

# Energia Nucleare

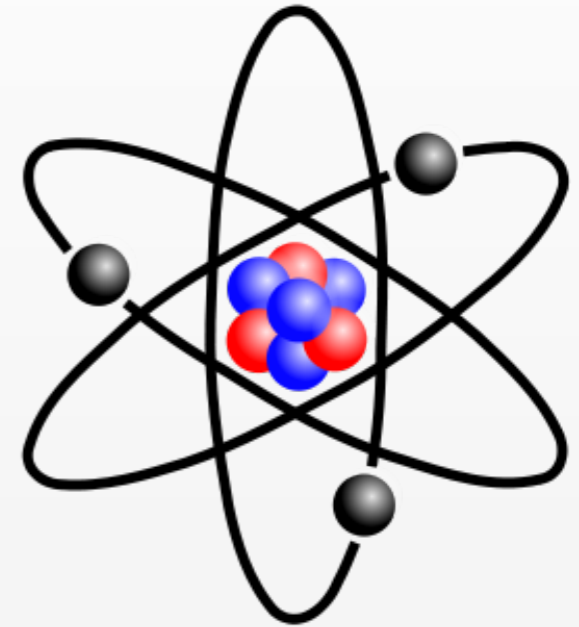


# Energia Nucleare

- Schema della lezione
  
- Decadimento alpha, beta, gamma.
  
- Fissione Nucleare: il processo fondamentale.
- Funzionamento di una centrale a fissione nucleare.
- Tipi di centrali a fissione: PWR, BWR, Autofertilizzanti.
  
- Fusione Nucleare: il processo fondamentale.
- Reattori a fusione: confinamento magnetico e confinamento inerziale.
  
- Vantaggi/Svantaggi Energia Nucleare

# ■ La struttura dell'Atomo

- Un atomo è costituito da un piccolo nucleo centrale composto da protoni e neutroni circondato da elettroni.
- Un atomo avrà sempre lo stesso numero di elettroni come protoni.
- il **numero atomico (Z)** è il numero di protoni di cui è composto il nucleo di un atomo
- il **numero di massa (A)** è la somma del numero dei protoni e dei neutroni di cui è composto il nucleo di un atomo
- Gli atomi di un elemento hanno sempre lo stesso numero di protoni. Gli isotopi sono atomi di un elemento aventi un numero diverso di neutroni.
  - Eg: hydrogen1 - hydrogen2 (deuterium) - hydrogen3 (tritium)



A Lithium atom

- protons = 3
- neutrons = 4
- electrons = 3

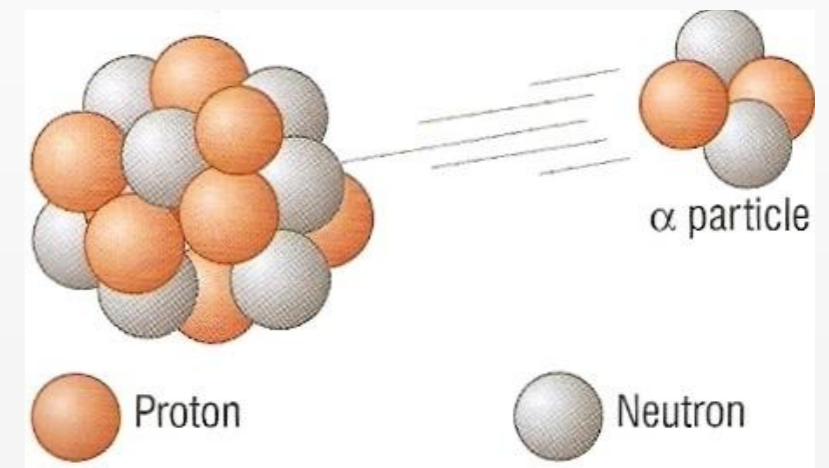
This Lithium atom has:

**atomic number = 3**

**mass number = 7**

# Decadimento Alpha

- Un particella alpha è costituita da due protoni e da due neutroni.
  - Generalmente una particella alpha viene emessa da isotopi di elementi “pesanti”



- Esempio: decadimento Uranio 238
  - L'Uranio 238 decade a Torio 234 più una particella alpha.



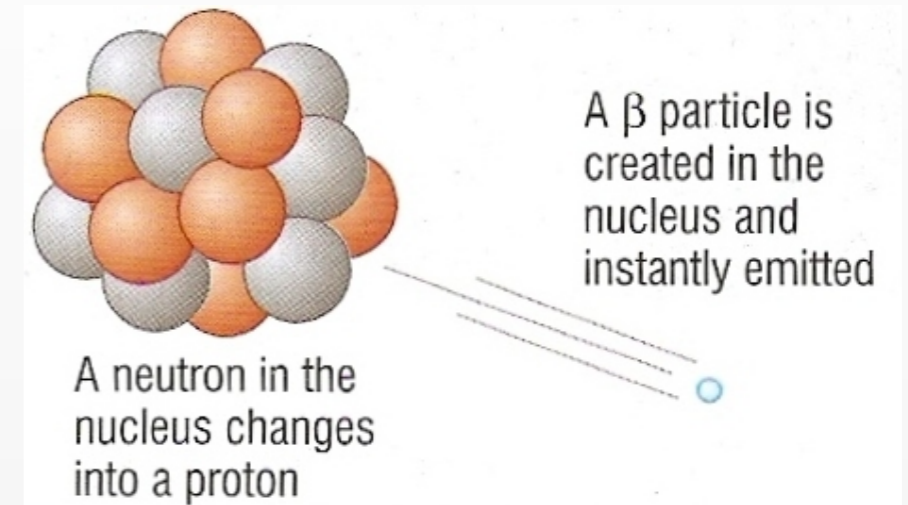
- Nota: la massa e il numero atomico devono essere SEMPRE bilanciati:

$$(238 = 234 + 4 \text{ AND } 92 = 90 + 2)$$

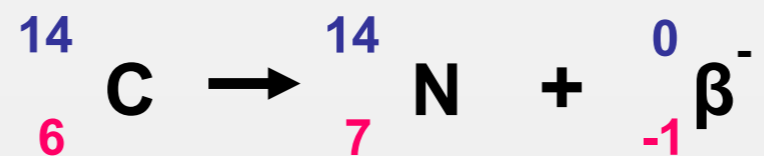
- Da un punto di vista chimico possono anche essere identificati con il simbolo  ${}^4\text{He}^{2+}$

# Decadimento Beta

- Beta particles consist of high speed electrons.
- They are emitted by isotopes that have too many neutrons.
- One of these neutrons decays into a proton and an electron. **The proton remains in the nucleus but the electron is emitted as the beta particle.**



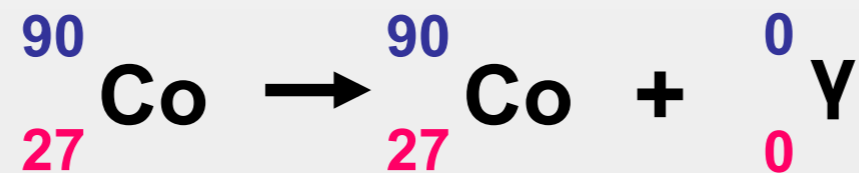
- Example: Il decadimento del Carbonio 14
- Carbon 14 decays to Nitrogen 14 plus a beta particle.



- 1. The beta particle, being negatively charged, has an effective atomic number of minus one.
- 2. The beta particle can also be notated as:  ${}_{-1}^{0}\text{e}$

# Decadimento gamma

- Gamma decay is the emission of electromagnetic radiation from an unstable nucleus
- Gamma radiation often occurs after a nucleus has emitted an alpha or beta particle.
- Example: Cobalt 90
  - Cobalt 90 with excess ENERGY decays to Cobalt 90 with less ENERGY plus gamma radiation.

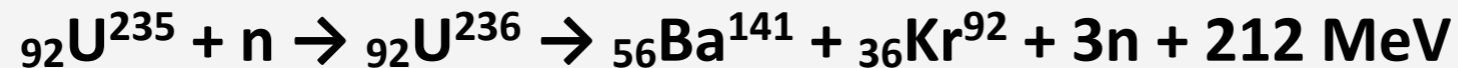


# ■ Tempo di dimezzamento

- La tendenza ad emettere radiazioni è misurata con il tempo di dimezzamento ovvero il tempo necessario affinché la quantità di un isotopo si riduca a metà in seguito alla sua consunzione radioattiva.
- Uranio 235 → Torio 231 =  $700 \times 10^6$  anni
- Uranio 238 → Torio 234 =  $4500 \times 10^6$  anni
- **Nota: gli isotopi Torio 231 e Torio 234 sono ancora instabili e, quindi, continuano a percorrere la catena di decadimenti radioattivi fino al primo elemento stabile (Pb)**
- **Domanda: Se il decadimento radioattivo è un processo estremamente lento, come è possibile utilizzarlo per la generazione di energia nucleare?**

# ■ Fissione Nucleare

- Un neutrone emesso durante il decadimento di una sostanza radioattiva può colpire il nucleo di un elemento pesante e fissionarlo, cioè spezzarlo in due nuclei più piccoli liberando - nel contempo - neutroni dotati di energia cinetica
- In a typical nuclear reaction involving  $U^{235}$  and a neutron:

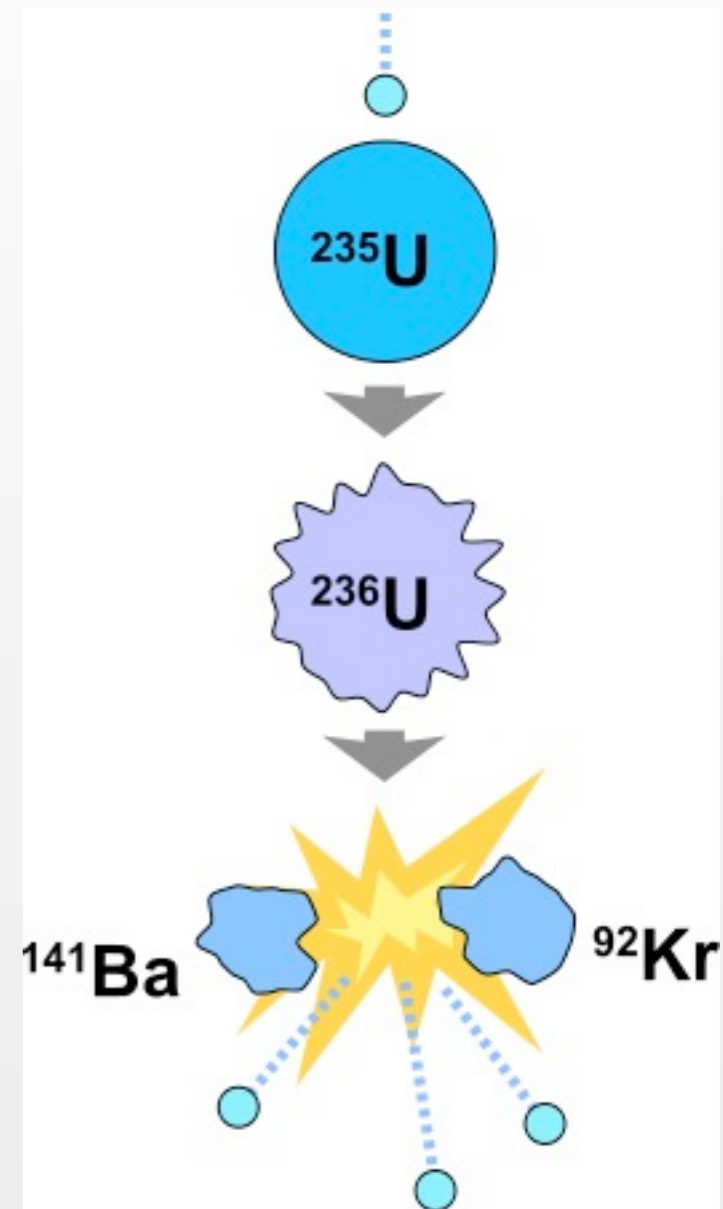


200 MeV = energia sfruttabile ai fini termici

12 MeV = energia fornita - in forma cinetica - ai tre neutroni

L'energia ottenuta da un'unità di massa di U-235 è pari a circa  $2,5 \times 10^6$  volte l'energia ottenuta da un'unità di massa del carbone

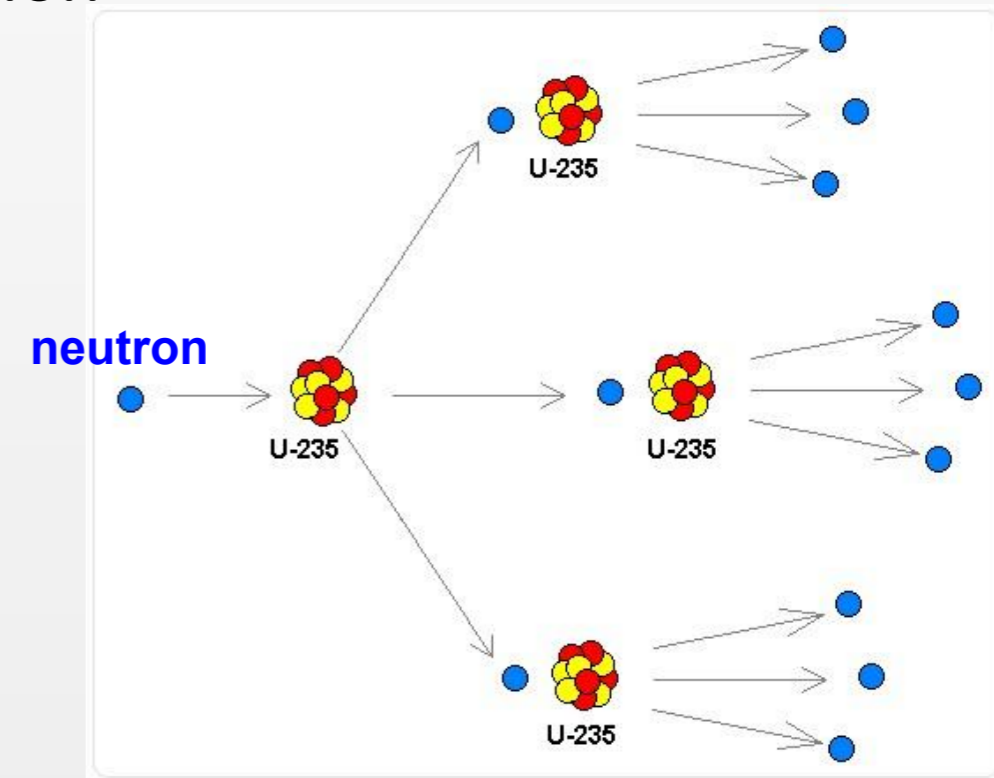
Nota:  $1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$





# ■ Fissione Nucleare

- Nuclear fission is the splitting of an atomic nucleus.
- Nuclear fission can be used as an energy source in a nuclear reactor.
- There are two fissionable substances in common use in nuclear reactors, uranium 235 and plutonium 239
- The fission of a nucleus of Uranium 235 can be initiated by a neutron.
- When this nucleus splits further neutrons are produced.
- These neutrons in turn can cause more nuclei to split.
- An avalanche effect, called a 'chain reaction' can then occur.



**A chain reaction**

# Fissione nucleare

## **Reattore Nucleare:**

1. Deve contenere del materiale “fissile”

2. Deve poter “controllare” la stabilizzazione della reazione

2a. assorbimento di dei neutroni in eccesso in materiali strutturati: barre di controllo composte da materiali a base di boro e cadmio

2b. controllo della velocità cinetica del neutrone. Un neutrone “lento” rimane più a lungo nelle vicinanze del nucleo fissile e viene “catturato” più facilmente. Pertanto occorre che i neutroni vengano “rallentati”.

Carbonio (grafite)

Acqua pesante ( $D_2O$ )

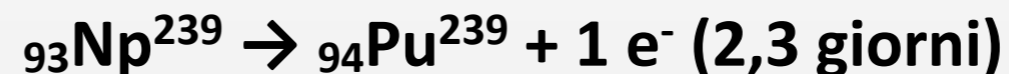
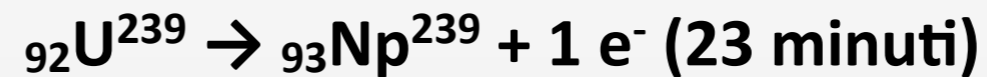
Acqua leggera ( $H_2O$ )

3. Deve permettere l’asportazione del calore generato

$H_2O$  o anidride carbonica

# ■ Fusione Nucleare

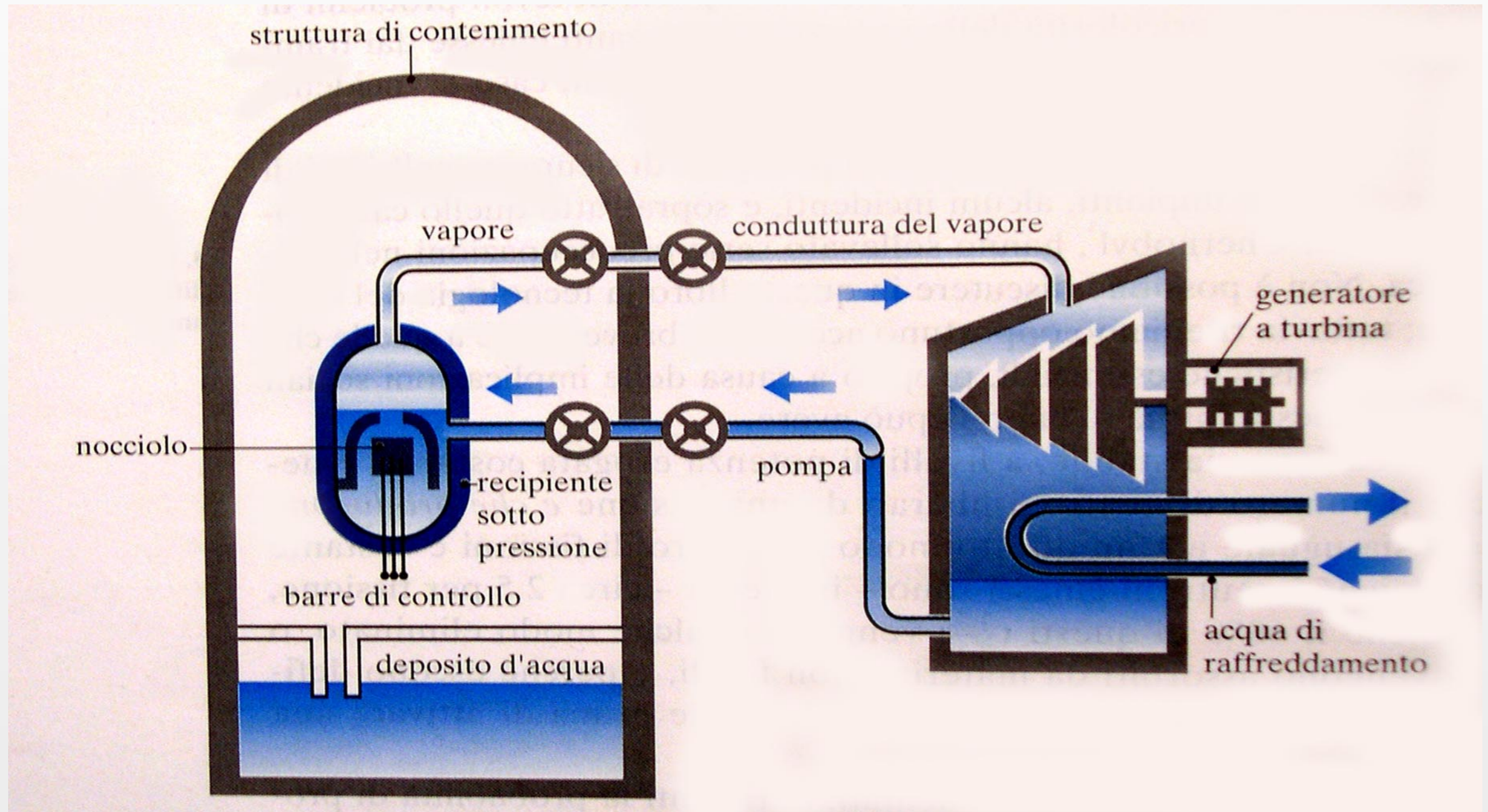
- **Autofertilizzazione:** produzione artificiale di elementi in grado di fissionarsi.
  - L'Uranio-238 non è fissile ma, in seguito alla cattura di un neutrone, può trasformarsi in Plutonio-239.



**Il plutonio-239 è un elemento fissibile.** L'U-238 viene definito elemento fertile.

# ■ Reattore fusione nucleare

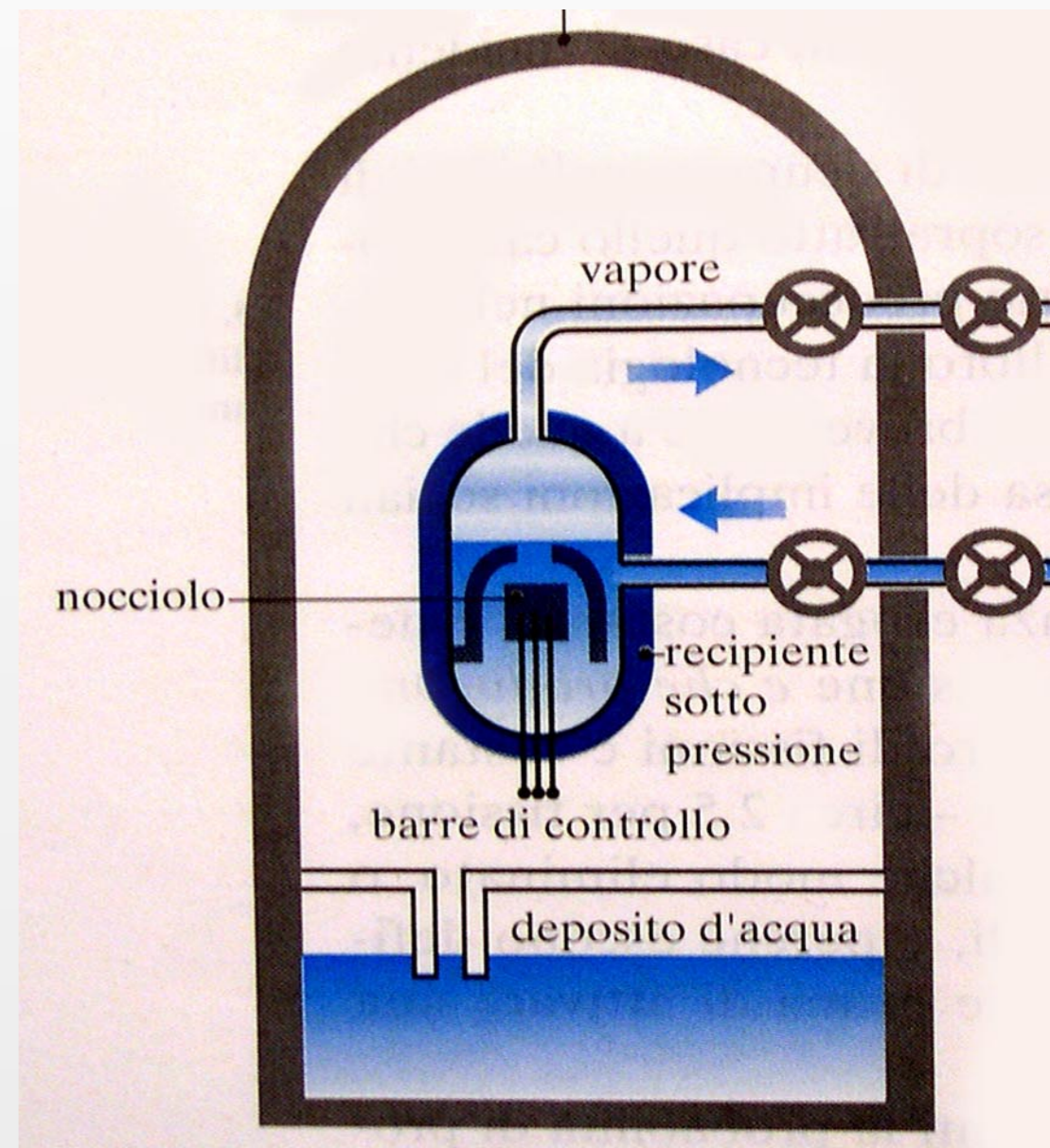
## □ BWR: Boiling Water Reactor (Reattori a ciclo diretto)



# ■ Reattore fusione nucleare

- **BWR: Boiling Water Reactor**
- il combustibile è contenuto in cilindri di lega di zirconio ed è costituito in pellets di biossido di uranio ( $\text{UO}_2$ ) (arricchito al 3% di U-235)
- Le barre di controllo sono mobili e quindi permettono un maggiore o minore assorbimento neutronico
- **Al diminuire della frazione del liquido la reazione nucleare tende a spegnersi**

**Rendimento complessivo 32%**

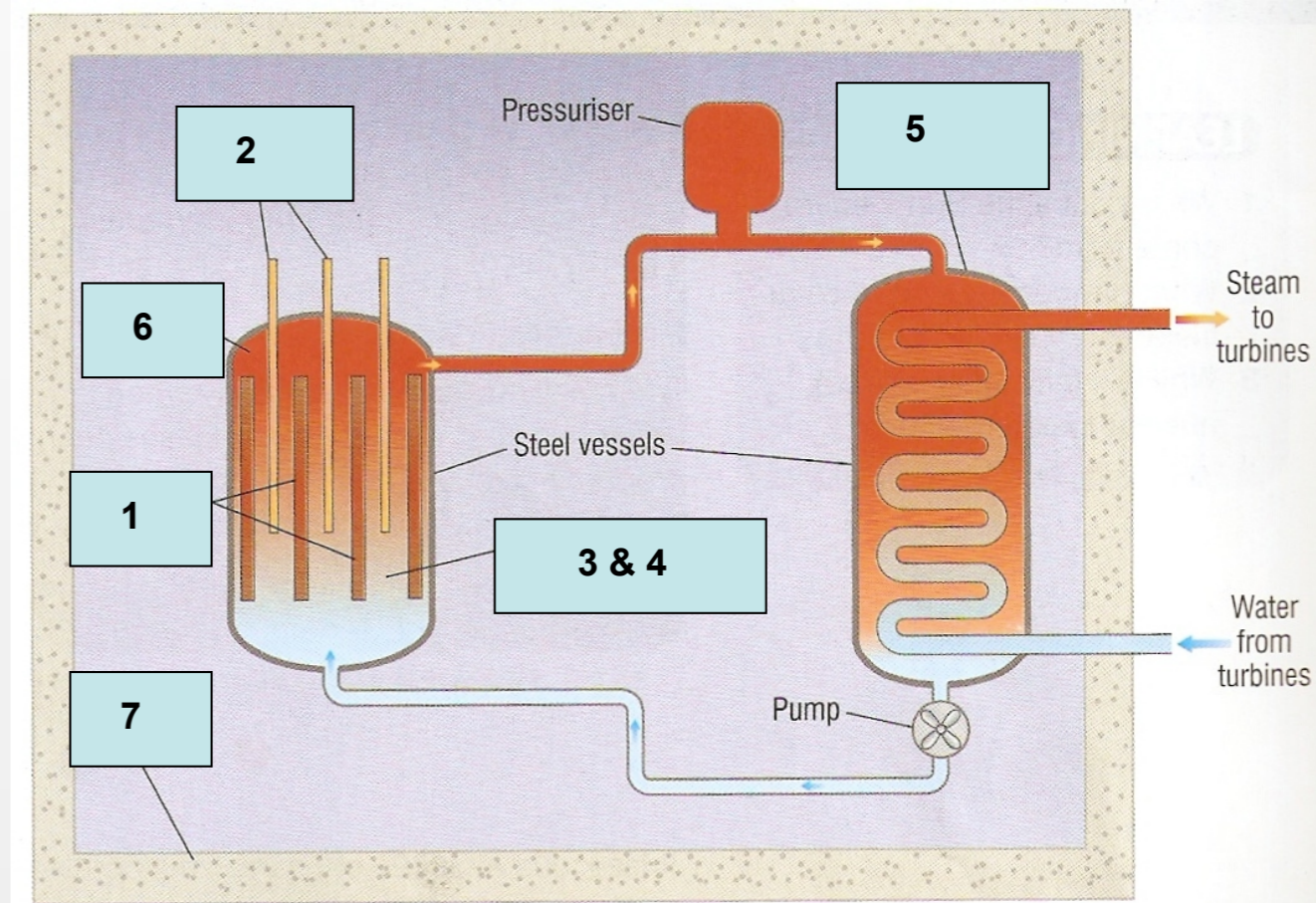


# ■ Reattore fissione nucleare

- **PWR: pressurized water reactor (reattori a ciclo indiretto)**
- I reattori a ciclo indiretto sono gli impianti nucleari più diffusi
- il fluido refrigerante che attraverso il reattore cede il calore acquisito ad uno scambiatore-generatore di vapore. L'acqua che percorre il ciclo non è radioattiva!
- **Rendimento complessivo 31%**

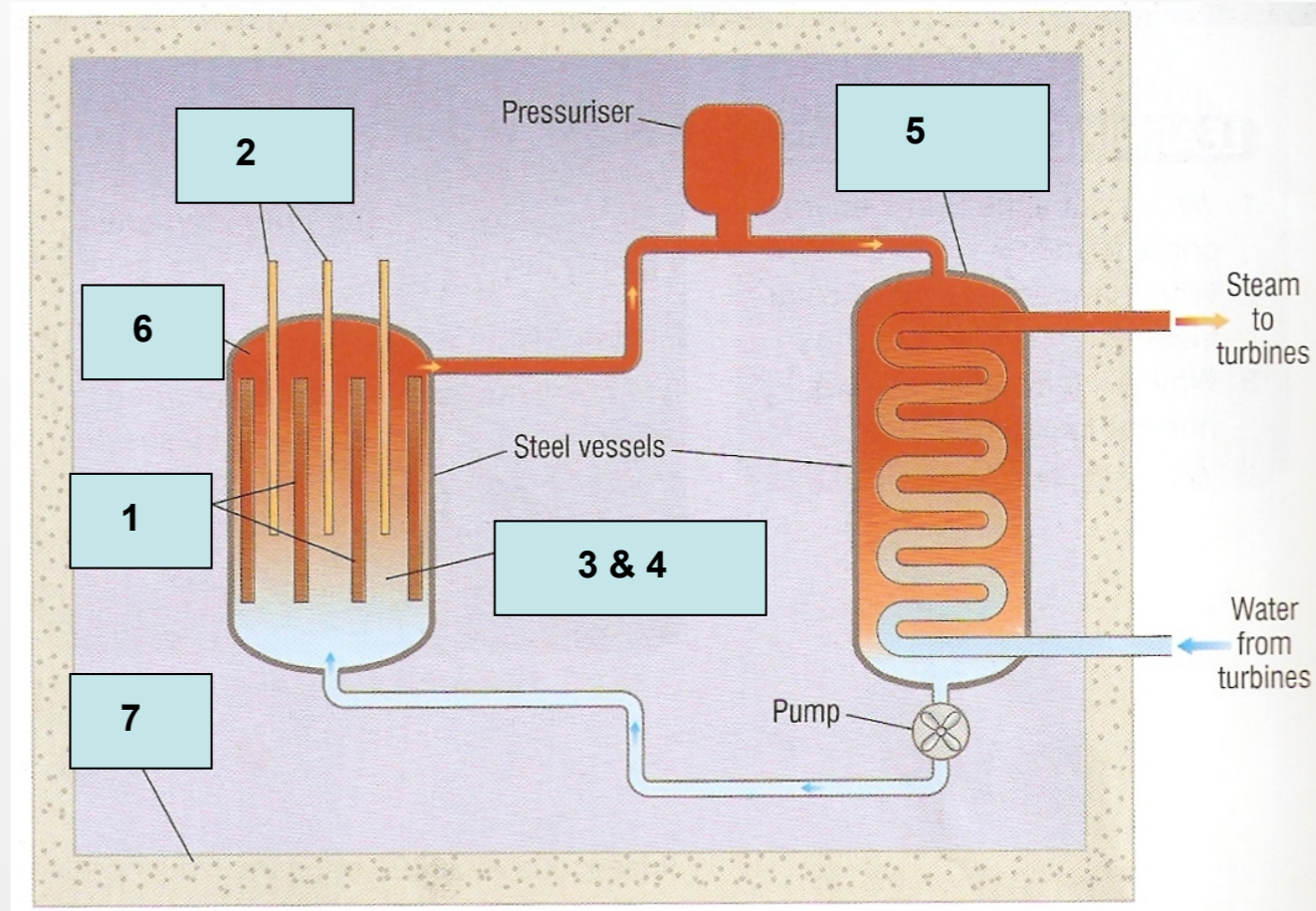
# ■ Reattore fissione nucleare

- **PWR: pressurized water reactor (reattori a ciclo indiretto)**
  
- 1. Fuel rods: These contain U235 or Pu239. They become very hot due to nuclear fission.
  
- 2. Control rods: Made of boron, when placed in-between the fuel rods these absorb neutrons and so reduce the rate of fission. Their depth is adjusted to maintain a constant rate of fission.
  
- 3. Moderator: This surrounds the fuel rods and slows neutrons down to make further fission more likely. The moderator can be water or graphite.



# ■ Reattore fissione nucleare

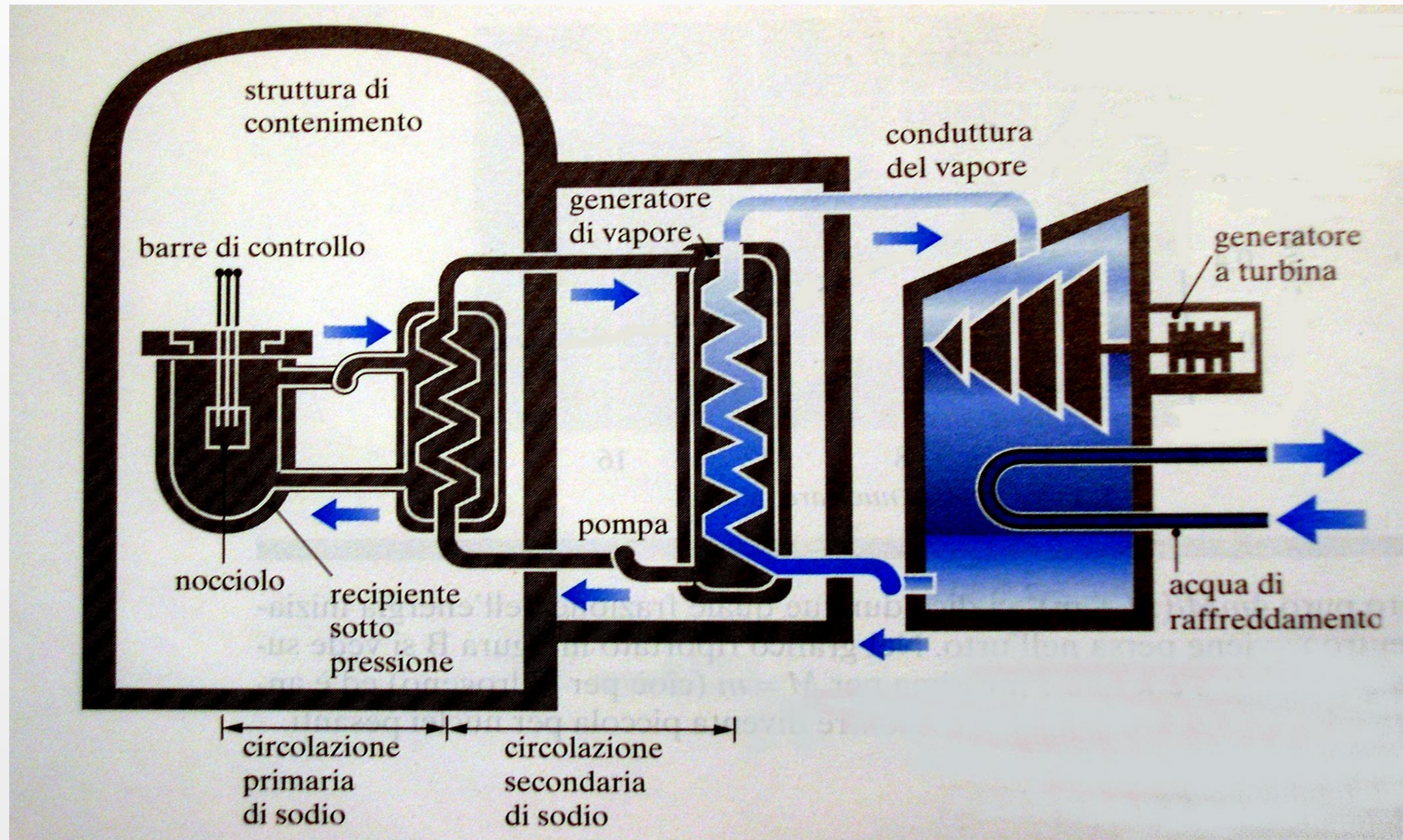
- 4. Coolant: This transfers the heat energy of the fuel rods to the heat exchanger. Coolant be water, carbon dioxide gas or liquid sodium.
- 5. Heat exchanger: Here water is converted into high pressure steam using the heat energy of the coolant.
- 6. Reactor core: This is a thick steel vessel designed to withstand the very high pressure and temperature in the core.





# ■ Reattori fusione nucleare

## □ Autofertilizzanti

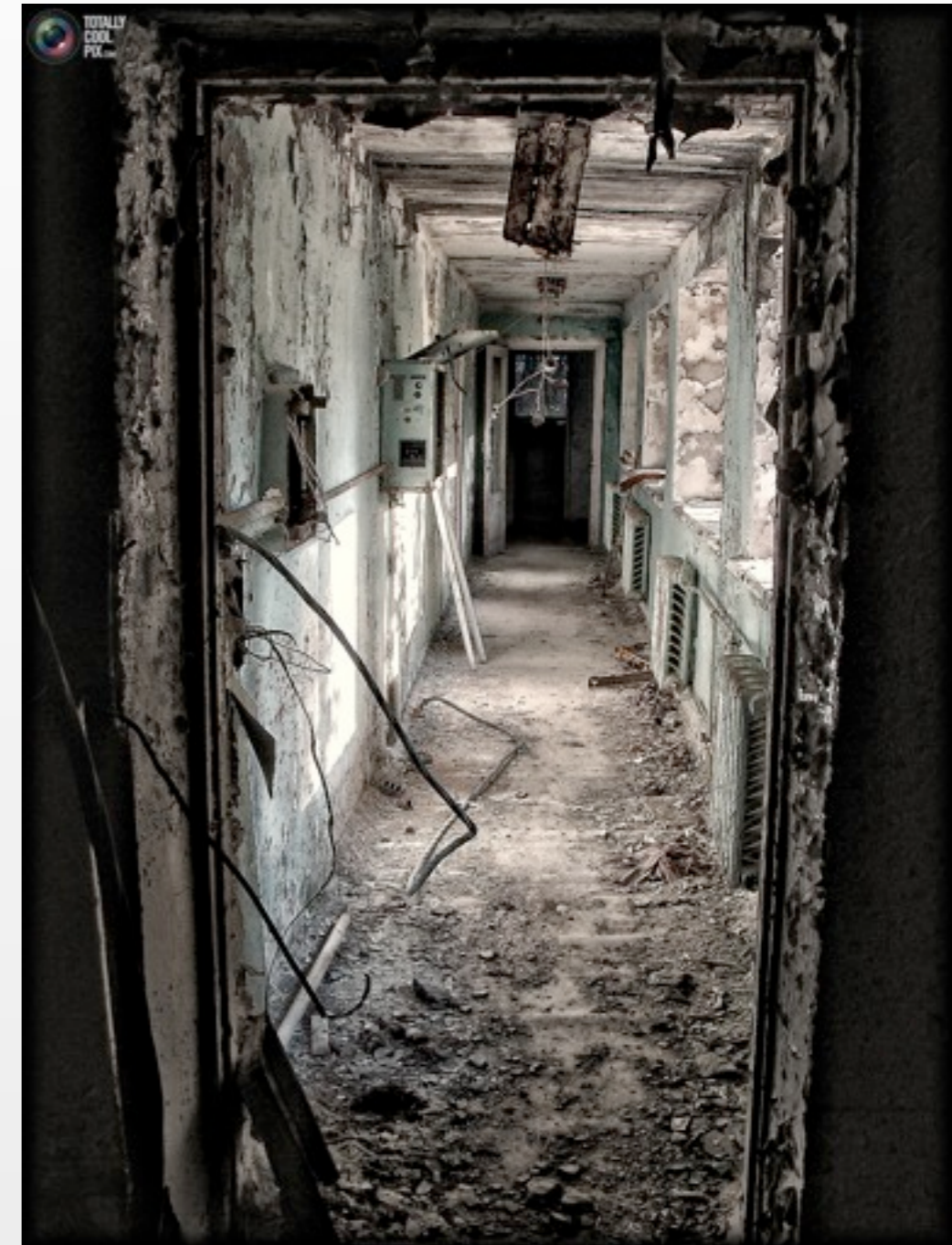


# ■ Disastro di Chernobyl

- I reattori di Chernobyl erano reattori a ciclo diretto raffreddati con acqua normale e moderati con grafite.
- Il nocciolo era mantenuto in un'atmosfera inerte di elio e azoto per evitare che la grafite, riscaldata dalla reazione nucleare, possa incendiarsi
- Va notata l'assenza di un recipiente di contenimento di acciaio (vessel) e di una struttura protettiva esterna in calcestruzzo.
- il 26 Aprile del 1986, i circuiti di raffreddamento normali e di emergenza furono messi fuori servizio da una manovra "sbagliata". Pare che alcuni operatori incoscienti volessero verificare se, mancando l'energia elettrica esterna, l'energia immagazzinata nel turboalternatore fosse sufficiente a fornire potenza elettrica ai circuiti di raffreddamento fino all'entrata in funzione dei gruppi elettrogeni di soccorso.
- La grafite, che aveva raggiunto la temperatura di 2000° C, entrò in contatto con l'aria incendiandosi e generando forti esplosioni.

# Disastro di Chernobyl

- Data incidente: 26.04.1986 (esplosione del quarto reattore)
- Conseguenza dell'esplosione: Proiezione all'esterno di 35 tonnellate di combustibile nucleare; La colonna degli elementi radioattivi dispersi si è alzata a due chilometri d'altezza e si è dispersa per un raggio di 1.200 Km; Livello di radiazioni pari a 20 milioni di curie equivalente ad un miliardo di Giga Beckerel (200 volte superiore a Hiroshima e Nagasaki)
- Area contaminata: 155.000 kmq (un'area grande due volte l'Irlanda).
- Paese più coinvolto: Bielorussia (70% di ricaduta radioattiva; 23% del territorio contaminato, fra cui il 20% del territorio boschivo e 3.000 kmq di terreno agricolo; danno economico valutato in 200 miliardi di \$ USA)
- Persone coinvolte: 10.000.000
- Persone evacuate definitivamente: 400.000 (l'area compresa in un raggio di 30 Km dalla centrale, grande come l'Olanda, è completamente evacuata ed inabitabile);
- Vittime (dirette ed indirette) dell'incidente: 3,2 milioni (di cui un terzo bambini)  
Persone decedute a tutt'oggi a causa dell'incidente: 200.000
- Durata degli effetti dell'esplosione: centinaia di anni a causa dell'azione del Cesio, dello Stronzio, del Plutonio (il Plutonio ha un'emivita di 14.000 anni; il ritorno all'originaria situazione dei terreni contaminati dal Cesio 137 è prevista fra 300 anni)



# ■ Disastro di Chernobyl

- SITUAZIONE SANITARIA:  
11.000 casi di cancro tiroideo nei bambini;  
aumento esponenziale delle patologie da immunodeficienza  
tumore alla vescica da 5,5 a 19,7 casi su 100.000 persone  
tumore ai reni aumentato di 2,5 volte  
in 7 anni passaggio delle leucemie da 9,34 a 11,52 casi su 100.000
- bambini  
2.500 nascite annuali con anomalie genetiche (3% dei nati)  
500 aborti non spontanei per presenza anomalie  
picco delle conseguenze genetiche previsto, dagli esperti dell'ONU, fra il 2006 ed il 2010 quando coloro che erano bambini all'epoca dell'incidente cominceranno a procreare
- SITUAZIONE SOCIALE:  
tasso di povertà infantile aumentato del 150% rispetto ai tassi globali di povertà  
stipendio medio mensile: 50/70 \$ USA  
aumento dell'alcolismo e dei casi di Aids (legati alla tossicodipendenza)  
aumento delle patologie della povertà (tubercolosi e difterite)

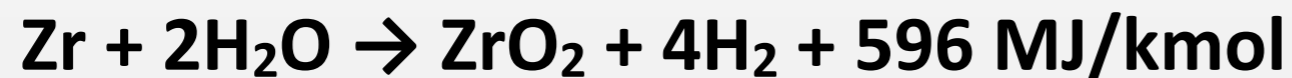


# ■ Disastro di Fukushima

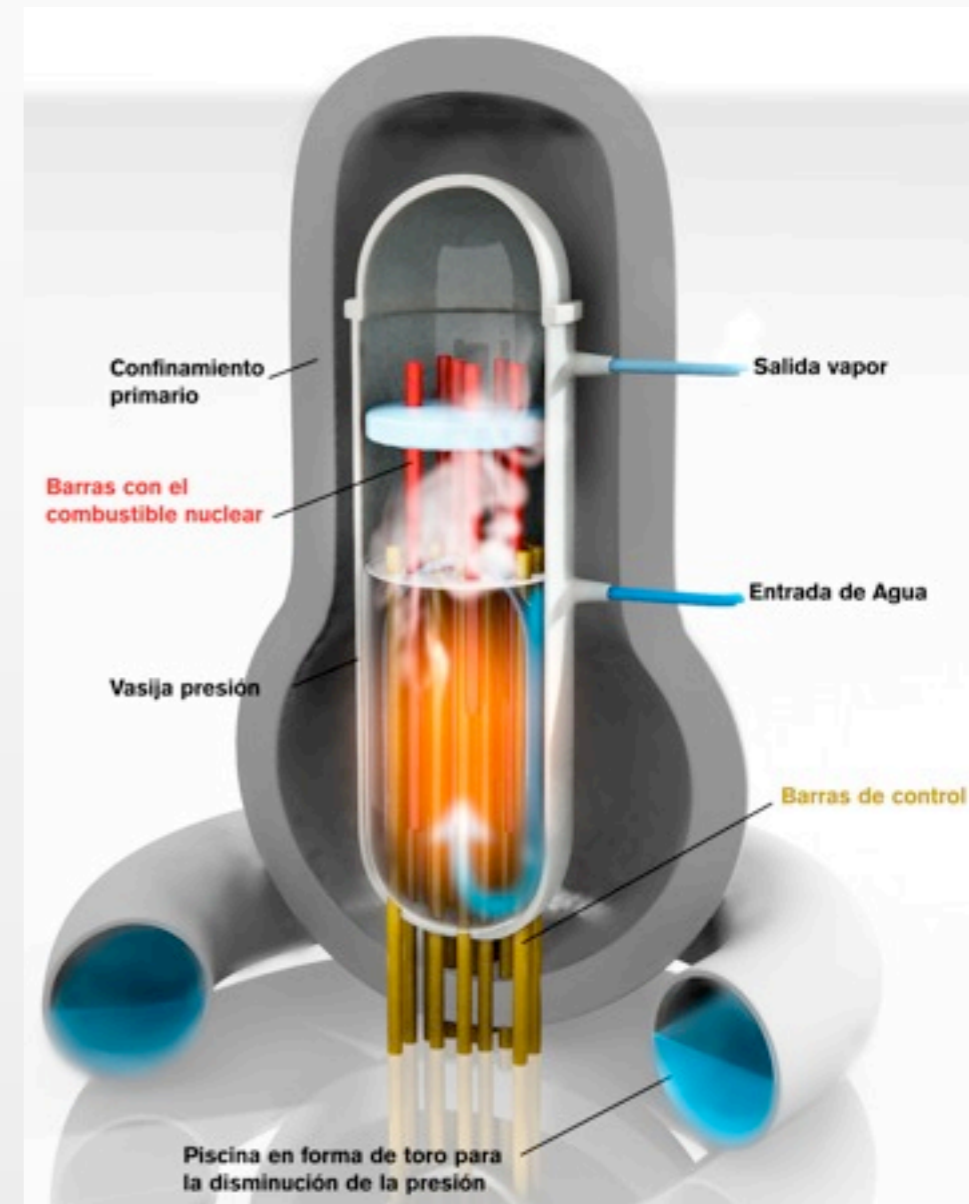
- Nel distretto di Fukushima sono state installate nel 1970 due centrali nucleari (Fukushima “Daichi” e Fukushima “Daini”)
- Nella centrale Fukushima “Daichi” dove è avvenuto l’incidente erano installati 6 reattori nucleari a ciclo diretto (BWR)
- Incidente è ascrivibile al terremoto di intensità 9 sulla scala Richter che ha colpito il Giappone 11 Marzo 2011 e - soprattutto - all’onda di tsunami che a Fukushima ha raggiunto altezze di oltre 10 metri.
- Cosa è successo?
  - 1. Il terremoto ha causato l’interruzione dell’energia elettrica. L’intervento dei gruppi elettrogeni, azionati da motori a diesel, ha ridato corrente ai reattori consentendo ugualmente l’inserimento in automatico delle barre di controllo che hanno spento immediatamente le reazioni nucleari
  - 2. Contemporaneamente i sistemi di refrigerazione di emergenza hanno iniziato a smaltire il calore di reazione residuo, azionati sempre da gruppi elettrogeni.

# Disastro di Fukushima

- Dopo il terremoto, l'onda di tsunami ha sommerso i gruppi elettrogeni, posti ad un'altezza di circa 6 metri, mettendo fuori servizio i sistemi di refrigerazione.
- Sia nei noccioli che nelle vasche si sono raggiunti oltre 1000°C.
- Lo zirconio nelle barre ha interagito con l'acqua secondo la reazione esotermica:

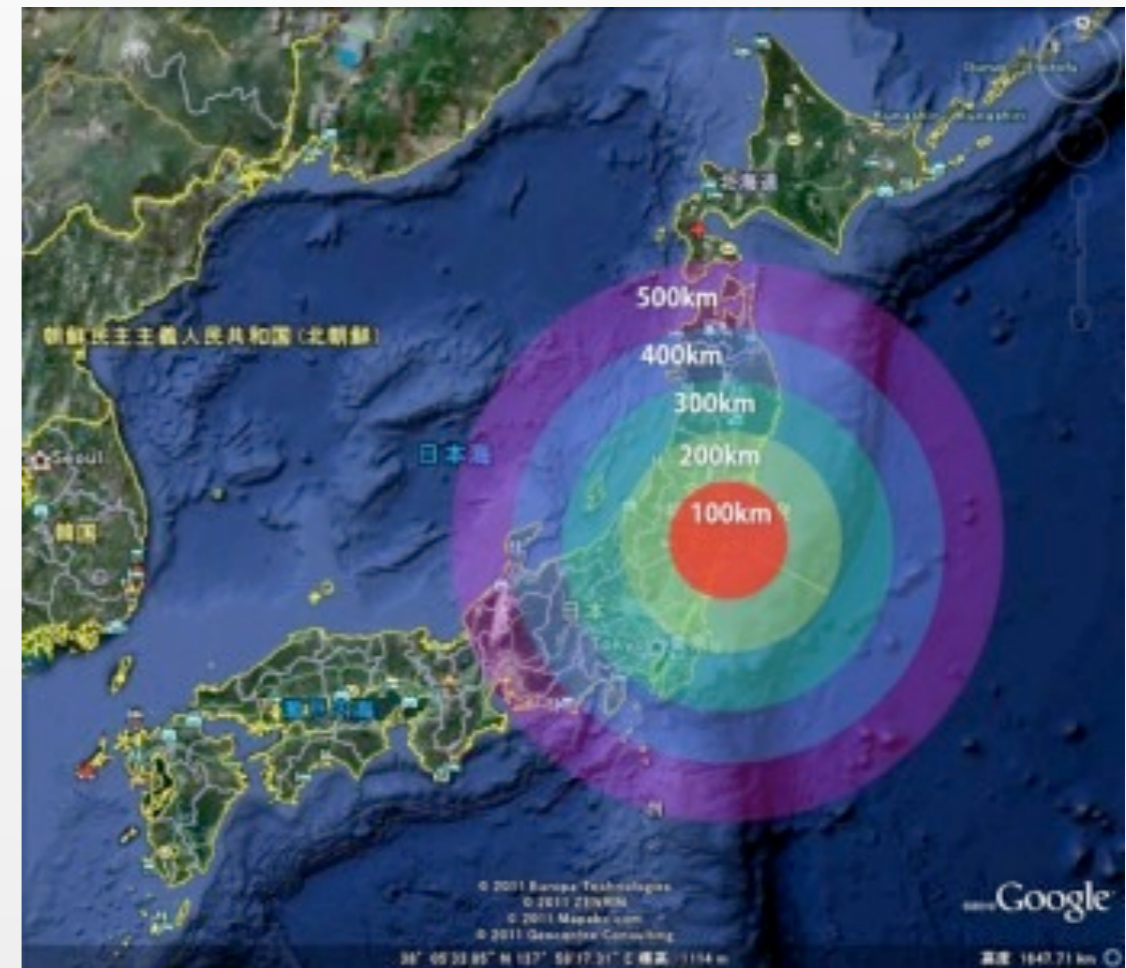


- La sovrappressione ha provocato la rottura delle vasche di contenimento e la miscela di idrogeno e vapore è passata all'interno dell'edificio di centrale causando esplosioni che hanno ulteriormente danneggiato le pareti del reattore.



# ■ Disastro di Fukushima

- data incidente: Alle 14.46 ora locale dell'11 marzo 2011 si verificò una scossa di terremoto di magnetudo 8.9 scala Richter, per circa 53 secondi a questa entità, ma dai 4 ai 10 minuti il totale, con epicentro 130km est dell'isola di Honshu
- Centrali nucleari in Giappone: dei 54 rettori Atomici presenti nel territorio nipponico ben 43 sono rimasti in funzione, quel giorno, mentre quelli di Onagawa, Fukushima e Okai si sono immediatamente bloccati come da procedure di sicurezza.
- I reattori di Fukushima come quasi tutti quelli del Giappone, che si trovano in molti casi in riva al mare, erano studiati per un impatto di tsunami, ma solo fino ad un'altezza massima di 5,7 metri, mentre essendo molto maggiore l'entità dell'onda dell'11 marzo scorso



# ■ Disastro di Fukushima

- In Settembre dello scorso anno il governo giapponese fece un'indagine di misurazione della radioattività in 2200 zone limitrofe al distretto interessato dal disastro e in ben 136 furono riscontrati valori pericolosi per l'uomo, e in altre 33 dentro la zona evaquata i valori erano più i più alti mai registrati nella storia, superando anche quelli del dopo Chernobylle....
- Purtroppo i disastri nucleari non hanno mai fine ed i danni arrecati dalle radiazioni si possono quantificare solo con il tempo. Tra gli elementi rilasciati in acqua e in aria con l'esplosione del reattore ci sono Iodio 131 (8 giorni di emivita) Iodio 125 (60 giorni di emivita) il Cesio 132 (2 anni di emivita) Cobalto 60 (6anni di emivita) Stronzio 90 (29 anni di emivita) Cesio 134 (30 anni di emivita) Americio 241 (425anni di emivita) Plutonio 239 (25.000 anni di emivita)...per emivita si intende il tempo necessario a questa sostanza o materiale per cambiare la sua molecola in una meno pericolosa o meno radiottiva

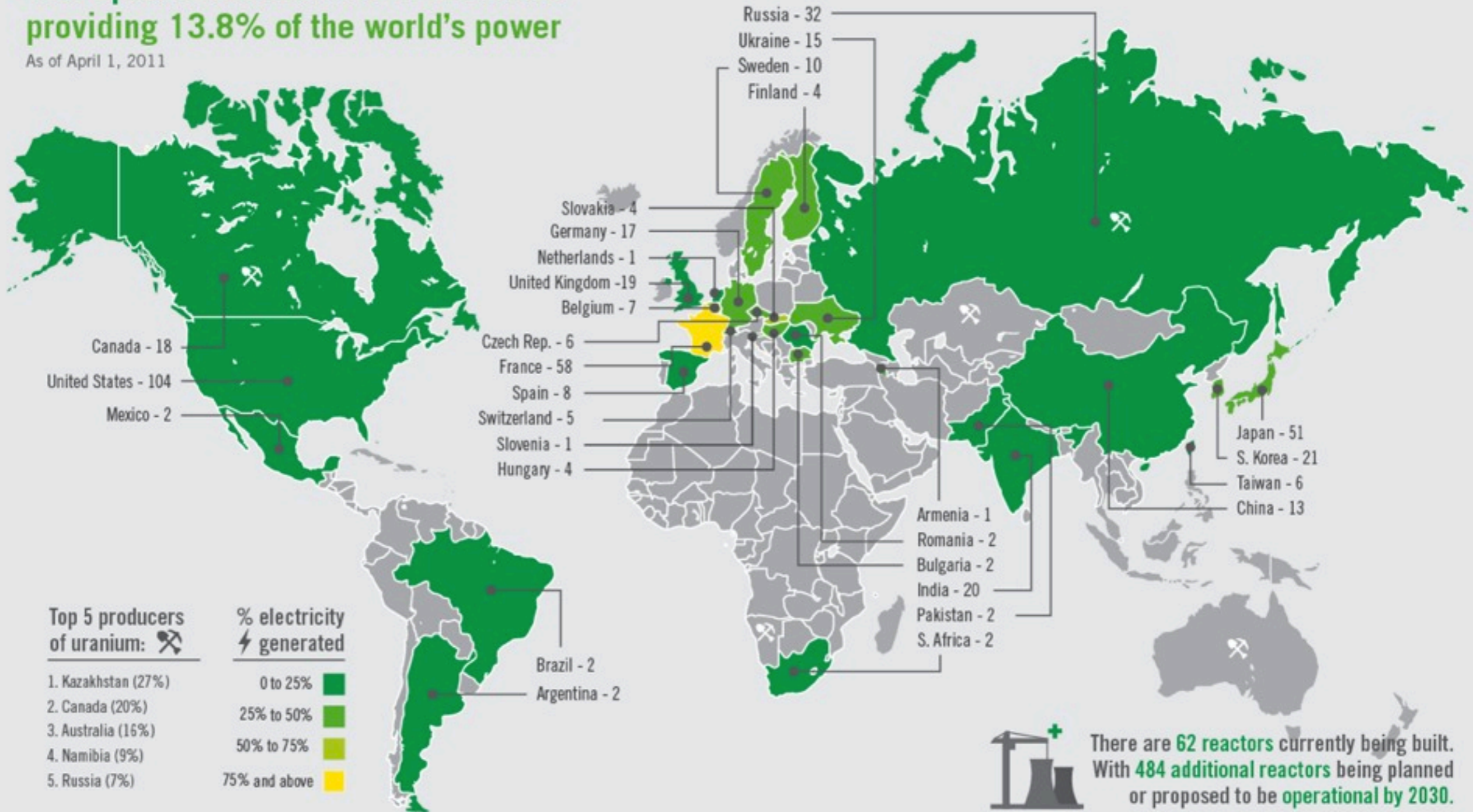




# Reattori nucleari nel mondo

**World Nuclear Power Reactors**  
**439 operational reactors in the world**  
**providing 13.8% of the world's power**

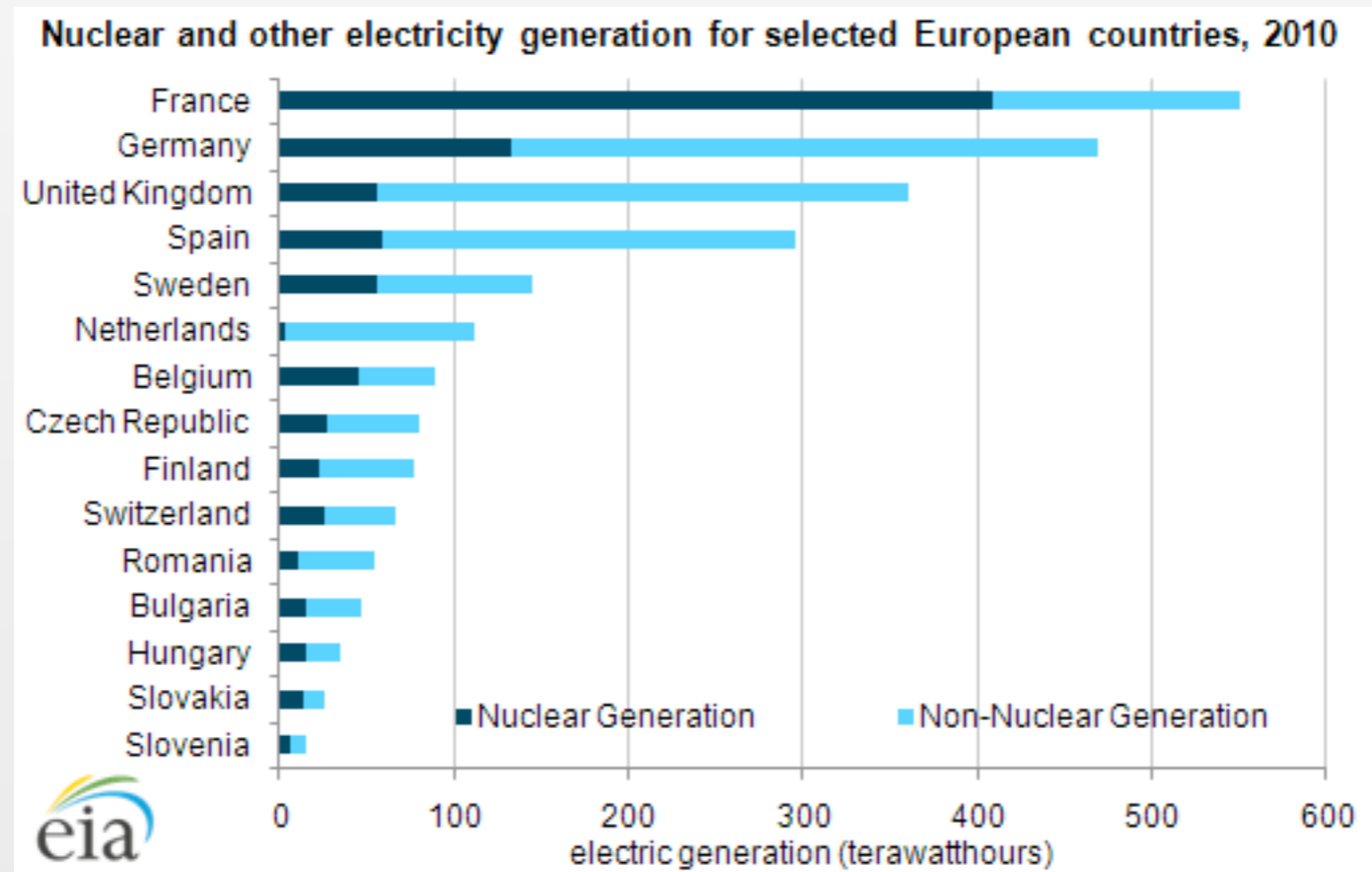
As of April 1, 2011



There are **62 reactors** currently being built.  
 With **484 additional reactors** being planned  
 or proposed to be operational by 2030.

## ■ Consumo energia Nucleare

- Looking at the current capacity of nuclear energy, at the end of 2009, there were 436 power reactors in operation in 30 countries around the world, totalling 370 GW of installed nuclear capacity.
- According to the graph presented below, the share of nuclear energy in countries with operating reactors ranges from less than 2 percent to more than 75 percent. Overall, current nuclear power provides around 14 percent of global electricity

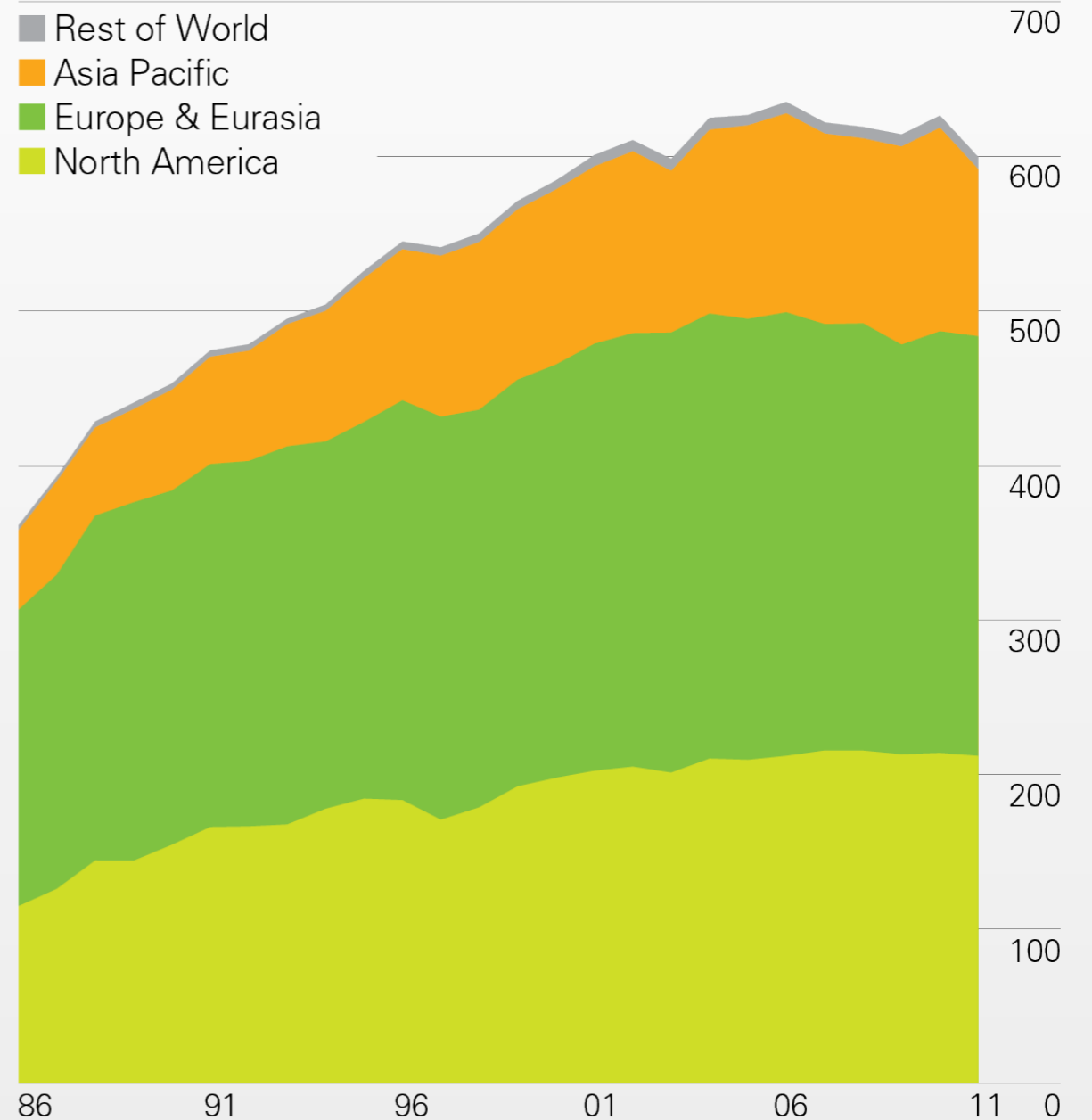


# Consumo Energia Nucleare

- World nuclear power generation declined by 4.3%, the largest decline on record. Japanese nuclear output fell by 44.3%, and German output fell by 23.2%.

## Nuclear energy consumption by region

Million tonnes oil equivalent



World nuclear power generation declined by 4.3%, the largest decline on record. Japanese nuclear output fell by 44.3%, and German output fell by 23.2%.

## ■ Previsioni consumi energia Nucleare

- Nel mondo, vengono consumate circa 68000 tonnellate di uranio all'anno, destinate soprattutto ai reattori convenzionali
- Si stima che le attuali riserve di uranio potranno soddisfare la richiesta per altri 80 anni
- Il mercato dell'uranio si sta riprendendo: dopo il crollo in seguito all'incidente di Fukushima, la conferma dei grandi programmi nucleari in India e in Cina fa prevedere che la richiesta aumenterà nel prossimo futuro
- La produzione nucleare dell'India aumenterà di 13 volte entro il 2030
- Notevoli anche le previsioni per la Corea del Sud: entro il 2024 la potenza nucleare sarà almeno raddoppiata, arrivando a 36000 MW

# ■ Energia Nucleare in Europa

- Nine European countries generated over 30% of their electric power from nuclear sources in 2010. An additional five countries generated over 20% of their power from nuclear sources. Germany, which ranked second in both total and nuclear generation in 2010, has announced plans to phase out nuclear generation by 2022.
- Recent issues in European energy policy include a reassessment of nuclear power following the accident at Japan's Fukushima nuclear facility in March 2011. While **Germany, Switzerland, Italy, and Austria have resolved to reduce or eliminate their reliance on nuclear power** in the aftermath of that event, France plans to continue its current extensive nuclear program, as does the United Kingdom.
- Germany currently generates about a quarter of its electricity from nuclear power, yet announced plans to decommission its more than 20 gigawatts of nuclear capacity by 2022. Switzerland generates over a third of its electricity from nuclear sources, but has decided to halt development of new facilities. Existing plants will be permitted to operate until the end of their lifetime, effectively phasing out nuclear power in that country by 2034. Italy and Austria do not have commercial nuclear reactors; however, in a recent referendum, Italy voted against new nuclear construction, and Austria has decided to end their imports of electricity generated from nuclear sources by 2015.
- Countries within the European Union (EU) must consider EU-wide energy goals, which include a 20% decrease in greenhouse gas emissions by 2020 (from 1990 levels). Because nuclear power does not emit greenhouse gases, the loss of the nuclear component in the generation portfolio in some countries will make it harder for them to meet the national commitments that have been made in support of this EU-wide goal.

# ■ Rischi della fonte nucleare sulla salute umana

□ Scorie nucleari: dalla fissione del U-235 si possono formare tutta una serie di prodotti con massa atomica tra 160 e 80. **Questi isotopi sono instabili e radioattivi**

□ La dose assorbita “pesata” si misura in sievert [Sv] **1 Sv = 1 joule Raggi X / kg**

## □ Effetti immediati

dose [Sv]	sintomi	Rischio Morte	Morte dopo
0-1	nessuno	nessuno	
1-2	vomito e diminuzione globuli bianchi	nessuno	
2-6	come sopra + emorragie, infezioni depilazione	fino 80%	2 mesi
6-10	come sopra	tra 80 e 100%	2 mesi
oltre 10	come sopra + sonnolenza, tremori e febbre	certo	2 settimane

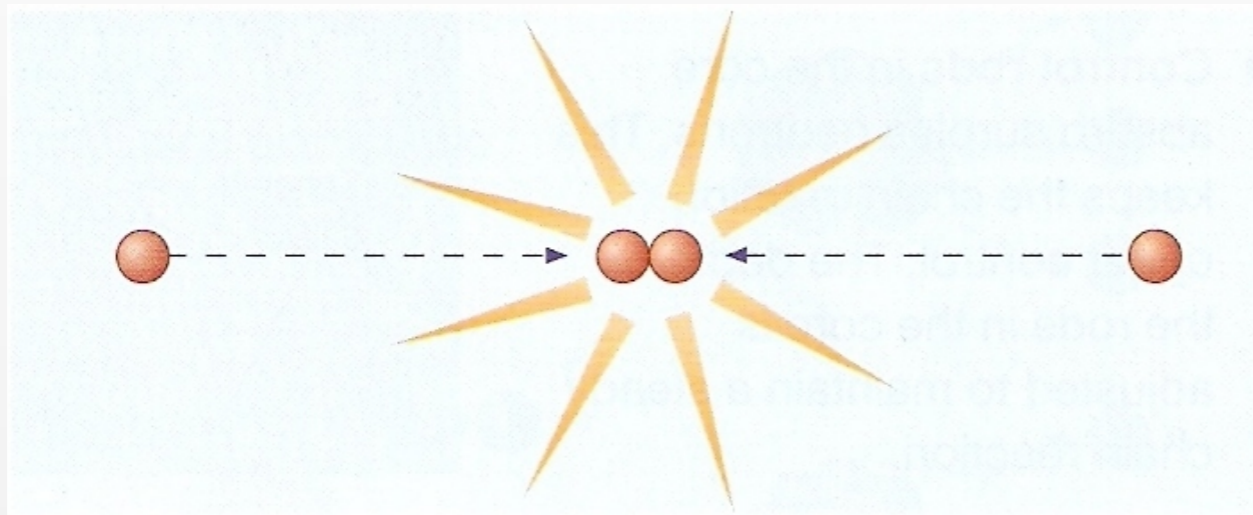
□ **Effetti tardivi:** leucemia midollo osseo, cancro ossa/polmoni/seno/tiroide, malformazioni e malattie nei discendenti

# Nucleare si o no?

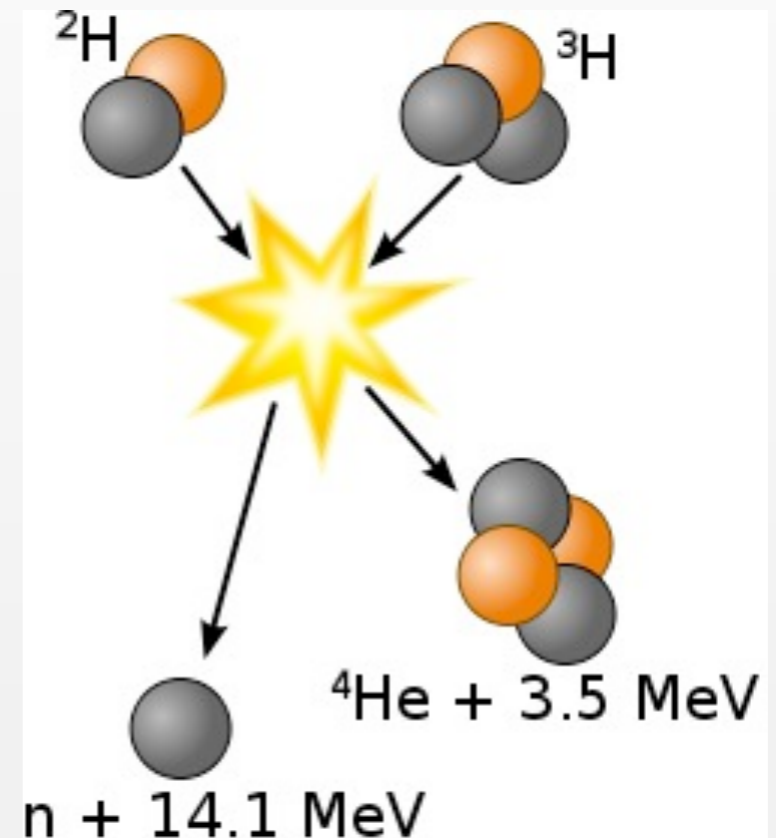
- SI / NO**
- sicurezza (rischio salute e ambiente)
- smaltimento scorie
- proliferazione nucleare (sviluppo armi atomiche)
- costi costruzione

# ■ Fusione Nucleare

- Consiste nell'unione di due nuclei leggeri in un nucleo più pesante, la cui massa è però minore della somma delle masse dei nuclei di partenza.



Hydrogen nuclei undergo fusion in stars to make helium nuclei




- Si verifica liberazione di energia secondo il principio di equivalenza massa-energia.
- Deuterio + Trizio = Elio4 + neutrone + 17,6 MeV di energia





# Fusione Nucleare

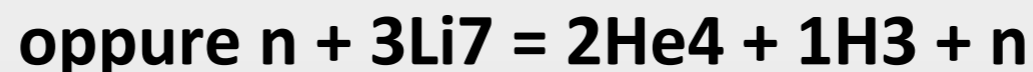
- Nuclei a distanza  $<10^{-12}$  cm : entrano in gioco le forze nucleari
- Bisogna vincere le repulsioni elettrostatiche (barriera di potenziale dovuta alla forza elettrica coulombiana repulsiva :  $U=Z_1Z_2e^2/R$ ) → occorre fornire energia cinetica elevata per l'avvicinamento. Effetto tunnel
- Si riscaldano i nuclei con l'esplosione di una bomba Atomica (innesco) → reazione termonucleare
- Temperatura elevata a milioni di gradi notevole aumento dell'oscillazione termica: i nuclei si avvicinano fino a interagire (interazione forte)  inizia il processo di fusione

# Fusione Nucleare

- Calcoliamo la temperatura necessaria perché si possa sviluppare la fusione fra deuterio e trizio.
- L'energia cinetica media  $E$  di una particella che si trova alla temperatura assoluta  $T$  è  $E = kT$ , dove  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K è la costante di Boltzmann. Se l'energia cinetica necessaria per avvicinare i nuclei di deuterio e di trizio, vincendo la barriera coulombiana, è  $E = 0,01$  MeV, la temperatura dei nuclei deve essere  $T = E/k = 0,01 \cdot 10^6 \times 1,6 \cdot 10^{-19} / 1,38 \cdot 10^{-23} \approx 1,2 \cdot 10^8$  K. Cioè 120 milioni di gradi.

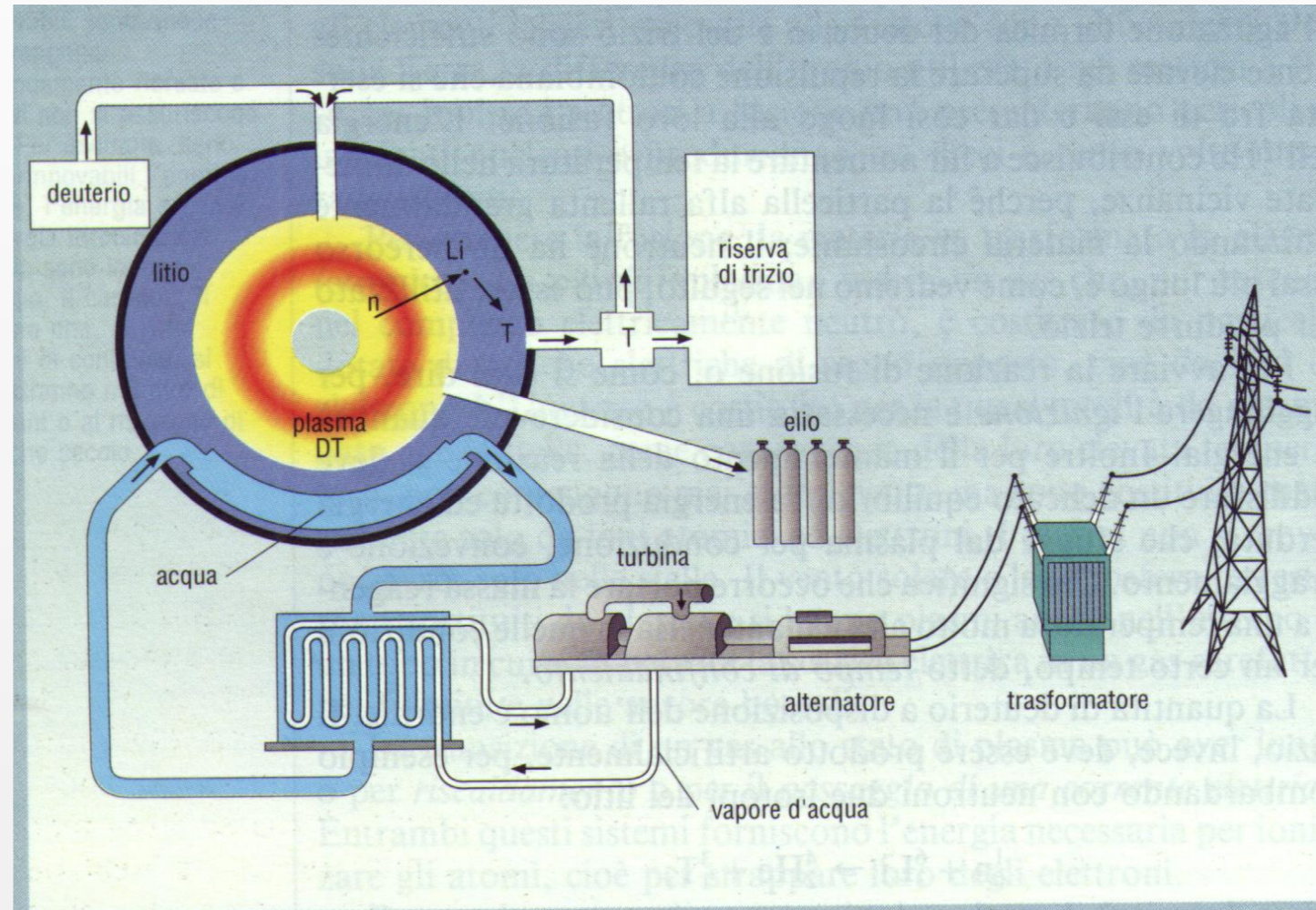
# Fusione Nucleare

- Reattore TOKAMAK**
- $T > 100.000 \text{ }^\circ\text{C}$ : H ionizzato. Come mantenere l'idrogeno alla temperatura di decine di milioni di gradi? Quale contenitore può reggere ad una prova così devastante?
- Il gas reagente è sotto forma di plasma: DEUTERIO + TRIZIO  $\rightarrow$  PLASMA (con riscaldamento o passaggio di corrente)
- $T \sim 100$  milioni di gradi: gli ioni positivi di deuterio e tritio, che tendono a respingersi, acquistano un'energia cinetica (dovuta all'agitazione termica) che fa superare la repulsione, avviene dunque la fusione.
- Tempo di confinamento: periodo di tempo necessario affinché si stabiliscano le condizioni di temperatura opportune
- Alcuni neutroni prodotti dalla reazione vengono riutilizzati per produrre tritio, nella reazione:



# ■ Fusione Nucleare

- **Reattore TOKAMAK**
- Reazioni di fusione del plasma nel contenitore toroidale
- Litio intorno, utile per la produzione del trizio.
- L'elio è raccolto all'esterno del reattore.
- Energia sottoforma di calore portata via dall'acqua, come nei reattori a fissione, per produrre energia elettrica.



# Fusione Nucleare

- Davvero è possibile???**
- Ad oggi non è possibile realizzare processi di fusione controllati, autosostenuti e con sviluppo programmato di energia
- 1993 a Princeton (New Jersey) : prototipo sperimentale sulla fusione controllata → la temperatura raggiunse un valore superiore al triplo di quella del nucleo del Sole
- 1992: Iter (International Tokamak experimental reactor) → sperimentazione nel giro di 30 anni, potrebbe cominciare a produrre energia pulita a basso costo (autosostenuto)

# ■ Fissione vs Fusione

- Fissione:  $200 \text{ MeV} / 235 \text{ nucleoni} \sim 1 \text{ MeV} / \text{nucleone}$
- Fusione:  $17,6 \text{ MeV} / 5 \text{ nucleoni} = 3,5 \text{ MeV} / \text{nucleone}$
- **Per ogni unità di massa l'energia liberata dalla reazione di fusione è circa 3,5 volte maggiore di quella ottenibile dalla fissione.**
- Nella fusione ci sono minori scorie radioattive (con la fusione verranno prodotti tra 10 e 100 volte meno radioisotopi).
- la fusione nucleare è una fonte energetica quasi rinnovabile (gli elementi che interagiscono nel processo sono facilmente reperibili sulla terra )
- Inoltre la produzione di energia dalla fusione promette bene grazie all'abbondanza relativa del combustibile e all'assenza di alcuni dei pericoli insiti nei reattori a fissione.
- Il problema è che le reazioni di fusione sono difficili da ottenere.