



**scienza attiva<sup>®</sup>**

**Energia Nucleare**  
Principi, Applicazioni, Problemi

Stefano Arigirò - Giorgia Mila

Università di Torino – Dipartimento di fisica sperimentale e  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



# Introduzione

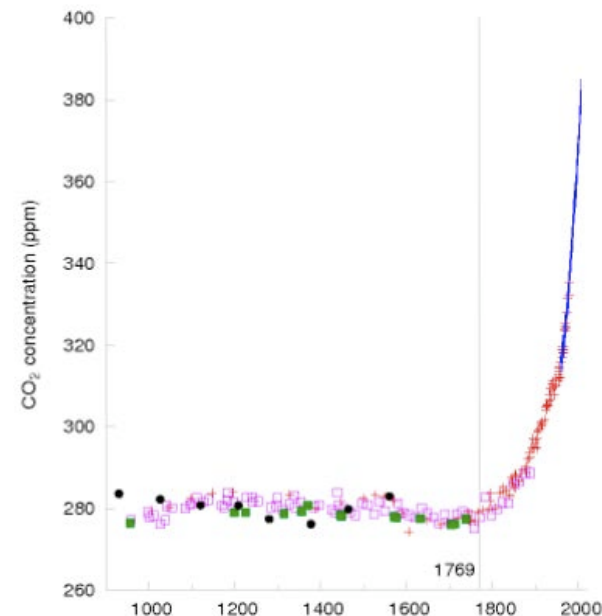
- Il problema energetico e climatico
- Energia Nucleare: Principi Fisici
- Schema di funzionamento
- Sicurezza ed Incidenti
- Ciclo del Combustibile
- Considerazioni Economiche
- Reattori di IV generazione
- Il caso: Fukushima
- Conclusioni



# Il problema energetico e Climatico

La componente antropica del riscaldamento globale è un fatto accertato. Tra i principali responsabili di questo fenomeno vi sono i gas serra ( $\text{CO}_2$ ), la cui presenza nell'atmosfera è aumentata considerevolmente dagli anni della Rivoluzione Industriale.

La figura mostra la concentrazione di  $\text{CO}_2$  (in parti per milione) negli ultimi 1100 anni misurata con carotaggi nel ghiaccio per gli anni precedenti al 1977 e poi direttamente presso una stazione meteorologica situata nelle isole Hawaii.

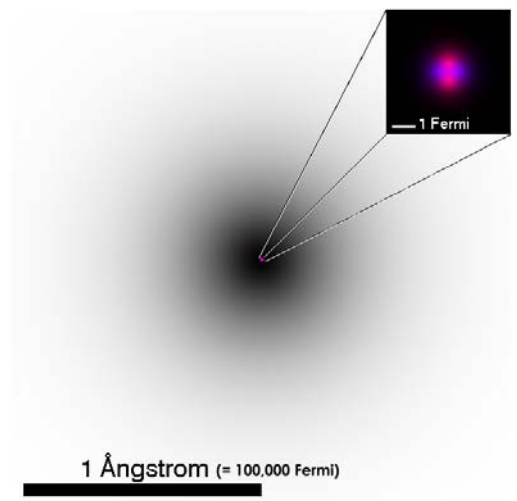
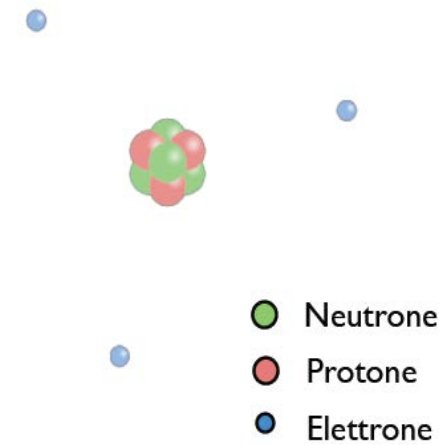


Per scongiurare un riscaldamento del pianeta di  $2^{\circ}\text{C}$  nei prossimi 100 anni dobbiamo ridurre le emissioni di un fattore 5 entro il 2050.

D'altra parte l'esaurimento delle riserve di idrocarburi spinge a cercare fonti "alternative" e possibilmente sostenibili.

# Principi Fisici – Atomi e Nuclei

La materia è costituita da atomi, con un nucleo centrale che porta praticamente tutta la massa e gli elettroni (carichi negativamente) che "orbitano" attorno ad esso. I protoni (carichi positivamente) ed i neutroni (neutri) formano il nucleo ed è per questo che sono detti "nucleoni".



Gli elettroni orbitano ad elevate distanze dal nucleo [per esempio, se il nucleo avesse le dimensioni di una mela gli elettroni si troverebbero a 1Km di distanza]. La gran parte del volume di un atomo è dunque priva di materia.

Gli elettroni sono legati al nucleo dalla forza elettromagnetica, mentre i nucleoni sono legati dall'interazione nucleare forte.

# Elementi ed Isotopi

Si definisce:

**Z:** numero atomico [numero di protoni/elettroni]

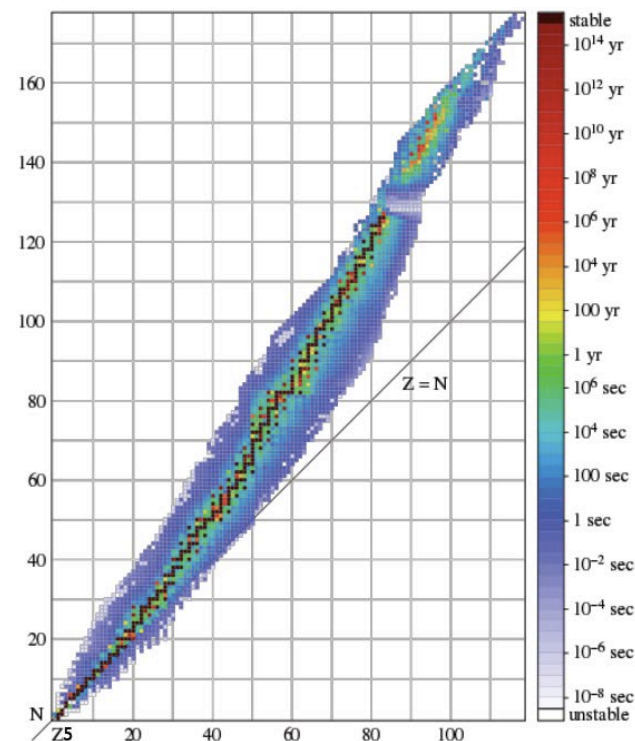
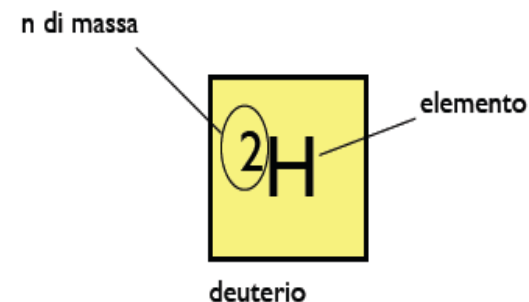
**A:** numero di massa [numero di protoni+neutroni]

Un elemento viene definito dal suo numero atomico  $Z$ .

Si dicono "isotopi" tutti i nuclei appartenenti ad uno stesso elemento (egual  $Z$ ) ma con diverso numero atomico.

I nuclei possono esistere in diverse configurazioni e si possono trasformare. Le configurazioni possono essere più o meno stabili.

La figura mostra il tempo medio in cui un atomo rimane nella configurazione iniziale in funzione del suo numero di neutroni ( $N$  – asse verticale) e protoni ( $Z$  – asse orizzontale).

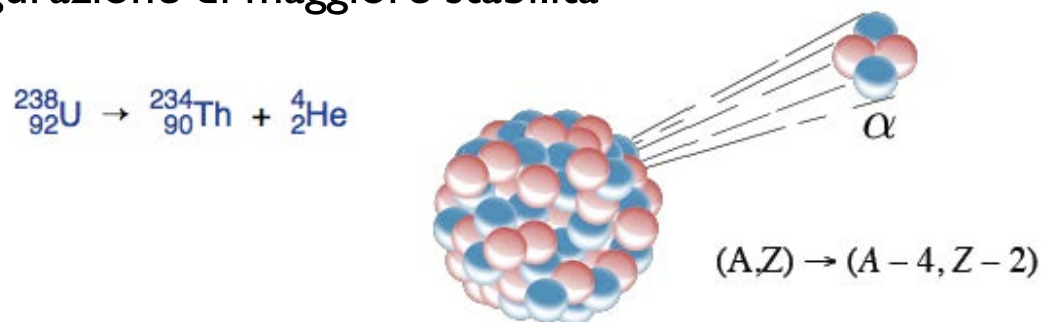


# Decadimento dei nuclei

Il decadimento radioattivo è un fenomeno che avviene spontaneamente per portare il nucleo ad una configurazione di maggiore stabilità

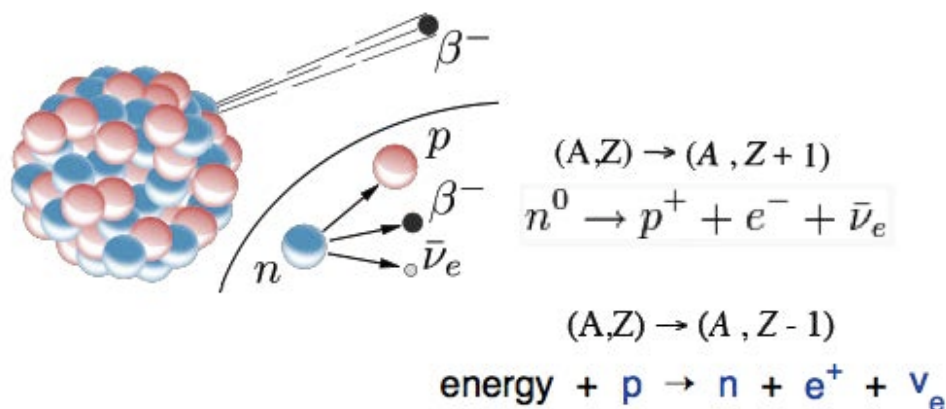
## Decadimento $\alpha$

Consiste nell'emissione da parte del nucleo di una particella  $\alpha$  ( $2p+2n$ ) di bassa energia. Un foglio di carta è sufficiente come schermatura.



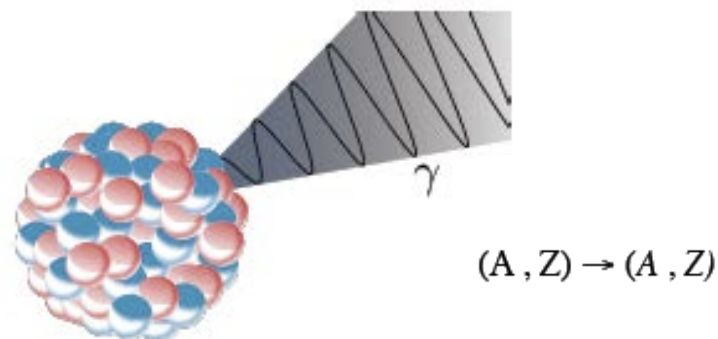
## Decadimento $\beta$

È un processo radioattivo che prevede l'emissione di una particella  $\beta$  (un elettrone o un protone). Tali particelle sono fermate da un foglio di alluminio.



## Decadimento $\gamma$

Avviene quando si ha la diseccitazione di un nucleo con emissione di un fotone. Solo spessi strati di piombo o tungsteno possono proteggere dai raggi  $\gamma$  più penetranti.



# Tempo di dimezzamento

Il decadimento radioattivo è un processo probabilistico che segue una legge esponenziale

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

numero di neutroni al tempo t      numero di neutroni al tempo 0      **VITA MEDIA**  
 (tempo medio che deve trascorrere prima che il nucleo decada)

La vita media viene di norma espressa tramite il TEMPO DI DIMEZZAMENTO che è il valore atteso del tempo  $t_{1/2}$  a cui il numero di atomi all'interno di una sostanza radioattiva si sarà ridotto della metà.

La relazione che lega le due quantità è:

$$t_{1/2} = \tau \cdot \ln(2)$$

Long-lived fission products					Medium-lived fission products				
Prop:	$t^{1/2}$	Yield	Q *	$\beta\gamma$	Prop:	$t^{1/2}$	Yield	Q *	$\beta\gamma$
Unit:	Ma	%	KeV	*	Unit:	a	%	KeV	*
<sup>99</sup> Tc	0.211	6.1385	294	$\beta$	<sup>155</sup> Eu	4.76	.0803	252	$\beta\gamma$
<sup>126</sup> Sn	0.230	0.1084	4050	$\beta\gamma$	<sup>85</sup> Kr	10.76	.2180	687	$\beta\gamma$
<sup>79</sup> Se	0.327	0.0447	151	$\beta$	<sup>113m</sup> Cd	14.1	.0008	316	$\beta$
<sup>93</sup> Zr	1.53	5.4575	91	$\beta\gamma$	<sup>90</sup> Sr	28.9	4.505	2826	$\beta$
<sup>135</sup> Cs	2.3	6.9110	269	$\beta$	<sup>137</sup> Cs	30.23	6.337	1176	$\beta\gamma$
<sup>107</sup> Pd	6.5	1.2499	33	$\beta$	<sup>121m</sup> Sn	43.9	.00005	390	$\beta\gamma$
<sup>129</sup> I	15.7	0.8410	194	$\beta\gamma$	<sup>151</sup> Sm	90	.5314	77	$\beta$



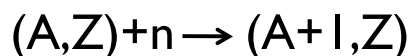
# Trasformazioni dei nuclei

## Emissione di n,p

Tramite i decadimenti descritti nella precedente slide.

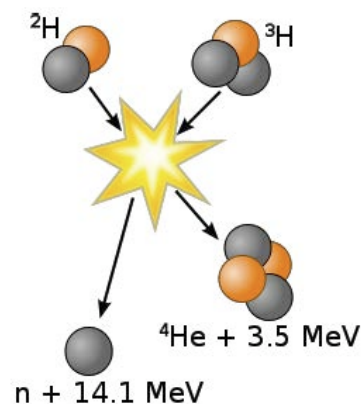
## Cattura neutronica

Un neutrone viene assorbito all'interno del nucleo.



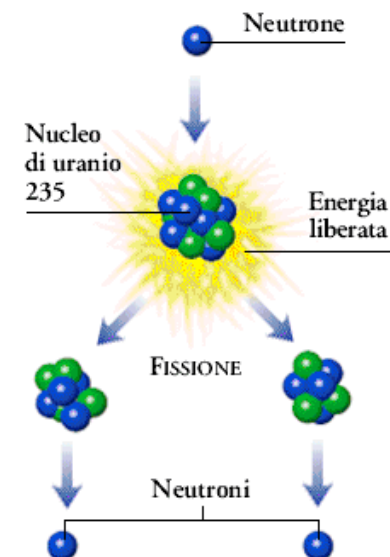
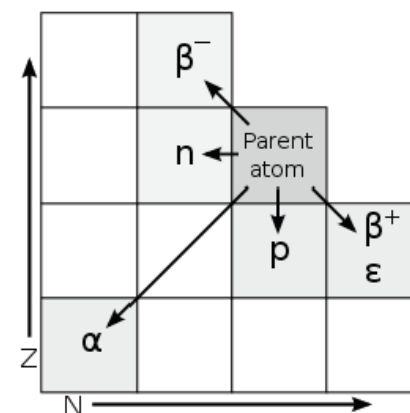
## Fusione

Due nuclei vengono compressi a tal punto da creare un nucleo di massa maggiore dei reagenti più altri neutroni liberi ed energia.



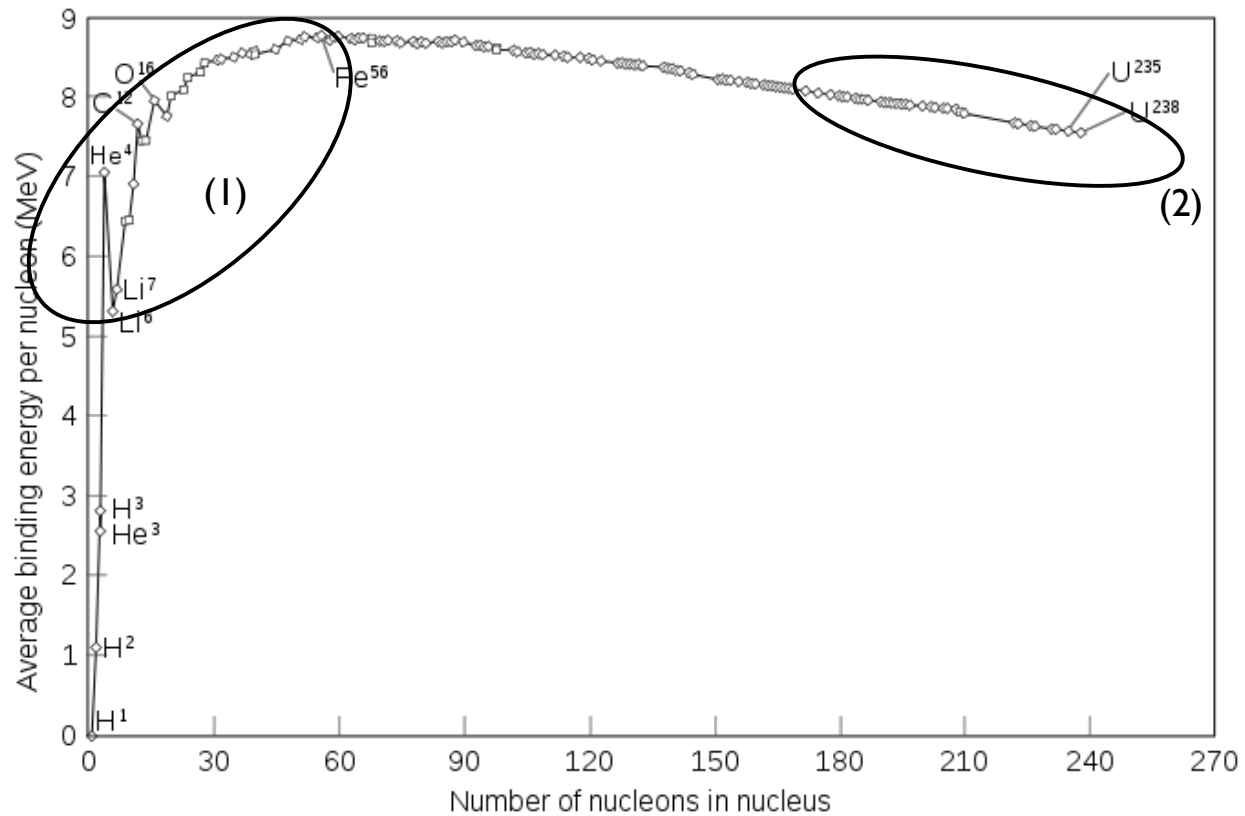
## Fissione

Disintegrazione in due nuclei più leggeri con emissione di neutroni ed energia.



# Come spremere un nucleo e ricavare energia

Il grafico mostra l'energia di legame tra protoni e neutroni nei nuclei

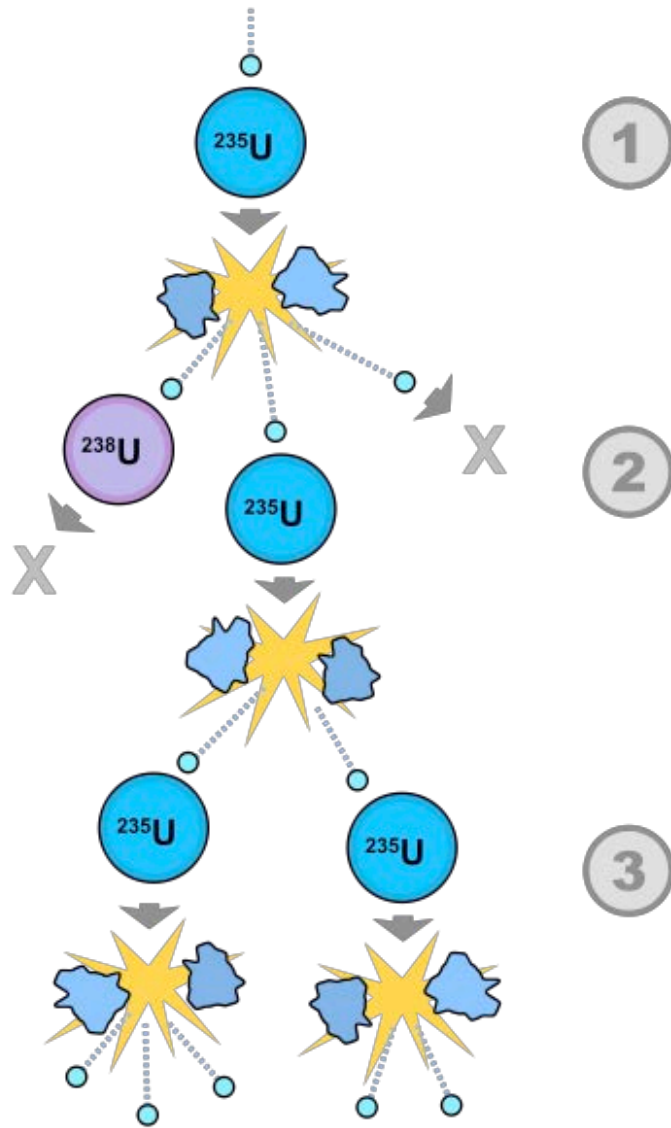


E' possibile ricavare energia

fondendo elementi leggeri (fino al Fe) ← (1) (2) → spaccando elementi pesanti (Fe-U,Pu)



# Reazione a catena



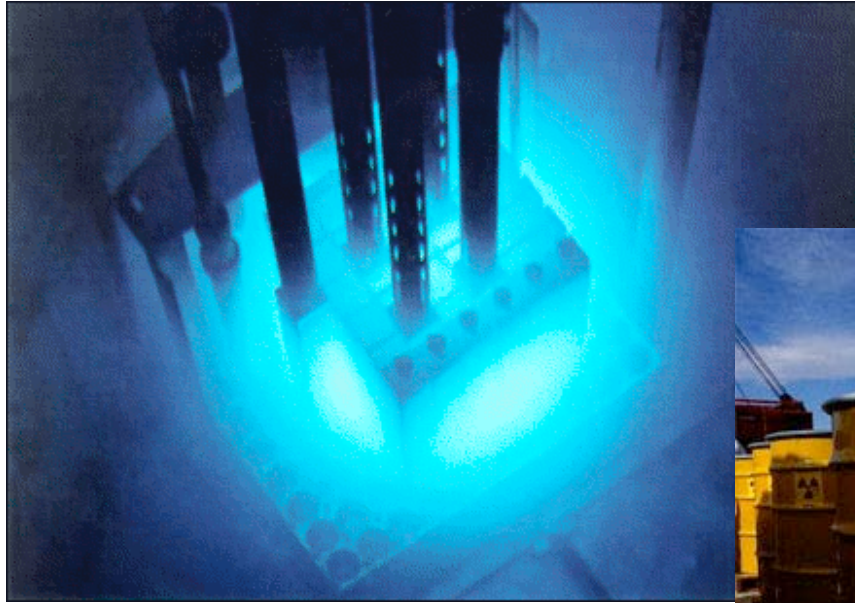
1 Avviene se almeno uno dei neutroni prodotti nella fissione precedente va a produrne un'altra.

Gli altri neutroni invece possono essere assorbiti o persi.

2 Fattore di moltiplicazione **k** :  
rapporto tra numero di fissioni e numero di neutroni da fissione che vanno a generare un'altra fissione

Criticità	$k=1$
Sottocriticità	$k<1$
Sovracriticità	$k>1$

# Reazione a catena



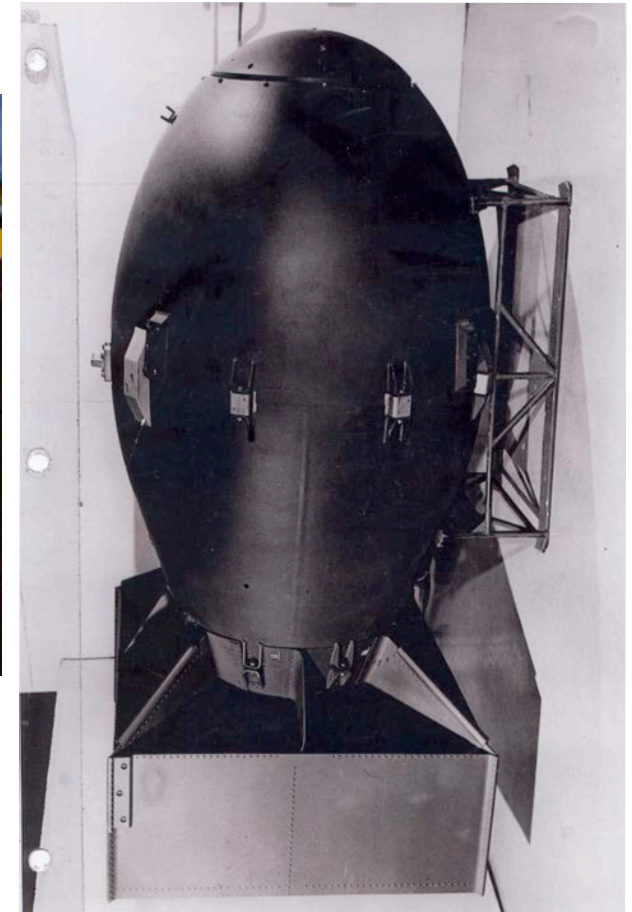
## Critico

[reattore nucleare]  
configurazione stabile



## Sottocritico

[scorie nucleari]  
reattività in decrescita



## Sovracritico

[bombe nucleari]  
stato esplosivo

# Principali materiali fissili e fertili

**FISSILE:** materiale che, assorbendo un neutrone, produce fissione

**FERTILE:** si trasforma in materia fissile dopo l'assorbimento di un neutrone

Plutonio:  $^{239}\text{Pu}$  non presente in natura, fissile

$$t_{1/2} = 2.41 \times 10^4 \text{ y}$$

Uranio : presente in natura in due isotopi

$^{235}\text{U}$  fissile (0.71% dell'uranio naturale )

$$t_{1/2} = 7.13 \times 10^8 \text{ y}$$

$^{238}\text{U}$  fertile (99.3%) (per assorbimento di n diventa  $^{239}\text{Pu}$ )

$$t_{1/2} = 4.468 \times 10^9 \text{ y}$$

$^{233}\text{U}$  (artificiale) fissile

Torio : fertile  $^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{U}$

$$t_{1/2} = 1.4 \times 10^{10} \text{ y}$$

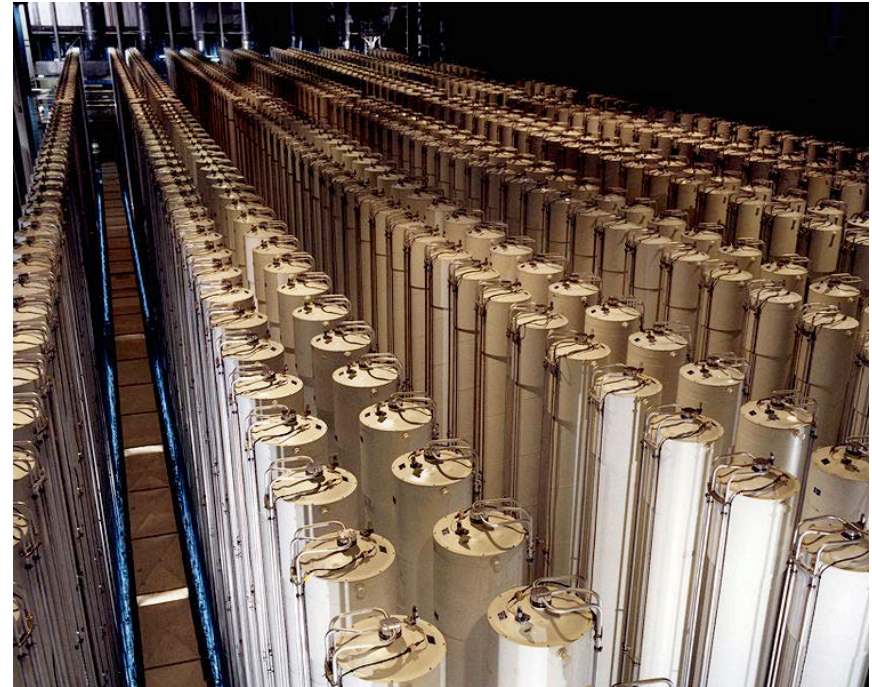


Uranio 235

# Arricchimento

Processo in cui viene incrementata la percentuale di  $^{235}\text{U}$  per rendere più probabile il processo di fissione e quindi più facile la costruzione del reattore.

Esistono diversi metodi per arricchire l'uranio ma tutti si basano sulla differenza di massa tra i due isotopi.



Per esempio, nelle centrifughe di arricchimento (vedi figura), l'uranio si trova in forma di gas all'interno di cilindri rotanti in serie e formazione paralleli. L'accelerazione centrifuga dovuta a tale rotazione induce le molecole di gas più pesanti ( $^{238}\text{U}$ ) a muoversi verso l'esterno del cilindro mentre le molecole più leggere ( $^{235}\text{U}$ ) si raccolgono presso il centro.

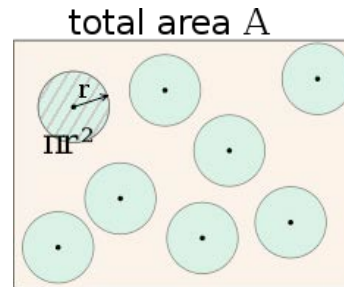
Reattori : arricchimento 3%

Armi : arricchimento 30%

NOTA! Alcuni reattori raffreddati ad acqua pesante ( $\text{D}_2\text{O}$ ), come il **CAN**adian **D**euterium **U**ranium, possono funzionare con uranio naturale.

# Sezione d'urto

La sezione d'urto  $\sigma$  è la probabilità che una data interazione tra due particelle avvenga. Ha le dimensioni di un'area.



I processi che interessano maggiormente il reattore sono la cattura e la fissione, i quali hanno sezioni d'urto diverse a seconda del materiale e della energia dei neutroni. Quindi per fare un reattore occorre trovare il giusto bilanciamento tra le probabilità:

di fissione

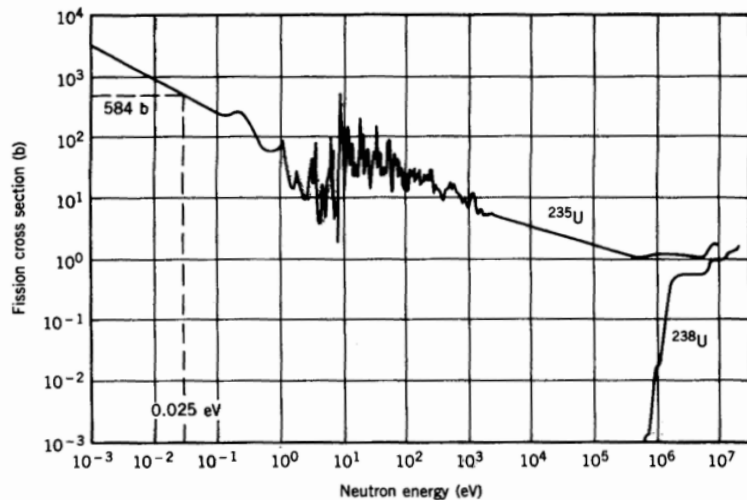
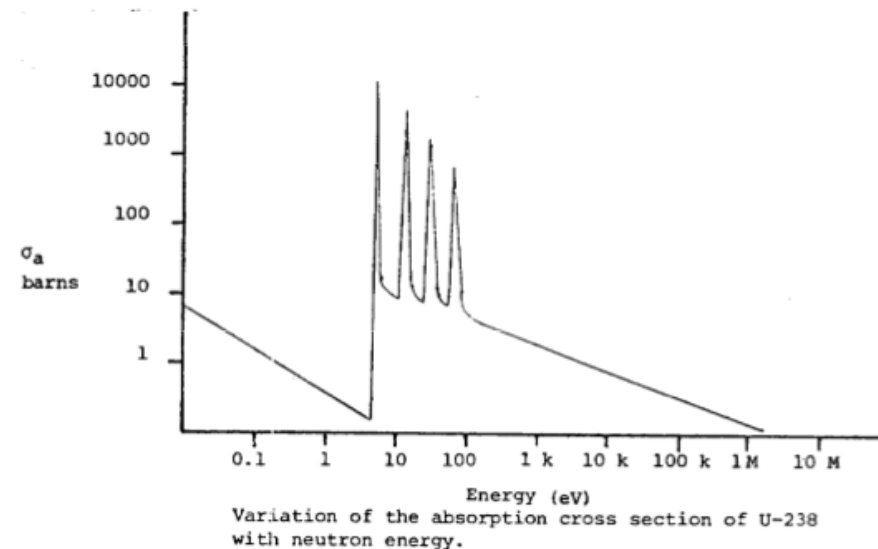


Figure 13.9 Cross sections for neutron-induced fission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$ .

e di assorbimento.



Variation of the absorption cross section of U-238 with neutron energy.



# Moderatore

Dai grafici della slide precedente risulta chiaro che per avere alta probabilità di produrre fissione e bassa probabilità di cattura conviene avere neutroni “lenti”. Ma i neutroni di fissione sono veloci (1/2 MeV), occorre dunque rallentarli facendo uso di un MODERATORE.

Caratteristiche principali:

1- deve contenere nuclei di massa simile a quella del neutrone

[ in un urto elastico tra due masse uguali, una in movimento e l'altra ferma, l'energia cinetica di quella in movimento viene completamente ceduta ]

2- capacità di dispersione del calore

[ la cessione di energia cinetica corrisponde ad un incremento di temperatura della sostanza moderatrice ]

3- sezione d'urto di assorbimento neutronico bassa

[ i neutroni devono solo perdere energia e non essere assorbiti al suo interno ]

MODERATORI PIU' USATI:

H<sub>2</sub>O

D<sub>2</sub>O (acqua pesante, miglior  $\sigma$  di cattura)

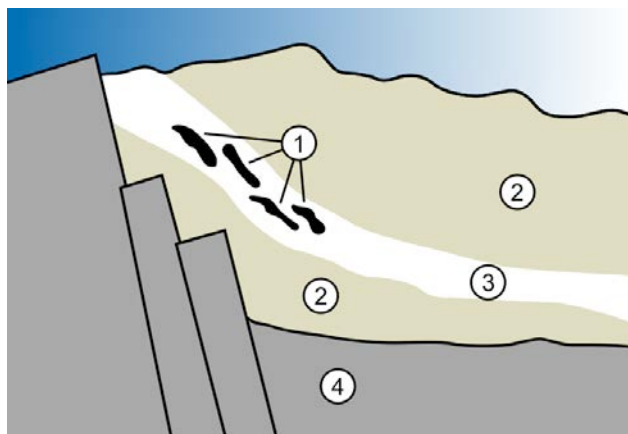
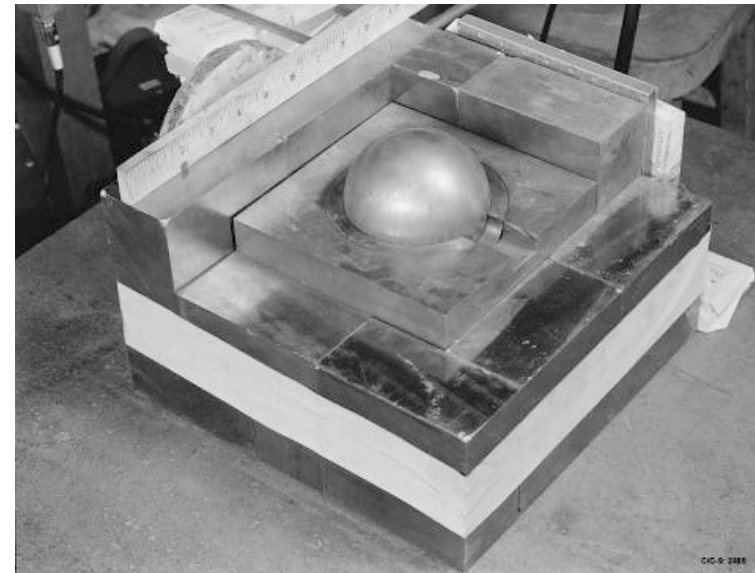
Grafite (ottimo conduttore di calore, ma infiammabile)

# Massa critica

Quantità minima di materiale fissile necessaria a mantenere la reazione a catena,

per esempio	U-233	16 kg
	U-235	52 kg
	Pu-239	10 kg

1972: nella miniera di Uranio sotto il fiume Oklo (Gabon) scoperta di un reattore nucleare naturale attivo 2mld di anni fa.

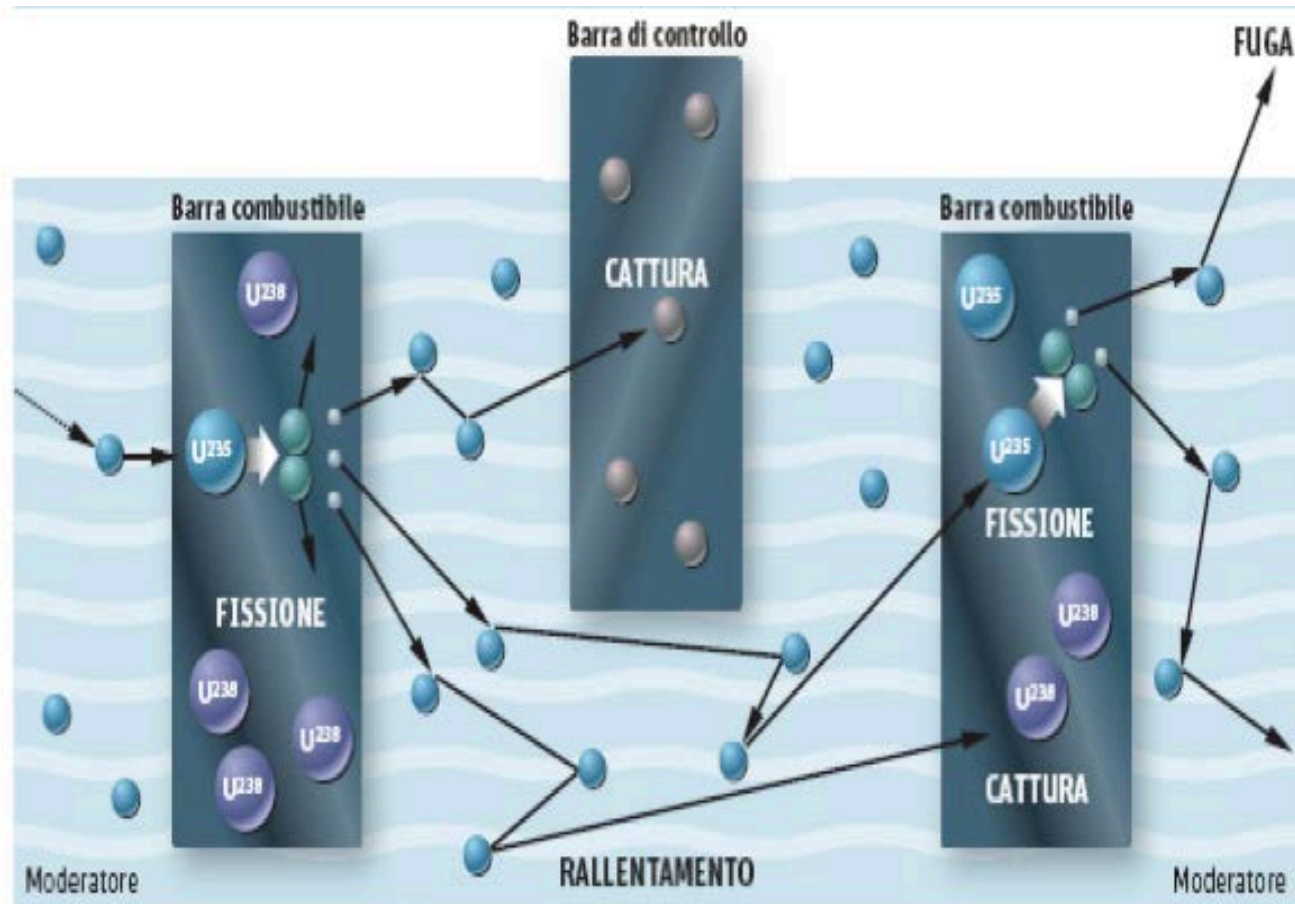


1. zona di reazioni nucleari
2. arenaria
3. strato di uranio
4. granito

Si ritiene che le reazioni di fissione siano avvenute per circa 100 anni con una potenza di 15GW termini. Ora la reazione a catena non è più possibile siccome la gran parte dell'  $^{235}\text{U}$  (all'epoca  $\approx$  il 3%) è decaduto.

In questo caso l'acqua ha agito contemporaneamente come moderatore di neutroni e fluido di raffreddamento.

# Componenti di un reattore a neutroni termici



**Barra combustibile** formata da pastiglie di  $UO_2$  sovrapposte. In genere l'U è arricchito al 3-4% di  $^{235}U$

**Moderatore** Materiale contenente nuclei a basso A. Acqua, Acqua pesante, Gas He, Carbonio

**Barra di controllo** Materiale con alta probabilità di assorbimento termico da parte di neutroni

# Reattori a neutroni termici (lenti)

La maggioranza dei reattori commerciali sono del tipo:

- **Pressurized Water Reactor (PWR)**

l'acqua a contatto con il nocciolo viene mantenuta ad elevata pressione (circa 15MPa) in modo da poter raggiungere temperature elevate senza cambiare di stato. Lontana dal reattore essa viene successivamente messa a contatto con un secondo circuito di acqua a pressione ambiente che viene trasformata in vapore ed utilizzata per mettere in rotazione le turbine e produrre elettricità.

[VEDI SLIDE 20]

- **Boiling Water Reactor (BWR)**

l'acqua a contatto col reattore cambia di stato ed il vapore da essa prodotto è subito utilizzato per muovere le turbine del generatore elettrico. In seguito viene riportato allo stato liquido ed inserito nuovamente nel vessel contenente il nocciolo.

[VEDI SLIDE 21]

In entrambi i casi l'acqua funge sia da refrigerante sia da moderatore.

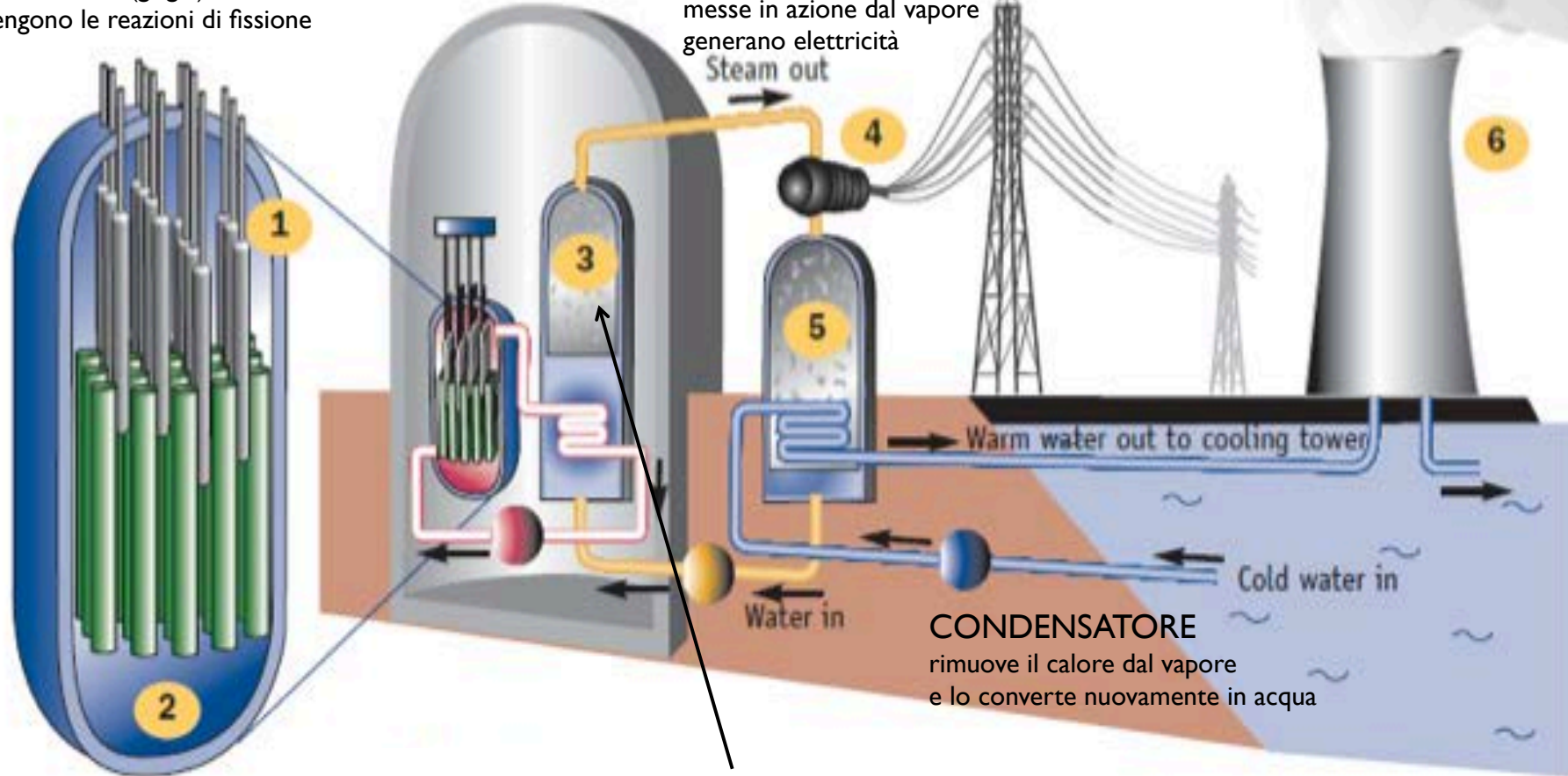
# Reattore PWR

## REATTORE:

- combustibile (verde) scalda l'acqua pressurizzata
- control rods (grigie) assorbono i neutroni e controllano/spengono le reazioni di fissione

## TORRE DI RAFFREDDAMENTO

rimuove il calore dall'acqua di raffreddamento fino a temperatura ambiente



## TURBINE

messe in azione dal vapore generano elettricità

## CONDENSATORE

rimuove il calore dal vapore e lo converte nuovamente in acqua

## ACQUA

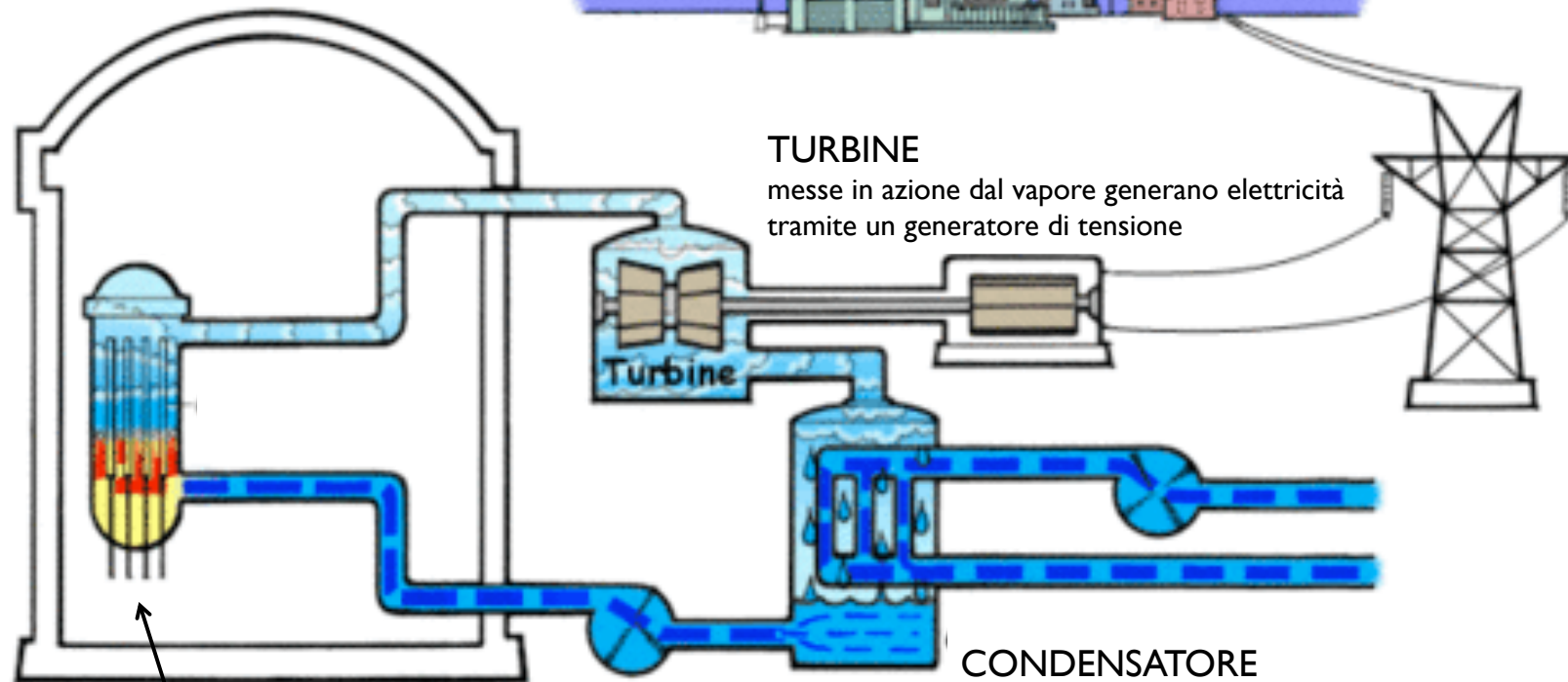
funge da liquido di raffreddamento e da moderatore

## SCAMBIATORE DI CALORE

genera vapore dall'acqua calda pressurizzata proveniente dal reattore attraverso un sistema di aspirazione

# Reattore BWR

STRUTTURA DI  
CONTENIMENTO



**TURBINE**

messe in azione dal vapore generano elettricità  
tramite un generatore di tensione

**CONDENSATORE**

rimuove il calore dal vapore  
e lo converte nuovamente in acqua  
ripompata poi all'interno del nocciolo

**REATTORE:**

- combustibile (verde) scalda l'acqua che si trasforma in vapore
- control rods (grigie) assorbono i neutroni e controllano/ spengono le reazioni di fissione

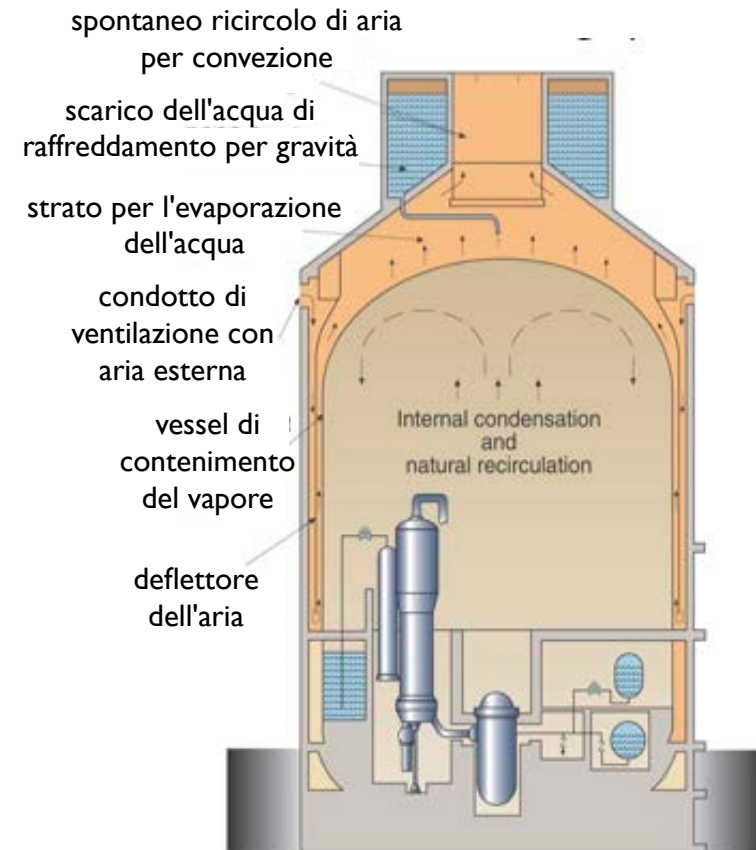
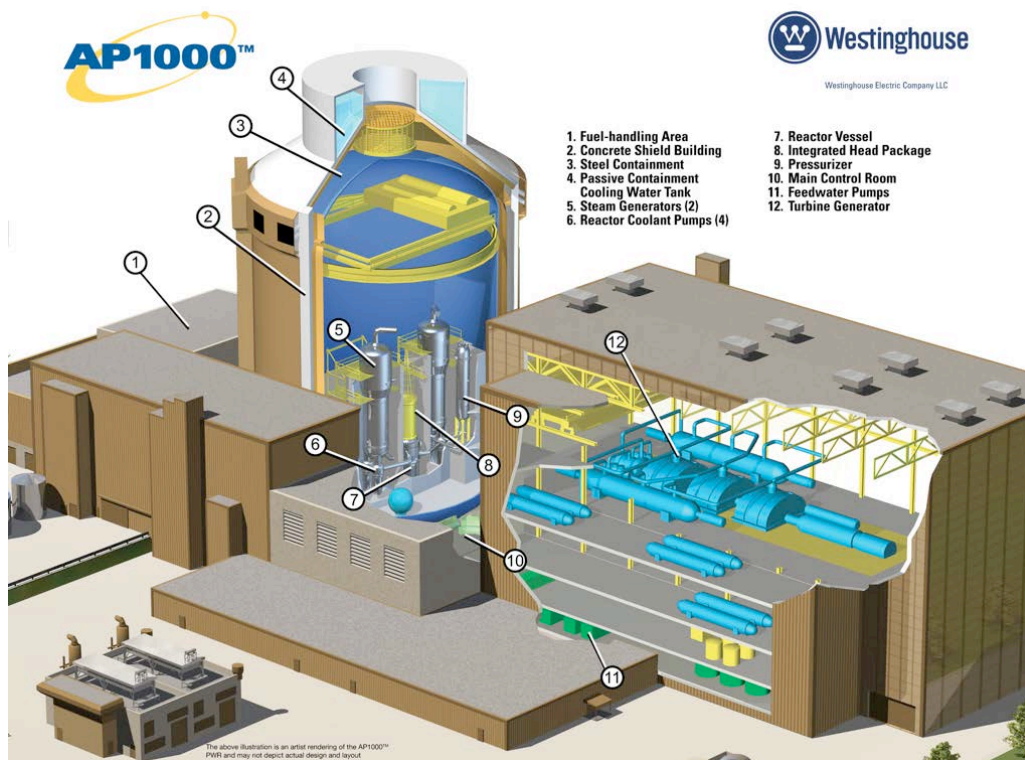
# Centrale di III generazione - EPR

- ✓ Quattro sistemi indipendenti di raffreddamento, ciascuno in grado di refrigerare il nocciolo dopo il suo spegnimento.
- ✓ Contenitore metallico a tenuta attorno al reattore in caso di rottura del circuito primario di raffreddamento per evitare fuoriuscite di materiale radioattivo.
- ✓ Contenimento a doppia parete in calcestruzzo armato, 2.6m di spessore.
- ✓ In caso di fusione (la probabilità che avvenga è inferiore ad 1 ogni milione di anni) il nocciolo si spande all'interno di un apposito contenimento collegato ad un'area di raffreddamento passivo.



# Centrale di III generazione - AP1000

- ✓ Semplificazione: -50% valvole, - 35% pompe, -75% cavi, dimensioni contenimento dimezzate
- ✓ Sicurezza passiva: sistemi di raffreddamento di emergenza funzionanti a gravità e convezione, senza intervento di operatore
- ✓ Contenimento di un eventuale nocciolo fuso nel vessel



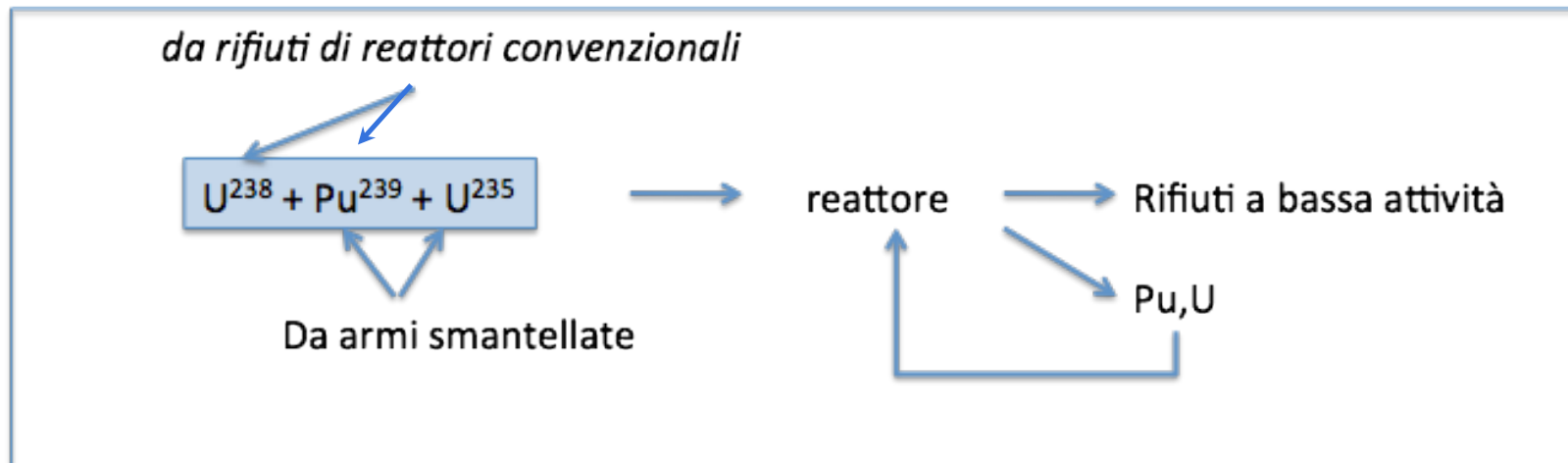


# Reattori Veloci

Operano nel regime dove il rapporto tra probabilità di fissione e cattura è di nuovo favorevole, anzi mette a disposizione neutroni addizionali per fertilizzare e convertire gli attinidi → reattori autofertilizzanti

Necessitano di un refrigerante ad alto numero di massa (per es. sodio o piombo) per evitare il rallentamento dei neutroni

Possibilità di realizzare la chiusura del ciclo:



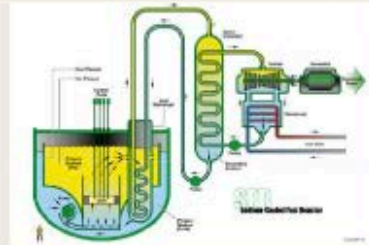
I rifiuti a bassa attività ritornano ai livelli "di miniera" in 200 anni

# Reattori di IV Generazione

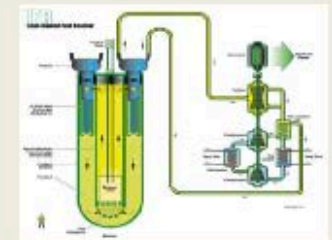
6 disegni “rivoluzionari”, sia a neutroni termici, sia a neutroni veloci

- ✓ sostenibili
- ✓ economici
- ✓ senza rischi di proliferazione
- ✓ sicuri

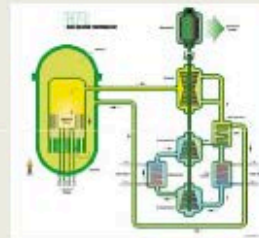
SFR



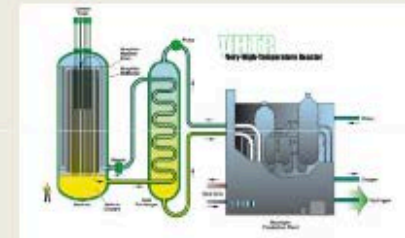
LFR



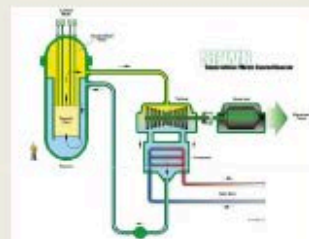
GFR



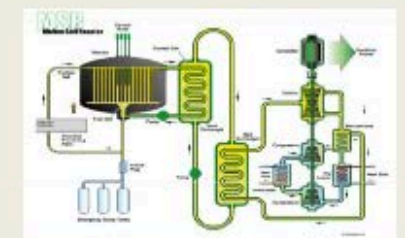
VHTR



SCWR



MSR



# Esempio di reattore di IV generazione

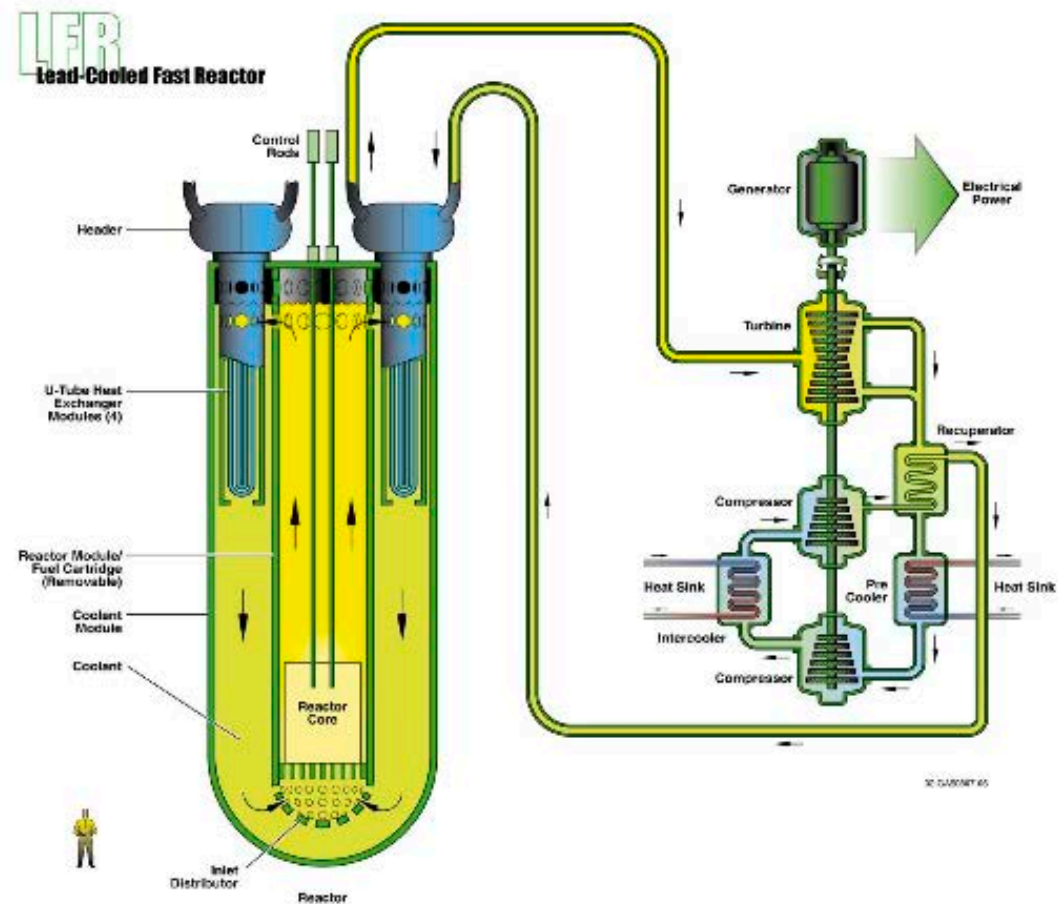
## Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)

### Caratteristiche

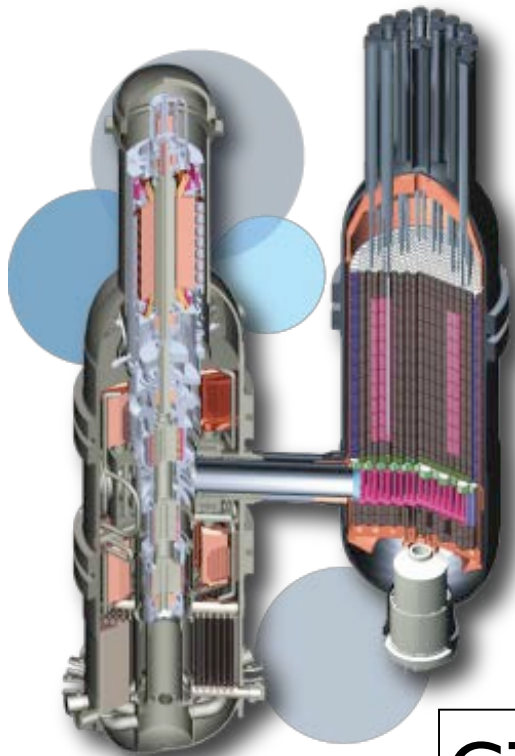
- raffreddamento a Pb o Pb/Bi liquido
- temperatura di uscita del refrigerante da 550°C fino a 800°C
- piccoli impianti "trasportabili" da 50-150 MWe
- potenza dei reattori più grandi: 300-1200 MWe
- vita media del reattore tra i 15-30 anni

### Vantaggi

- utilizzo solo per la produzione di elettricità (no energia elettrochimica)
- le temperature elevate consentono l'eventuale produzione di idrogeno
- elevato grado di sicurezza con sistemi passivi
- resistenza alla proliferazione data la lunga vita del nocciolo del reattore

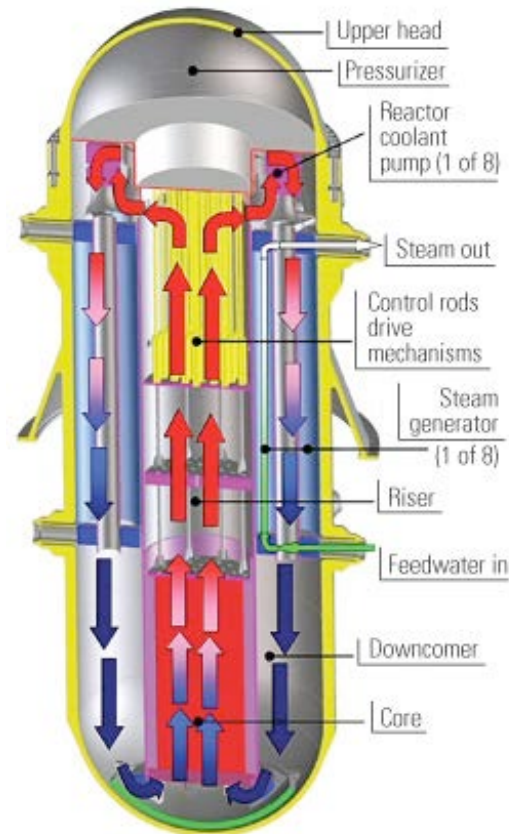


# Altri disegni innovativi



GT-MHR

Costituisce probabilmente il primo progetto commerciale di reattore HTR "moderno". Fra le sue peculiarità, va evidenziata l'estrema compattezza dell'intero impianto costituito da due soli recipienti in pressione collegati da un'unica tubazione; questo risultato è stato possibile anche grazie alla decisione di calettare la turbina, i compressori e l'alternatore su di un unico albero.



IRIS

Reattore modulare avanzato, ispirato ai criteri di IV Generazione, di tipo PWR e piccola taglia (335 MWe) scelta nella prospettiva di localizzazione sia di moduli singoli (specialmente nei paesi in via di sviluppo, con reti elettriche di piccole dimensioni e allo scopo di produzione combinata di elettricità, calore e/o acqua potabile), nonché di centrali pluri-modulo gestite attraverso un'unica sala controllo.

# Sicurezza

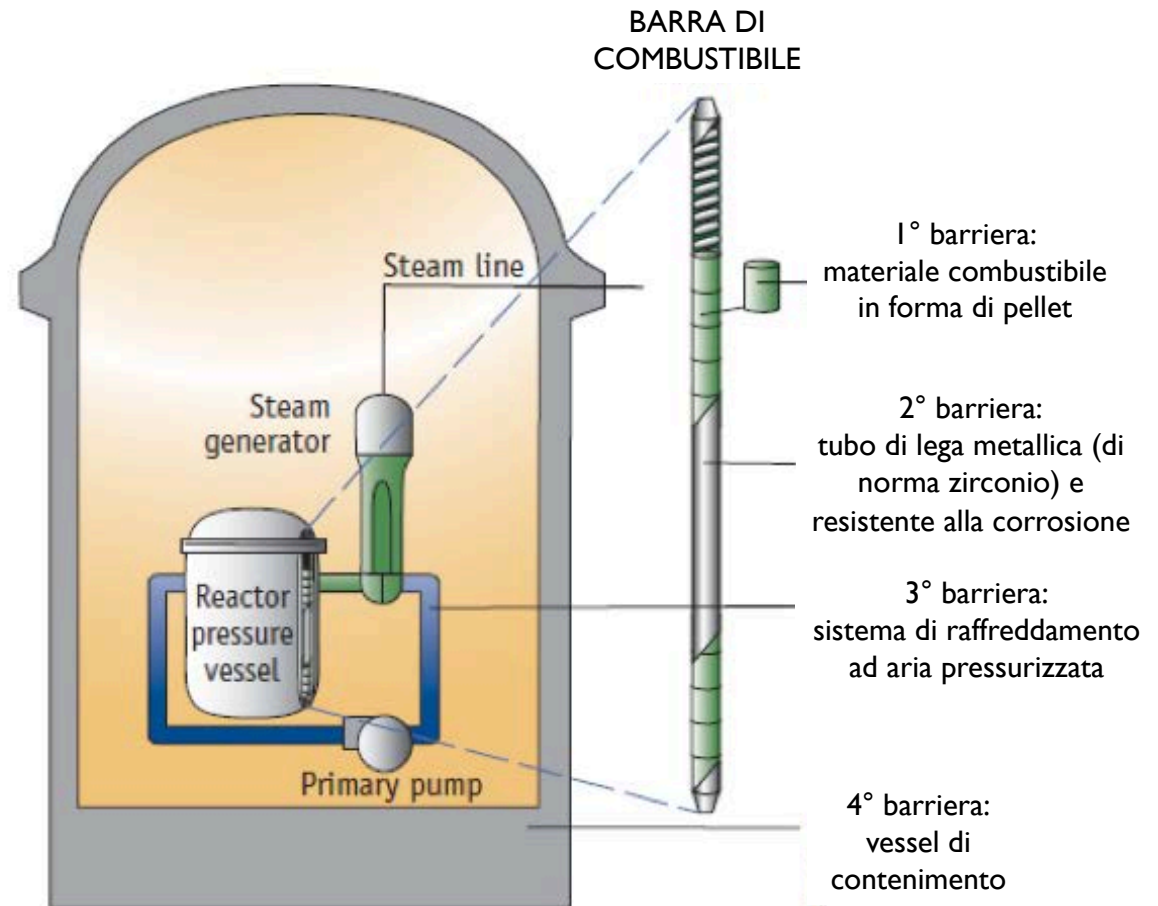
## REATTORI MODERNI "SAFETY BY DESIGN"

- ✓ coefficiente di temperatura  
NEGATIVO

l'aumento di temperatura fa scendere la reattività

- ✓ coefficiente di vuoto  
NEGATIVO

la perdita di refrigerante fa spegnere la reazione



Il materiale pericoloso è protetto da varie barriere di contenimento (*defense in depth*)

# Probabilità di incidente

<b>incidente</b>	<b>probabilità per reattore/anno</b>
danneggiamento del nocciolo	$4 \cdot 10^{-5}$
rottura del sistema di contenimento	$4 \cdot 10^{-6}$
morte immediata delle singole persone	$2 \cdot 10^{-8}$
causa di tumore negli anni successivi delle singole persone	$2 \cdot 10^{-9}$
evento sismico, danneggiamento del nocciolo	$1.2 \cdot 10^{-4} - 10^{-5}$

circa 20000 anni reattore integrati

# Incidenti

## Cernobil:

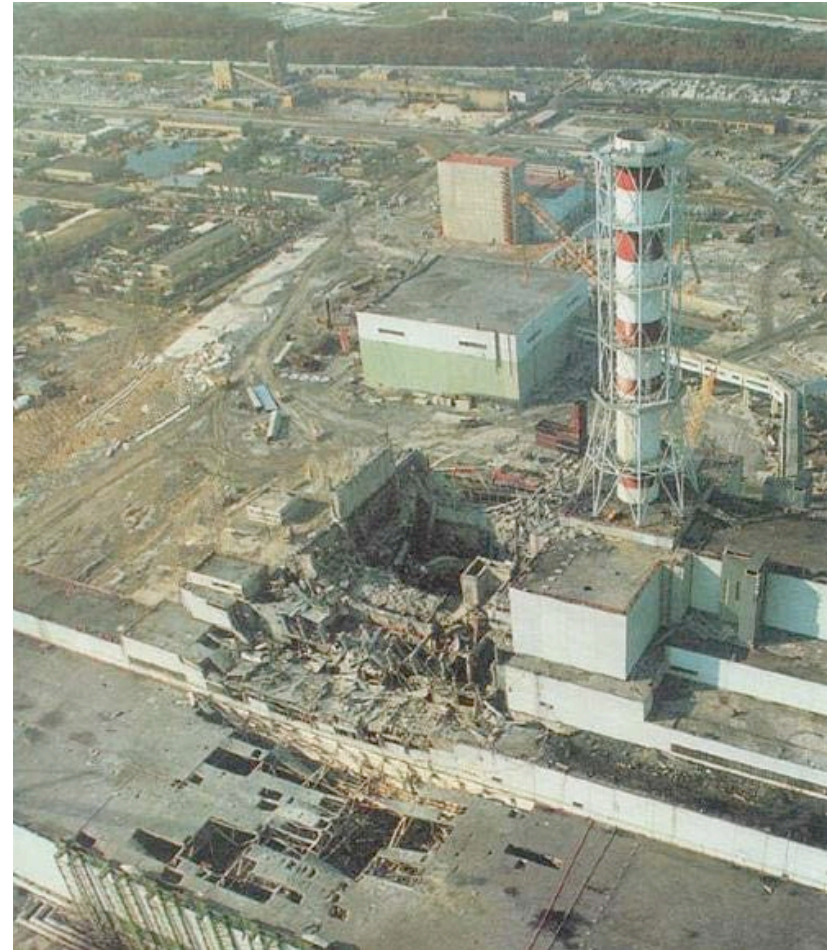
- Reattore senza contenimento
- Moderato a grafite (inflammabile)
- Con coefficiente di vuoto positivo
- Errore di disegno nelle barre di controllo

## Cause:

- Esperimento di verifica in caso di black-out
- Errori di disegno del reattore
- Scarsa preparazione degli addetti (turno di notte)

## Conseguenze:

- 30 morti sul posto
- 135000 evacuati
- 2000 tumori infantili alla tiroide, 9 morti
- intera regione economicamente devastata
- fallout sull'europa
- finora nessun incremento statisticamente significativo e non ambiguo di altri tumori, malformazioni (UNSCEAR 2000 e 2008)

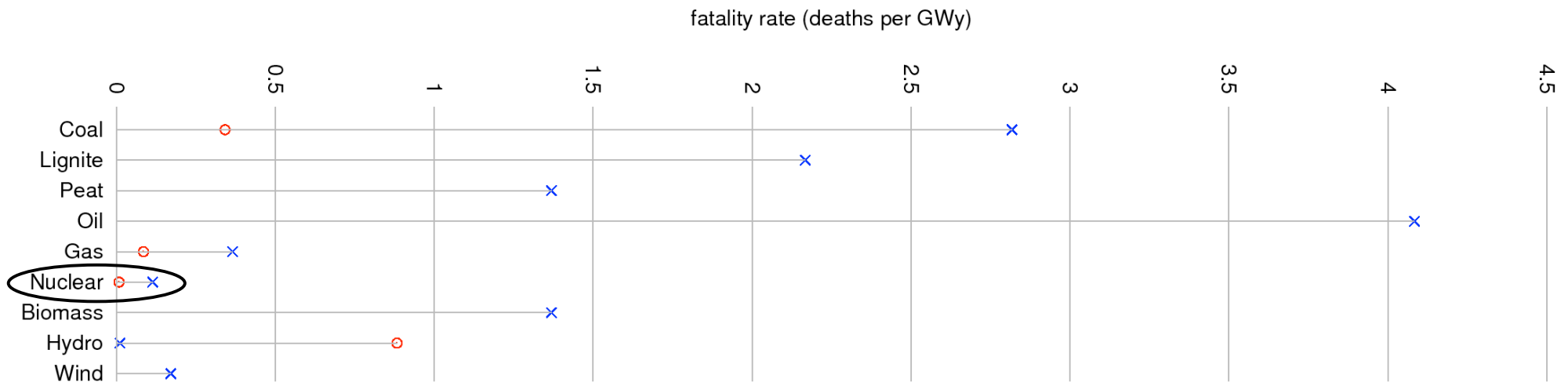


# Incidenti

## Three Miles Island, 1979:

Un incidente di secondo piano all'interno del reattore rischia di diventare disastroso a causa di errata diagnostica. Il nocciolo viene correttamente spento, ma ci sono problemi di rimozione del calore residuo dovuto ai decadimenti radioattivi a cui segue un lieve rilascio di gas radioattivi.

Nella tabella viene stimato il prezzo in vite umane dell'energia in termini di numero di morti per GW di energia prodotta all'anno



×: Unione Europea    ○: Paul Scherrer Institute

!! Due diverse stime del prezzo in vite umane dell'energia, [www.withouthotair.com](http://www.withouthotair.com), p 168



# Economicità

Il nucleare richiede un grande investimento iniziale (e finale) . Si ripaga in circa 20 anni, dopo i quali la sua economicità è indubbiamente attraente. Attualmente la vita dei reattori americani è estesa a 60 anni, prima di Fukushima si discuteva di portarla a 80 anni

Decommissioning < 15% capitale iniziale

Contributo dell'uranio: 30% del costo del combustibile arricchito, 5% del costo del kWh, scarsa sensibilità alle fluttuazioni.

**Table 19.1.** Cost of generating electricity in new plants in 2010, as estimated by the Energy Information Administration (EIA) and by the Near-Term Deployment Group (NTDG) (in cents per kWh).

	Advanced Coal	Advanced Gas		Reference Nuclear	Advanced Nuclear		Wind EIA
	EIA	EIA	NTDG	EIA	EIA	NTDG	
Capital costs	3.51	1.23	1.25	5.00		3.16	4.06
O&M costs	0.45	0.13	0.20	0.74		0.50	0.82
Fuel costs	1.04	3.22	2.82	0.46		0.50	0.00
Total costs	5.00	4.59	4.27	6.2	~ 5.2	4.16	4.88

Source: The EIA data are from Refs. [15, pp. 69 and 71], and [17]; the NTDG data are from Ref. [7, p. 4-21]. The costs are in constant dollars: 2000 dollars for the NTDG data and 2001 dollars for the EIA data.

option from an economic standpoint. For instance, with current O&M costs at the most expensive nuclear units in operation averaging approximately 3.5 cents per kilowatthour [73] and total levelized costs for new baseload capacity ranging from 8 cents to 11 cents per kilowatthour, the operating costs of existing nuclear power plants would have to increase substantially before it would be economical to retire even the most expensive units.

2.75 se riscaldati al 2000

EIA 0383/2010

# Sostenibilità

## Riserve di uranio

*Conosciute* : 4Mt → 70 anni al consumo attuale

*Stimate* : 17 Mt → 265 anni

*Non-convenzionali* (fosfati) 22 Mton → 635 anni

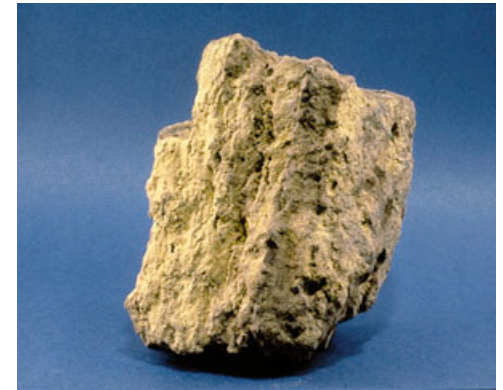
*Acqua di mare* ( $3\text{mg}/\text{m}^3$ ): forever, ammesso di renderne economica l'estrazione

Consumo attuale:

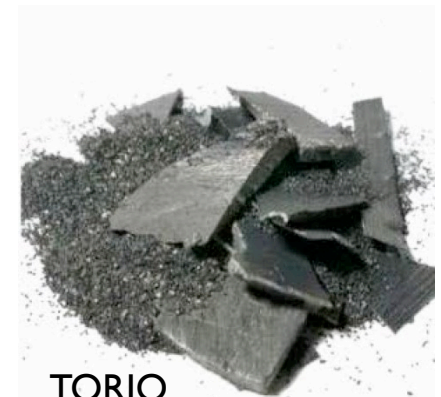
200 tonnellate di minerale (30 di combustibile) per GW/yr, 377 GW installati

Reattori veloci: 60 volte più efficienti nell'utilizzo di Uranio

Torio : tre volte più abbondante dell'uranio



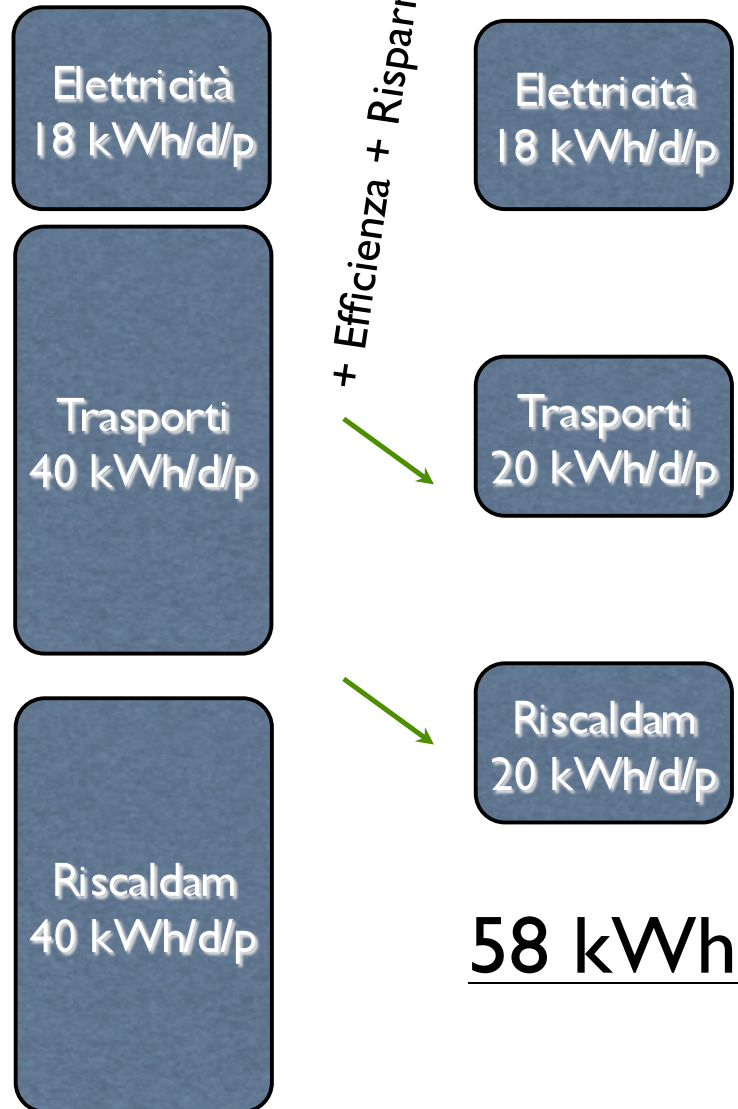
URANIO GREZZO



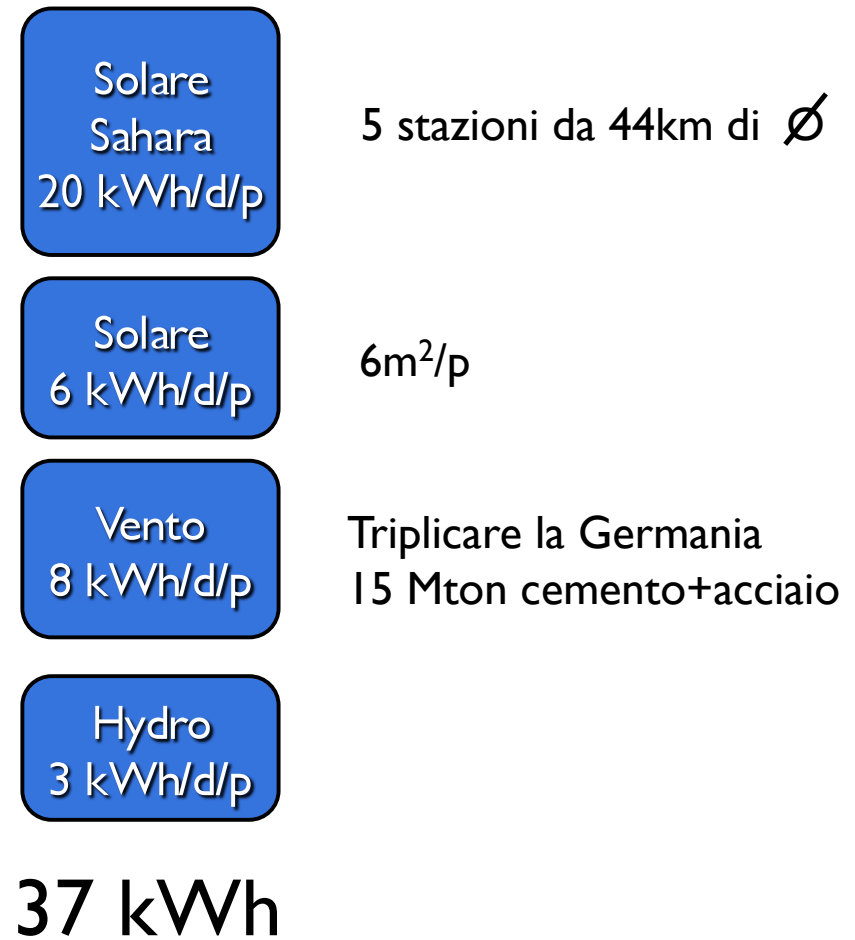
TORIO

# Necessità

Oggi:



Nell'ipotesi di riduzione drastica di fossili, presumibilmente aumenterà il consumo elettrico. Possibile scenario:

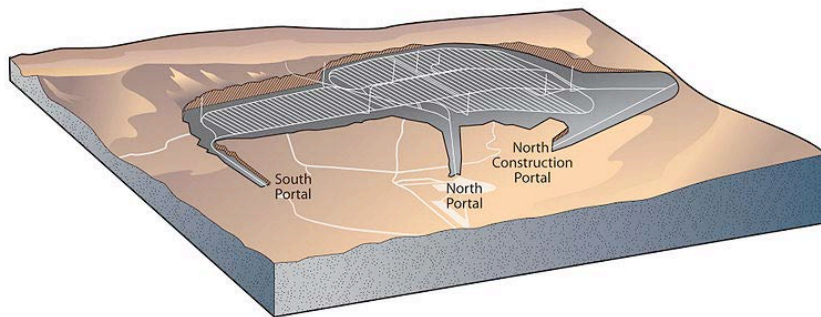


# Scorie

Da un reattore di 1 GW/yr si ottengono 30 t di scorie ( $20\text{g/cm}^3$ ),  $1.5\text{ m}^3$  valore da confrontare con:

- Rifiuti industriali: 1000 milioni di  $\text{m}^3$
- Rifiuti industriali tossici : 10 milioni di  $\text{m}^3$

La pericolosità delle scorie è dovuta principalmente al rischio di contaminazione delle falde acquifere



Deposito geologico di Yucca Mountain, disegnato per rilascio di radioattività  $< 1\text{ mrem/yr}$  nei prossimi 1,000,000 anni

valore da confrontare con: Fondo naturale:  $300\text{ mrem /yr}$

# CO<sub>2</sub> footprint

I centrale nucleare da 1 Gw : 300000t di CO<sub>2</sub> in cemento e acciaio in 40 anni

che corrispondono a 0.9 g/kWh ,  
includendo decommissioning e ciclo del combustibile : <40 g/kWh

contro 400 g/kWh : gas  
1000 g/kWh : carbone  
32 g/kWh : fotovoltaico  
10 g/kWh : eolico



fonte [D. McKay, "Sustainable Energy"]

# Radiazioni Ionizzanti

Unità di misura:

Dose assorbita: 1 Gr (Gray) = 1 joule/kg

Dose equivalente: 1 Sv (Sievert) = 1 Gr · w

w=1 (X/γ, β), 5-20 (n), 20 (α)

Attività : 1 Bq (Becquerel) = 1 disintegrazione/s

Pericolosità: 10 Sv danno il 30% di mortalità in 4 settimane  
(28/134 operai e pompieri a Cernobil).

Linear, no threshold model

se 10 Sv uccidono una persona, 100mSv uccidono 1 persona su 100

# Fondo naturale e artificiale

<b>Sorgente</b>	<b>dose mondiale media (mSv/yr)</b>
Radon	1.25
Crosta Terrestre	0.48
Radionuclidi corpo	0.29
Raggi cosmici	0.38
<b>TOTALE</b>	<b>2.4</b> (Torino: 0.86, Napoli: 2.13, S.Pietro: 7, Ramsar: 270)
Centrali carbone	0.02
Raggi X	0.4
Test armi nuc.	0.005
Cernobil	0.002
Energia Nucleare	0.0002
Fumatore	13-90
Lavoratore centrale nucleare	5.6
TO-NY	0.04

# Fukushima

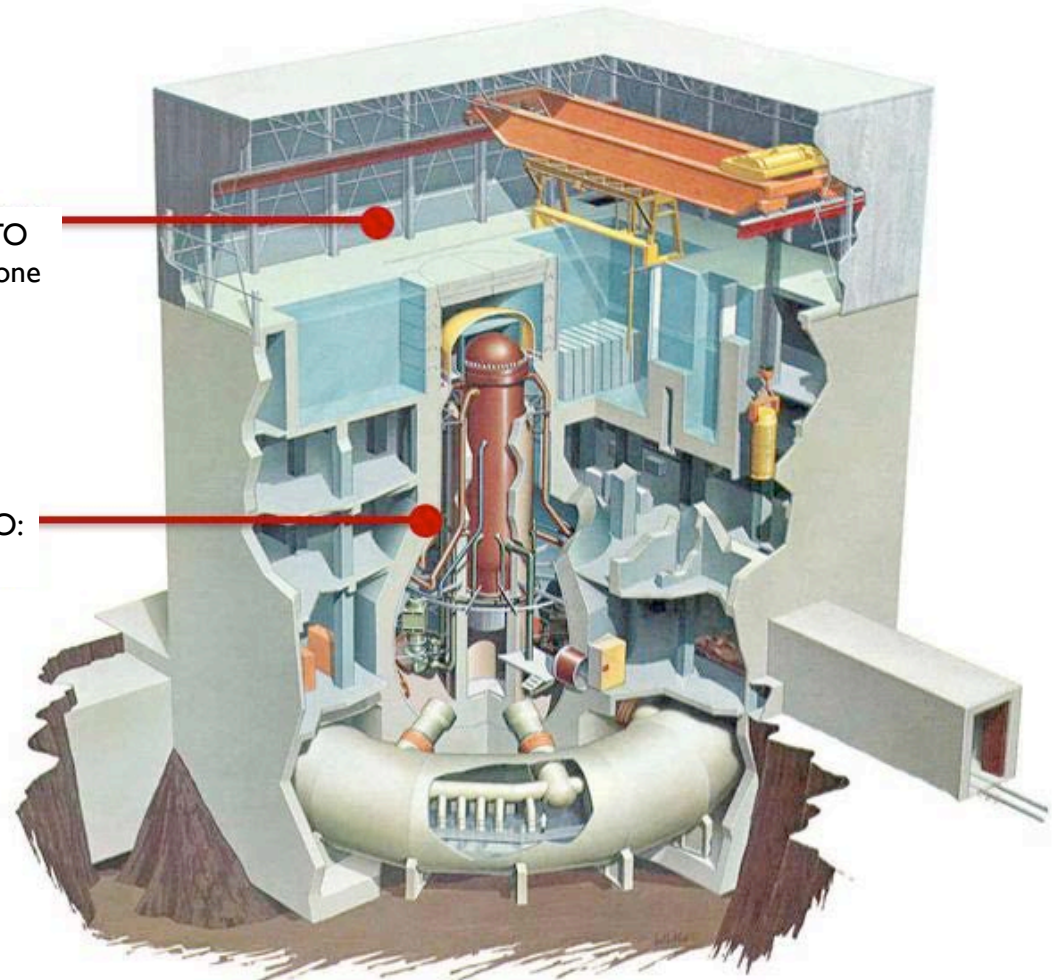
## Contesto

Terremoto magnitudine 9.0  
[Uno dei 5 terremoti conosciuti più forti]  
Onde di 38 m, penetrate 10 km  
12000 morti, 15000 dispersi,  
125000 edifici danneggiati

SISTEMA DI CONTENIMENTO  
SECONDARIO: area di esplosione  
@ Fukushima Daiichi I

SISTEMA DI CONTENIMENTO PRIMARIO:  
rimasto intatto ed in sicurezza

## General Electric



## Disegno antisismico

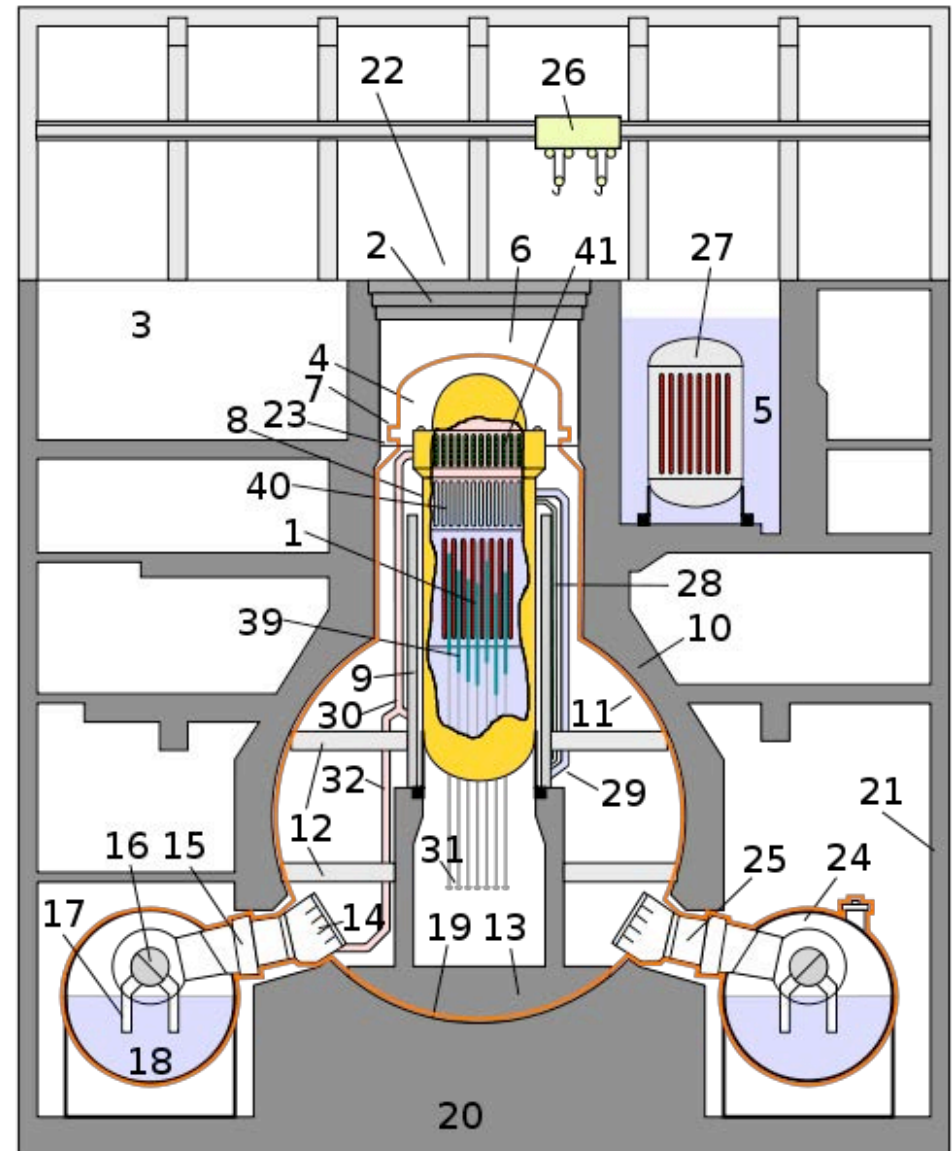
Unità I: 0.18g (1.74 m/s<sup>2</sup>)  
Unità II,III: 0.45g (4.4 m/s<sup>2</sup>)  
Nessun danno dopo il terremoto del 1978  
(0.125 g per 30 sec)  
Tsunami di 5.7m



# Fukushima, dinamica dell'incidente

## In successione:

1. Terremoto
2. Caduta di potenza esterna
3. Tsunami
4. Caduta di potenza di backup
5. Rottura del sistema di raffreddamento (appena spento  $P=10\%$ )
6. Esplosione del contenimento secondario
7. Probabile danneggiamento del nocciolo
8. Perdita del liquido di raffreddamento
9. Iniezione di acqua di mare
10. Contaminazione acqua di mare



# Fukushima, rilascio di radiazioni

- Attraverso il “venting” del vapore
- Attraverso l’acqua di mare usata per il raffreddamento di emergenza e poi dispersa in mare (sia intenzionalmente, sia non)
- Esposizione del “spent fuel” all’atmosfera ?



## Situazione al 6 aprile (fonte IAEA)

In 10 prefetture  $< 10 \text{ Bq/m}^2 \text{ I}^{131}$ ,  $< 20 \text{ Bq/m}^2 \text{ Cs}^{137}$

Fukushima :  $< 0.45 \text{ MBq / m}^2$

Una banana 150g: 20 Bq,  $\text{K}^{40}$

Contaminazione letale : 140 MBq di  $\text{Cs}^{137}$  ingerito

### Mare

$< 40 \text{ kBq/l}$  (limite neonati: 100 Bq/l)

a 15 km :  $< 300 \text{ Bq/l}$

mangiando pesce pescato in un raggio di 1km tutti i giorni per un anno : 0.6 mSv (TEPCO)

### Cibo

solo i campioni provenienti dalla prefettura di Fuskushima eccedono i limiti di legge

# Fukushima, cosa aspettarsi

Estremi disagi per la popolazione evacuata nel raggio di 20 km

Danni economici

Contaminazione dell'ordine del 10% Cernobil

Cernobil: 400,000 persone (liquidatori) esposti a  $0.5\text{MBq}/\text{m}^2$  senza aumento statisticamente rilevante dei tumori (UNSCEAR )

**!!** Emergenza da inquadrare nell'ambito della catastrofe naturale



# Conclusioni

- L'energia nucleare ha pro e contro
- Non è sicura al 100%, come tutte le attività umane
- Moltissima ignoranza e disinformazione
- Il problema va contestualizzato e affrontato con numeri, non aggettivi



# Approfondimenti

David MacKey, “Sustainable Energy, Without the Hot Air”, [www.withouthotair.com](http://www.withouthotair.com)

David Bodansky, “Nuclear Energy: Principles, Practices and Prospects”, Springer 2004

Enrico Mainardi, “Impieghi dell’Energia Nucleare”, Editoriale Delfino, 2008

Fukushima: <http://www.iaea.org/>

Effetti post-Cernobil: <http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>