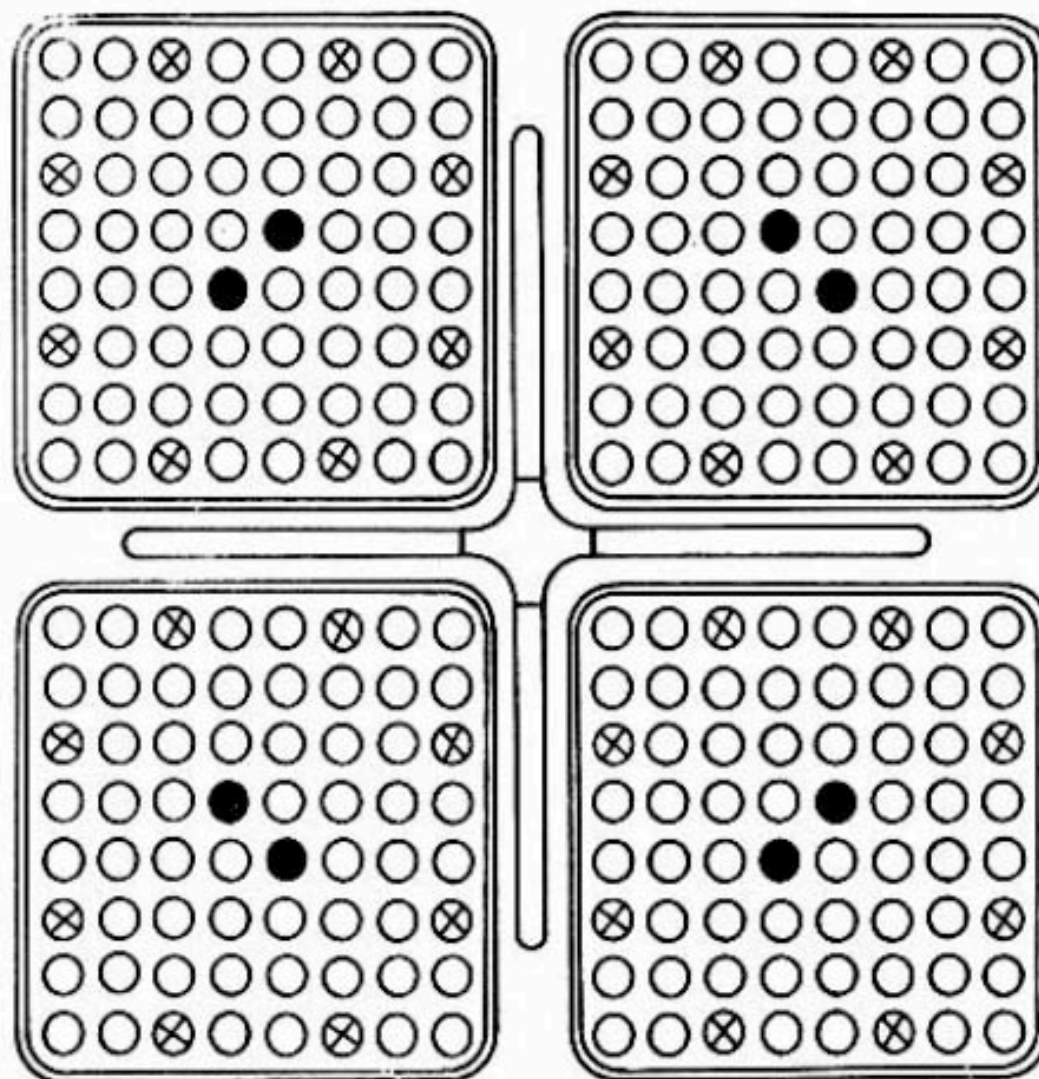
Modulo di combustibile



Barra di controllo

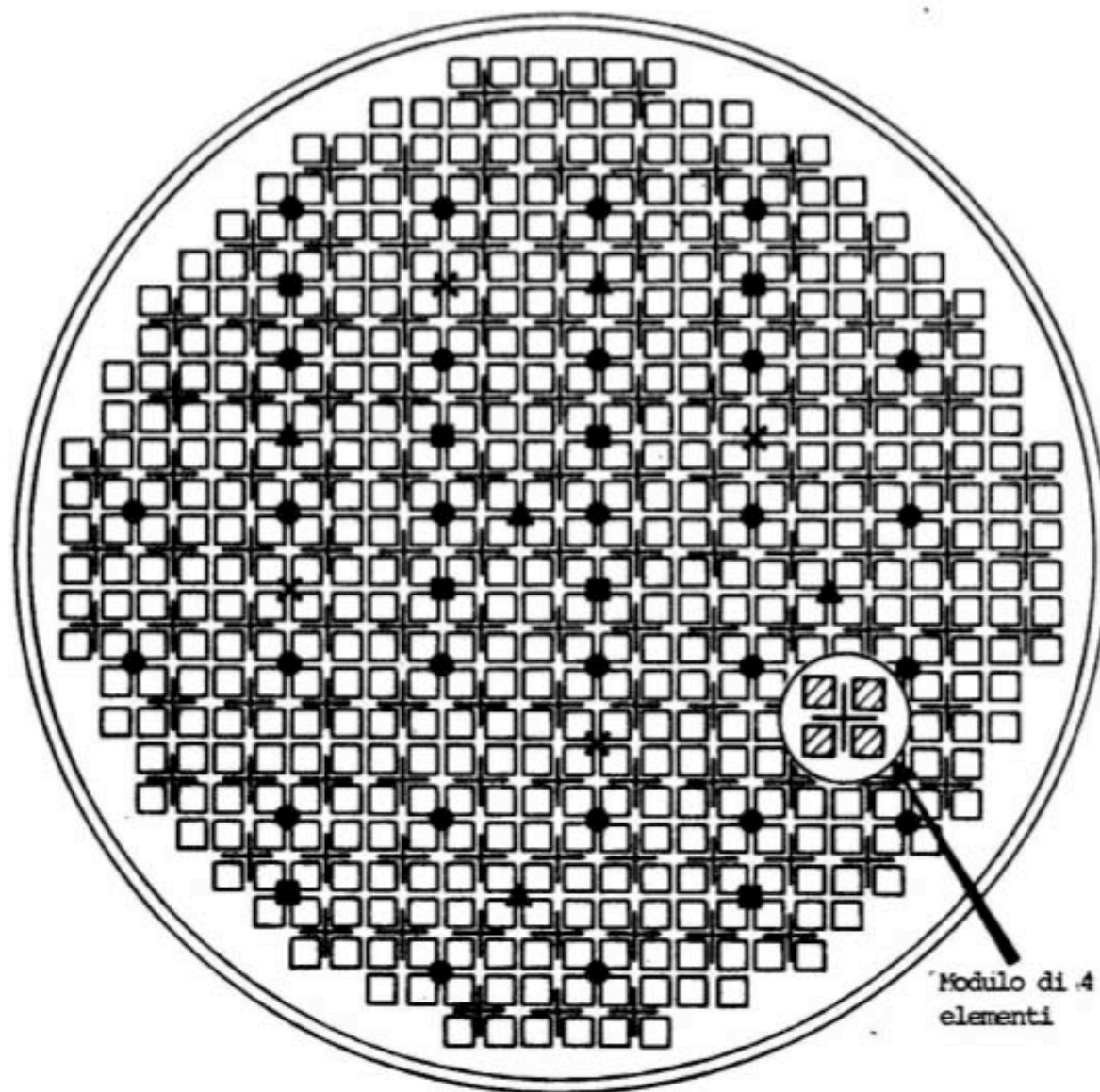


Elemento di combustibile



○ barra di combustibile
● barra d'acqua

modulo contenente 4 elementi di combustibile



+ Barra di controllo

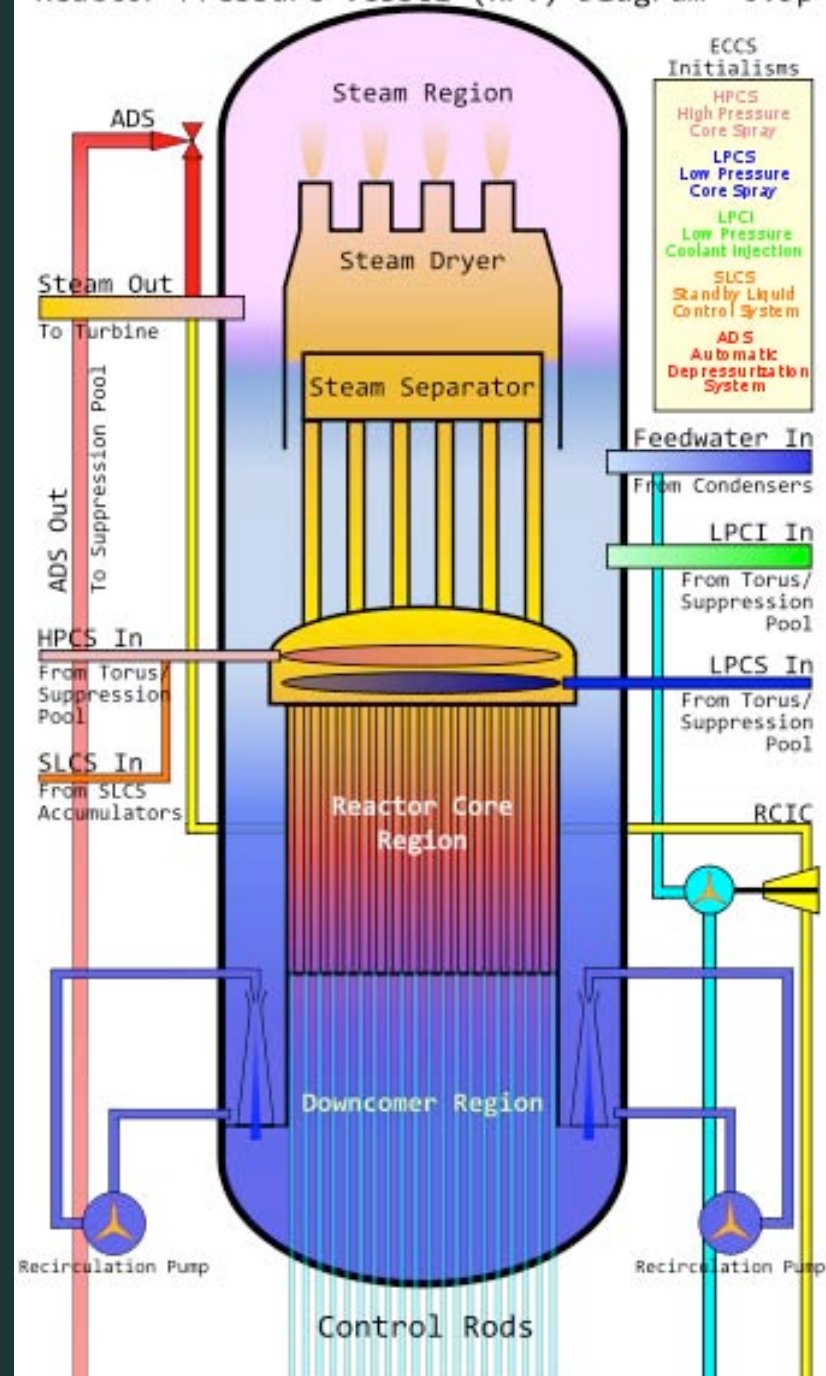
□ Elem. combustibile

▲ Sorgente

■ }
 X } Strumentazione "in core"
 ● }

Sezione del nocciolo a 624 elementi

Boiling Water Reactor (BWR) Reactor Pressure Vessel (RPV) Diagram 0.5β



Autoregolazione dei BWR

- la parte superiore degli elementi di combustibile è immersa in una miscela bifase acqua-vapore che riduce l'effetto di moderazione dei neutroni e la densità di potenza
- autoregolazione: si può variare la potenza senza agire sulle barre di controllo aumentando o riducendo il flusso d'acqua in modo da variare il livello della parte in acqua del combustibile e quindi la frequenza delle reazioni

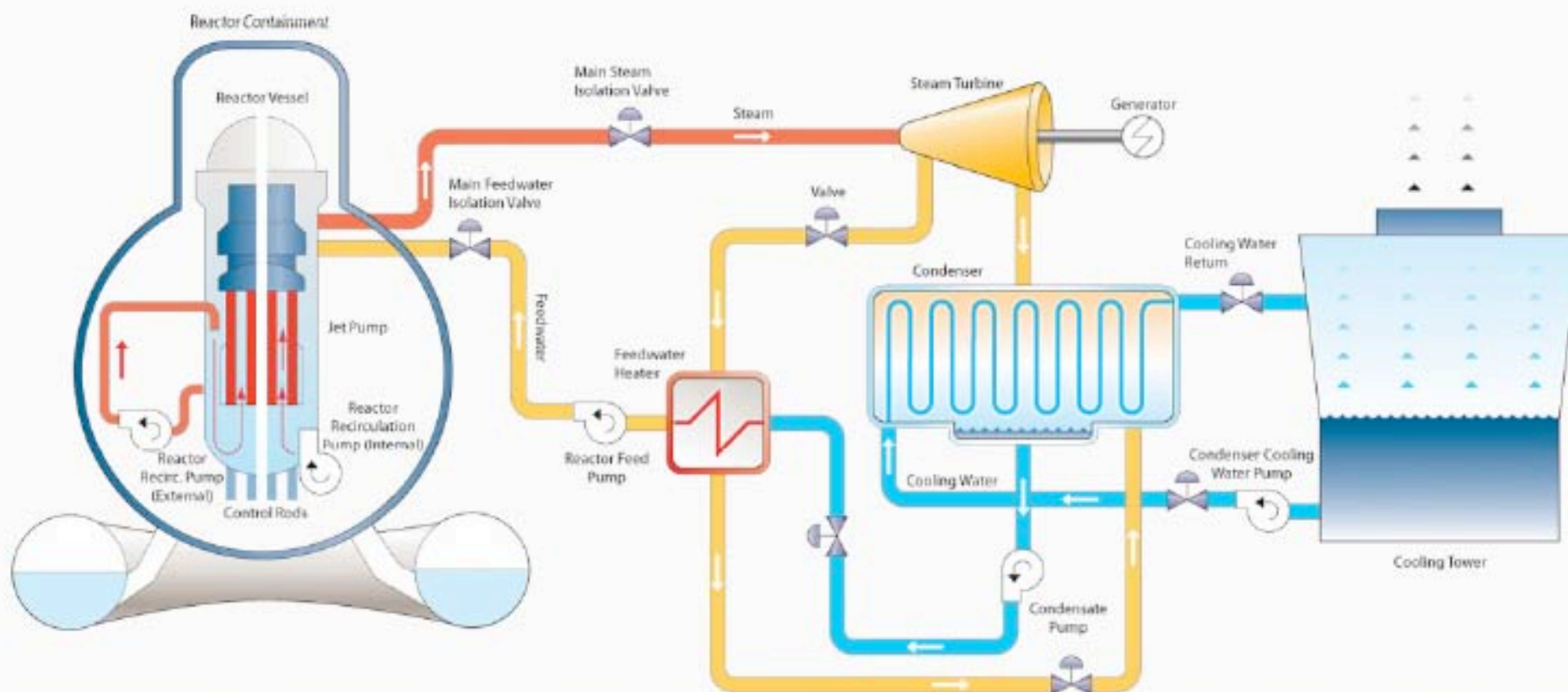
Sistemi di raffreddamento

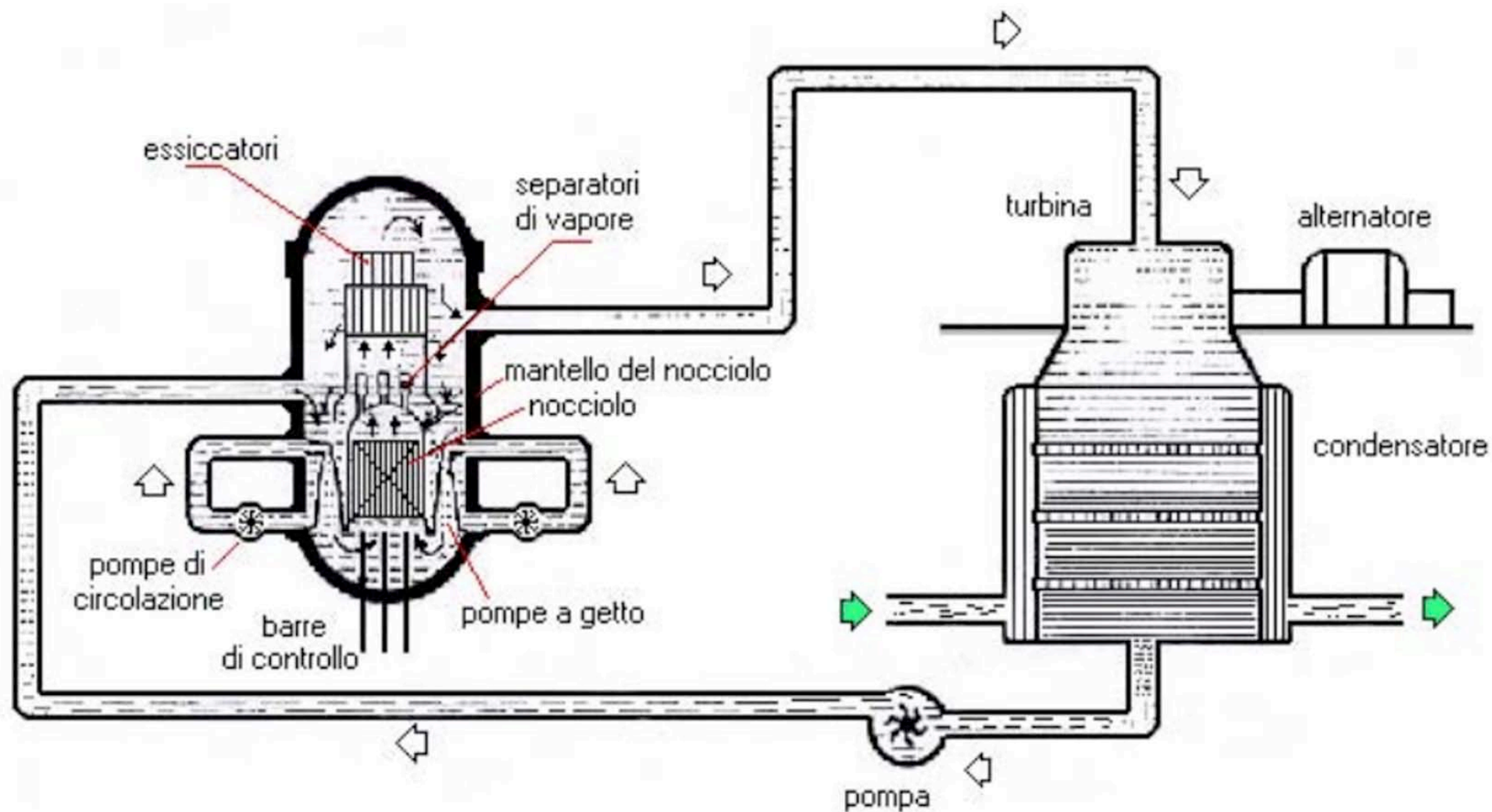
In condizioni operative normali operano due sistemi di raffreddamento:

- il sistema primario introduce acqua a bassa temperatura nel nocciolo a mantenere costante il livello e compensare il vapore generato che viene estratto per far girare le turbine;
- il sistema secondario raffredda il vapore all'uscita dalle turbine condensandolo in acqua che viene ripompata nel nocciolo;

il calore residuo del circuito secondario viene disperso in mare o in torri di raffreddamento.

Nuclear Boiling Water Reactor (BWR) Process Diagram





Le barre di controllo, utilizzate per l'arresto del reattore e per mantenere una uniforme distribuzione di potenza all'interno del reattore stesso, sono inserite dal basso da un sistema ad azionamento idraulico ad alta pressione.

Un anello toroidale di acqua o una piscina di soppressione sono utilizzati per asportare il calore in caso di arresto improvviso del reattore.

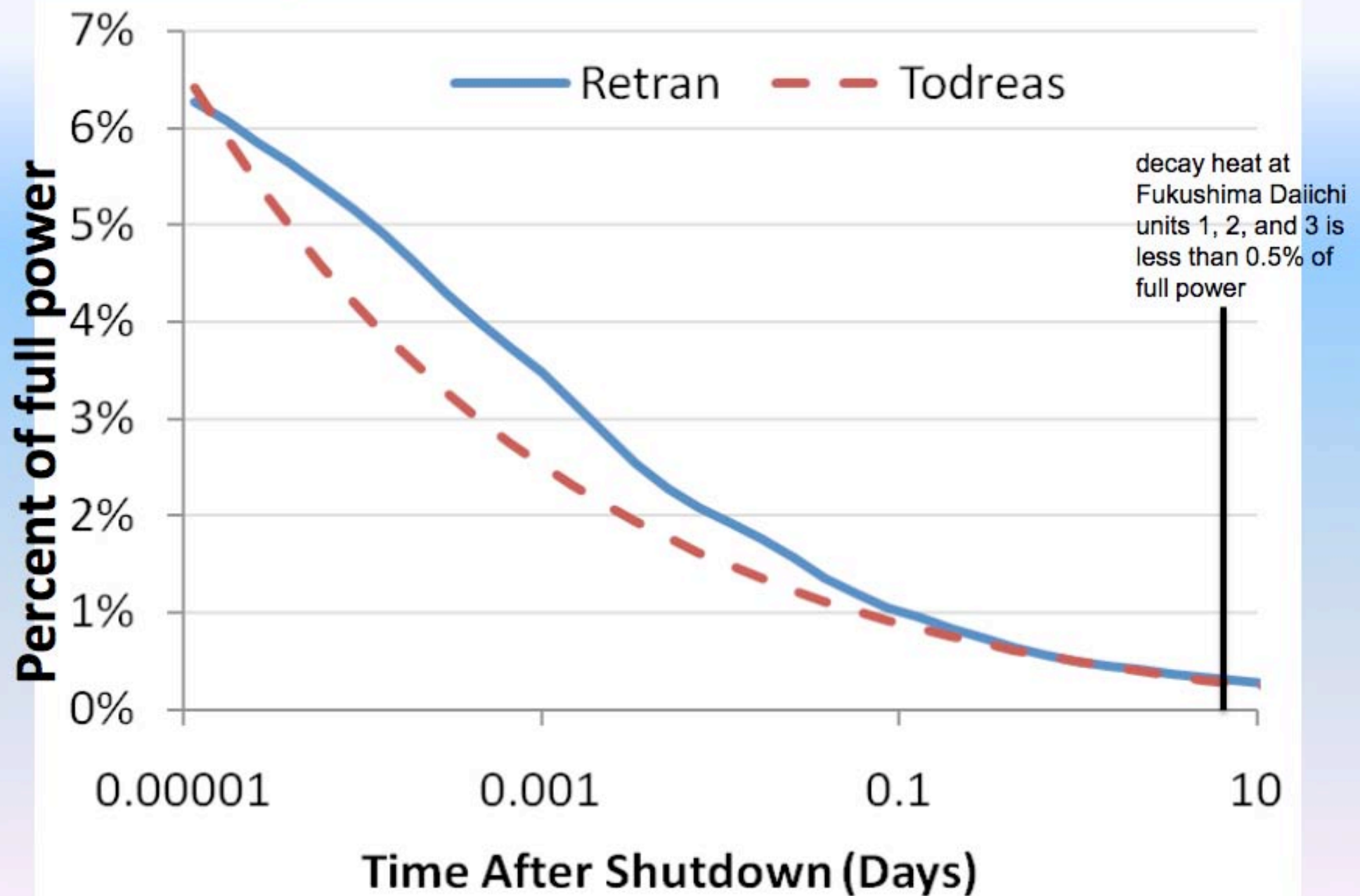
A reazione spenta

La refrigerazione del nocciolo deve continuare anche a reattore spento:

la radioattività del combustibile, dei prodotti di fissione e del materiale attivato dai neutroni produce calore

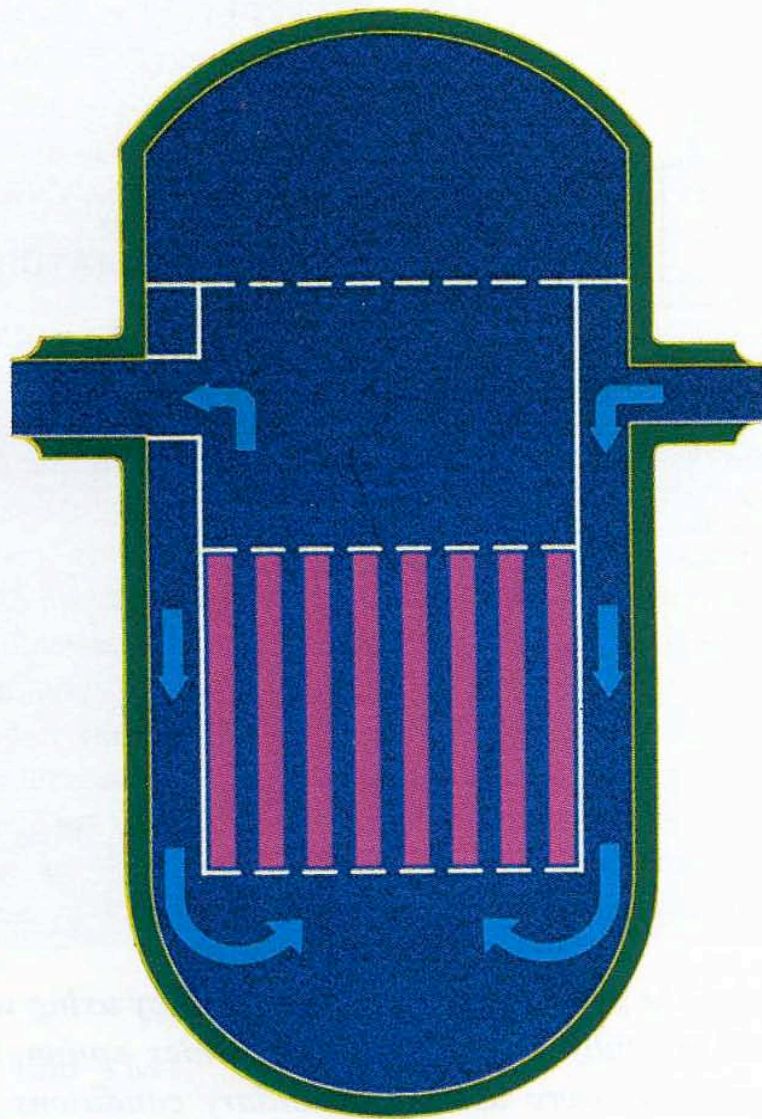
il reattore conserva una potenza residua, che allo spegnimento raggiunge tipicamente il 6% della potenza d'esercizio, per ridursi nel giro di qualche giorno ai valori minimi della configurazione di "spegnimento freddo", se la refrigerazione continua regolarmente.

Decay Heat Generation After Shutdown

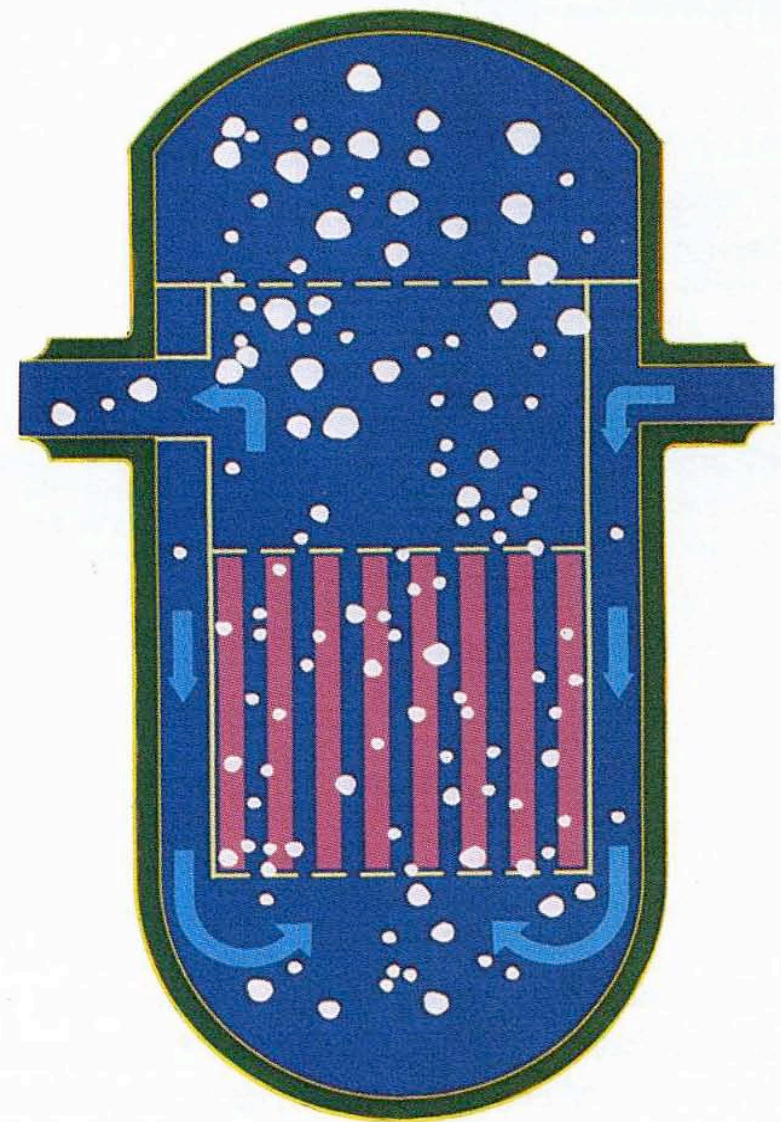


Rischi del riscaldamento del nocciolo

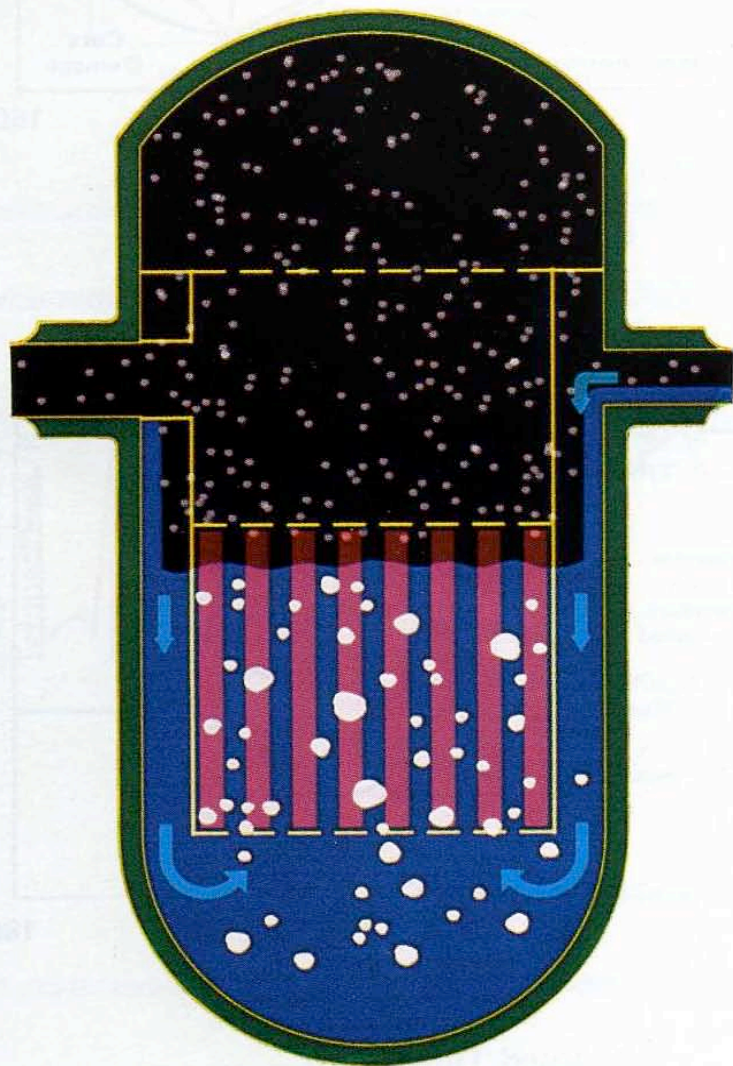
- l'acqua evapora scoprendo le barre
- lo zirconio reagisce col vapore producendo idrogeno
- l'idrogeno in presenza di ossigeno libero può incendiarsi o esplodere
- le barre possono perdere la protezione e liberare sostanze radioattive
- le barre in parte o in toto possono fondere liberando radiazione e danneggiando gli schermi di contenimento



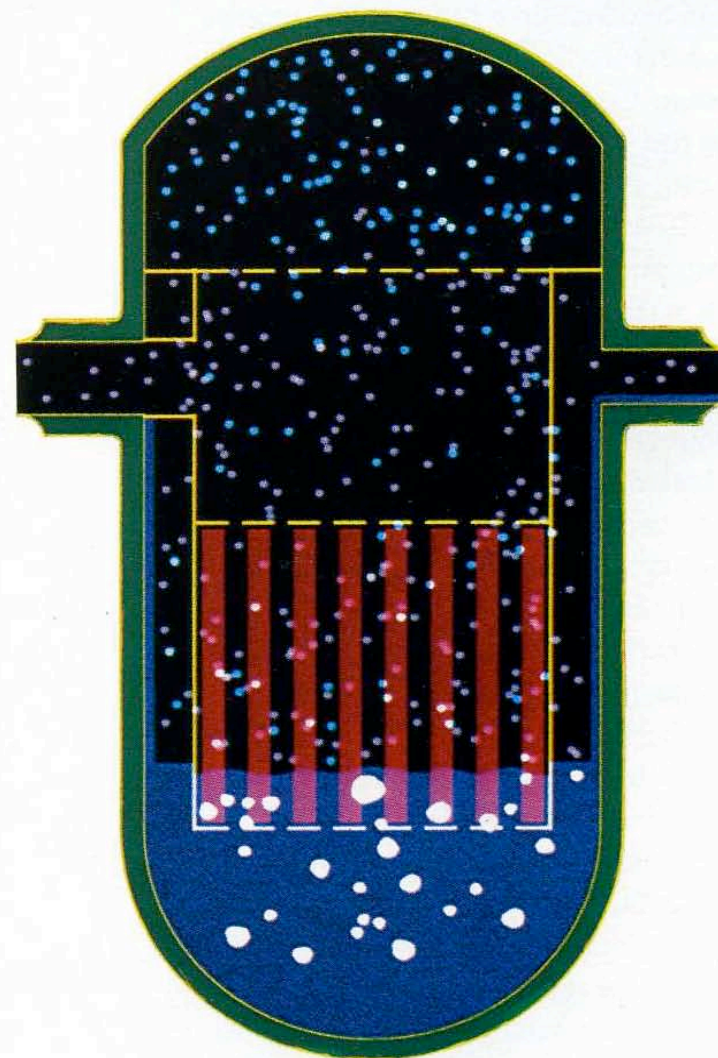
$t = 0$
Normal operation



$t = 70$ min
Equilibrium conditions in core
Cooling by boiling and forced convection



$t = 102 \text{ min}$
Primary pumps off
Steam and water separate
Cooling by natural convection
Core temperature rises



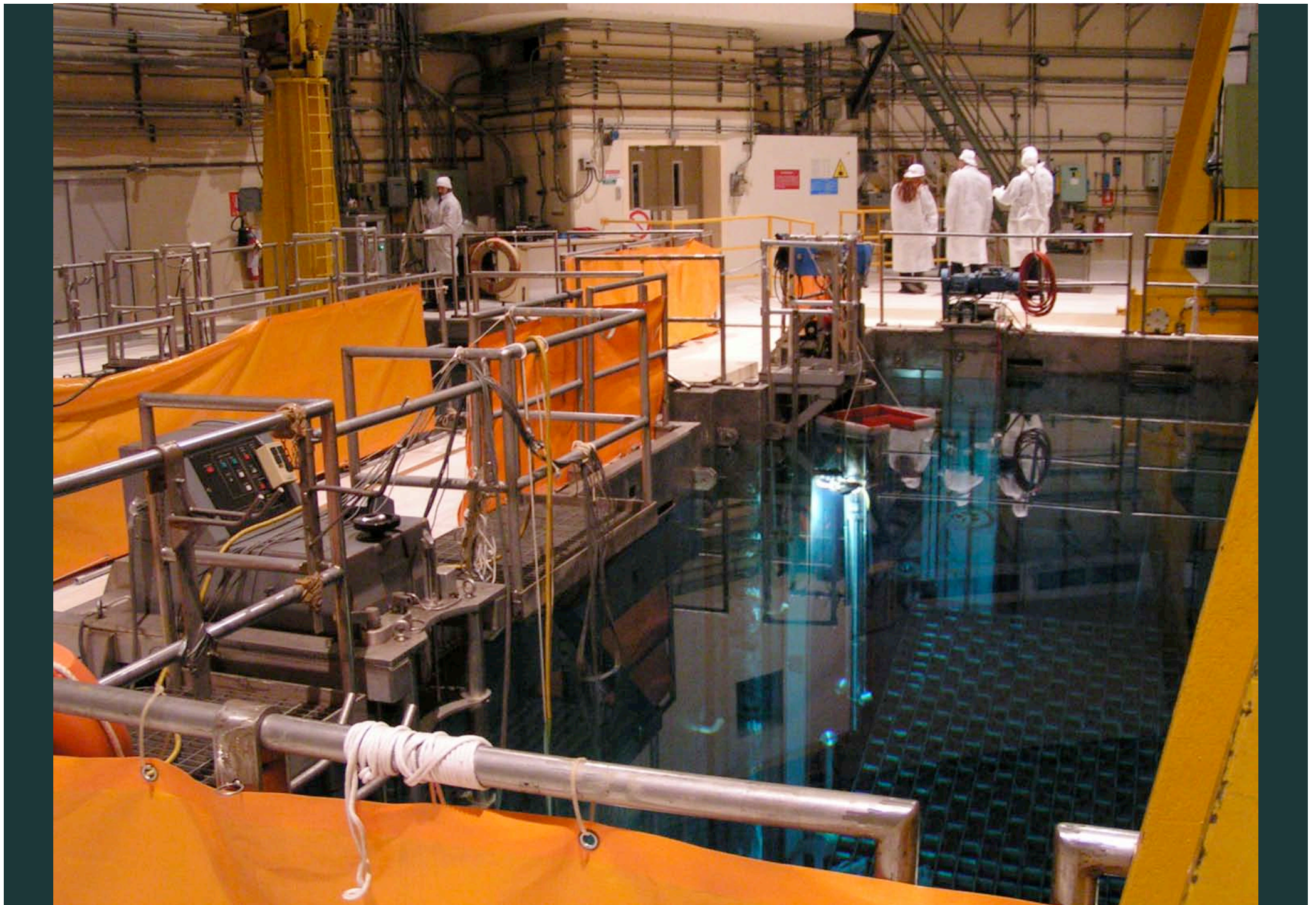
$t = 180 \text{ min}$
Vessel head filled with hydrogen from cladding
oxidation
Upper 75% of core uncovered

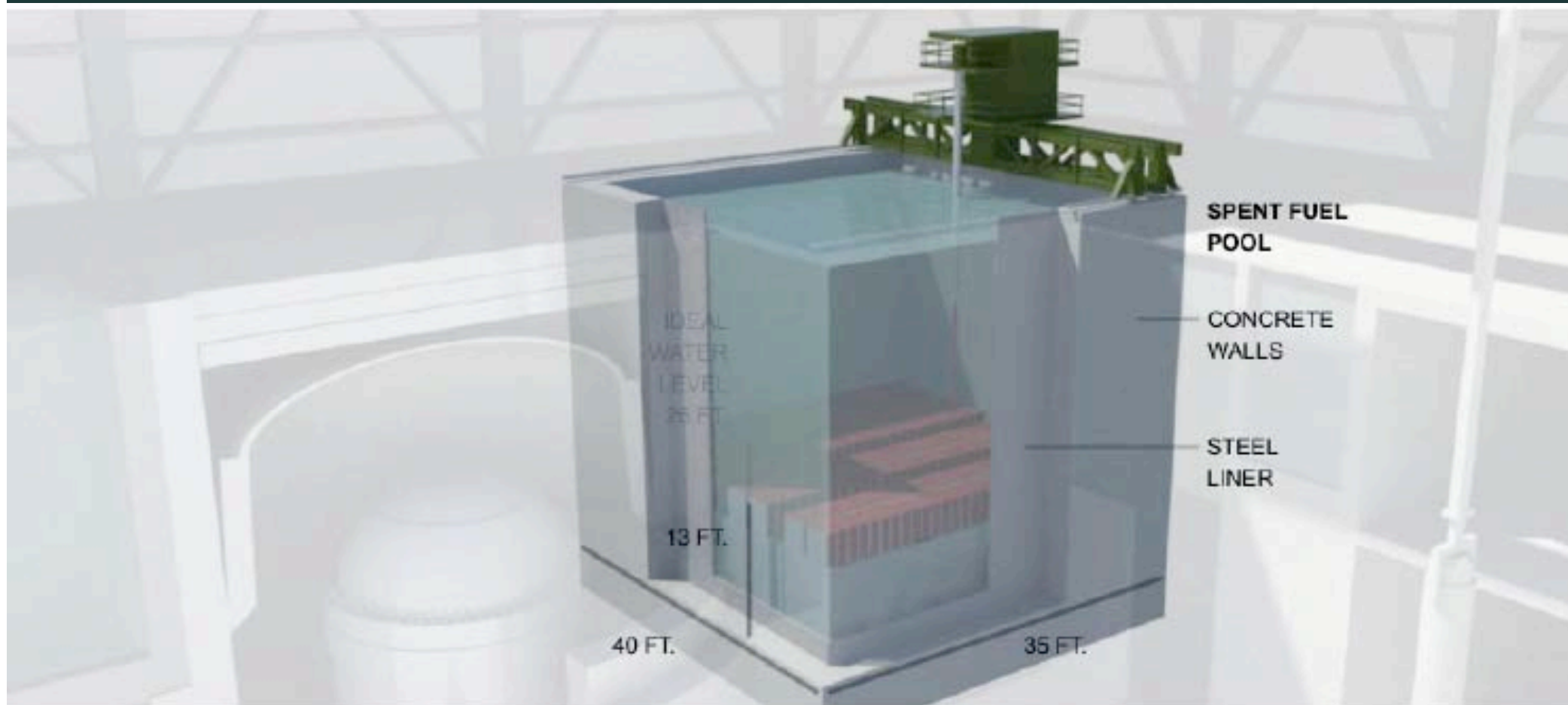
deposizione degli elementi di combustibile esausto

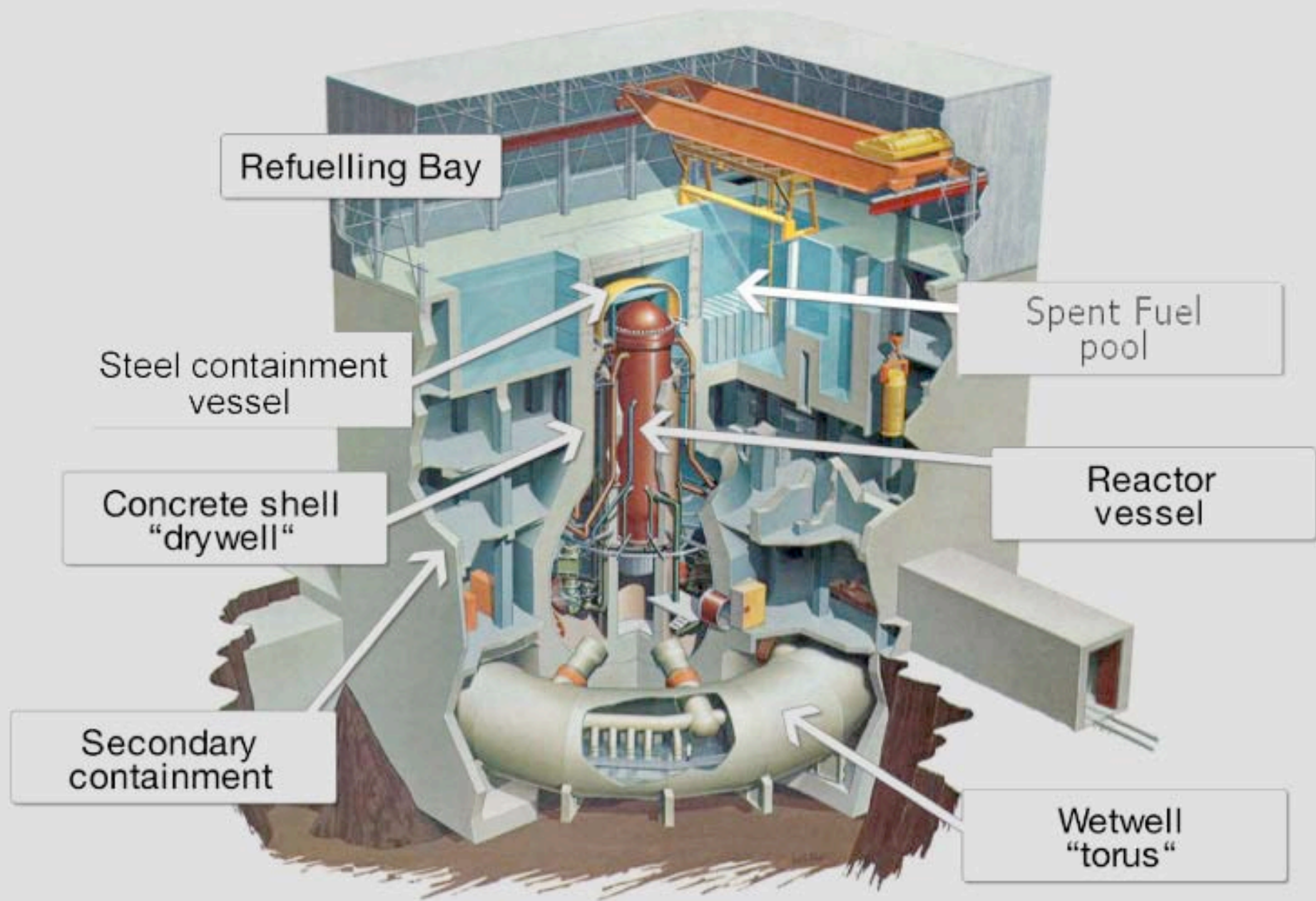
- le barre di combustibile esausto calde e radioattive vengono estratte dall'alto con gru mantenendole immerse in acqua
- sono riposte in cisterne di acqua sopra il reattore
- rimangono immerse in acqua borata di livello molte volte la loro lunghezza
- le barre vengono conservate in strutture rigide a distanze adeguate a impedire il raggiungimento di condizioni di criticità

Problemi nelle vasche del combustibile esausto

- in mancanza di raffreddamento evapora parte dell'acqua di copertura
- a temperature sopra $\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ si innesca la reazione del zirconio con l'acqua producendo ossido di zirconio e idrogeno
- l'idrogeno può incendiarsi in aria e produrre esplosioni
- materiale radioattivo dalle barre si diffonde nell'ambiente







Pierot