

Lezioni dal corso di  
***'Gestione degli impianti di conversione  
dell'energia'***

Università Federico II di Napoli  
17/04/2012

**ELEMENTI DI BASE  
DEGLI IMPIANTI NUCLEARI**

# Cosa sono gli impianti “nucleari”?

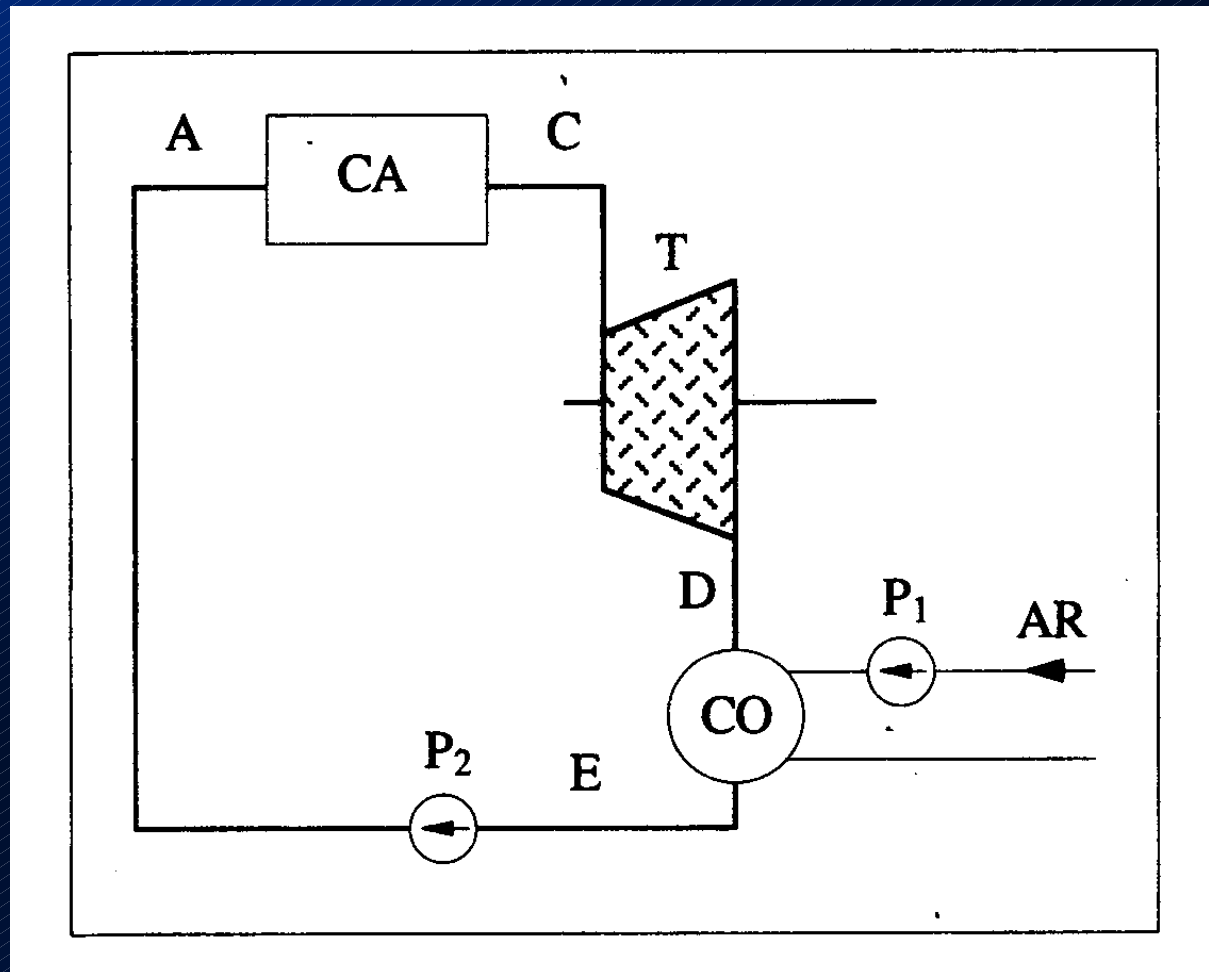
Con la dizione “impianti nucleari” siamo soliti indicare centrali termoelettriche in cui il generatore di calore è un reattore nucleare in luogo di un reattore chimico.

Con dizione probabilmente più corretta, tale tipologia di impianti è anche come nota come centrali nucleo-termoelettriche.

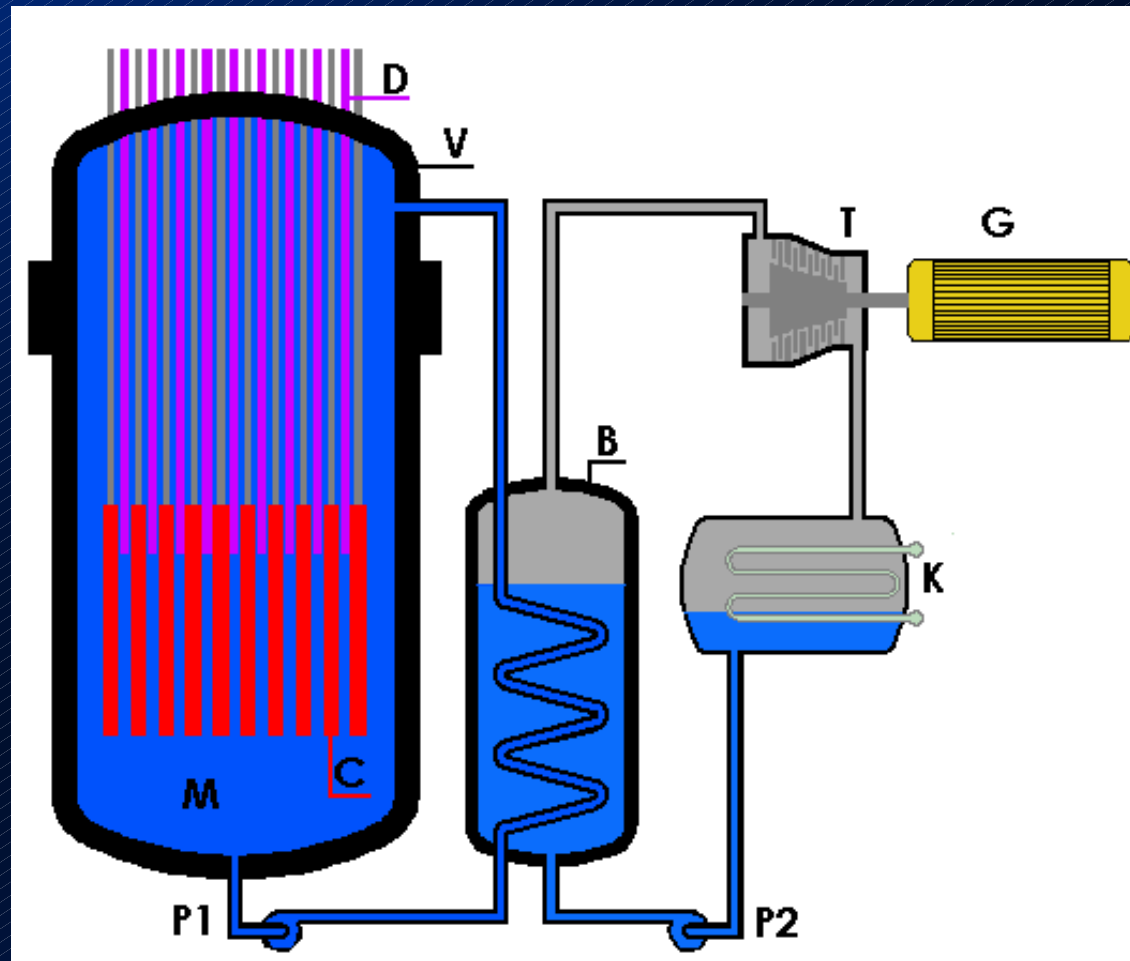
Gli impianti nucleari possono essere impianti motore a vapore o a gas a seconda del tipo di fluido che espande in turbina.

Nel mondo, gli impianti nucleari con ciclo a vapore sono di gran lunga più diffusi.

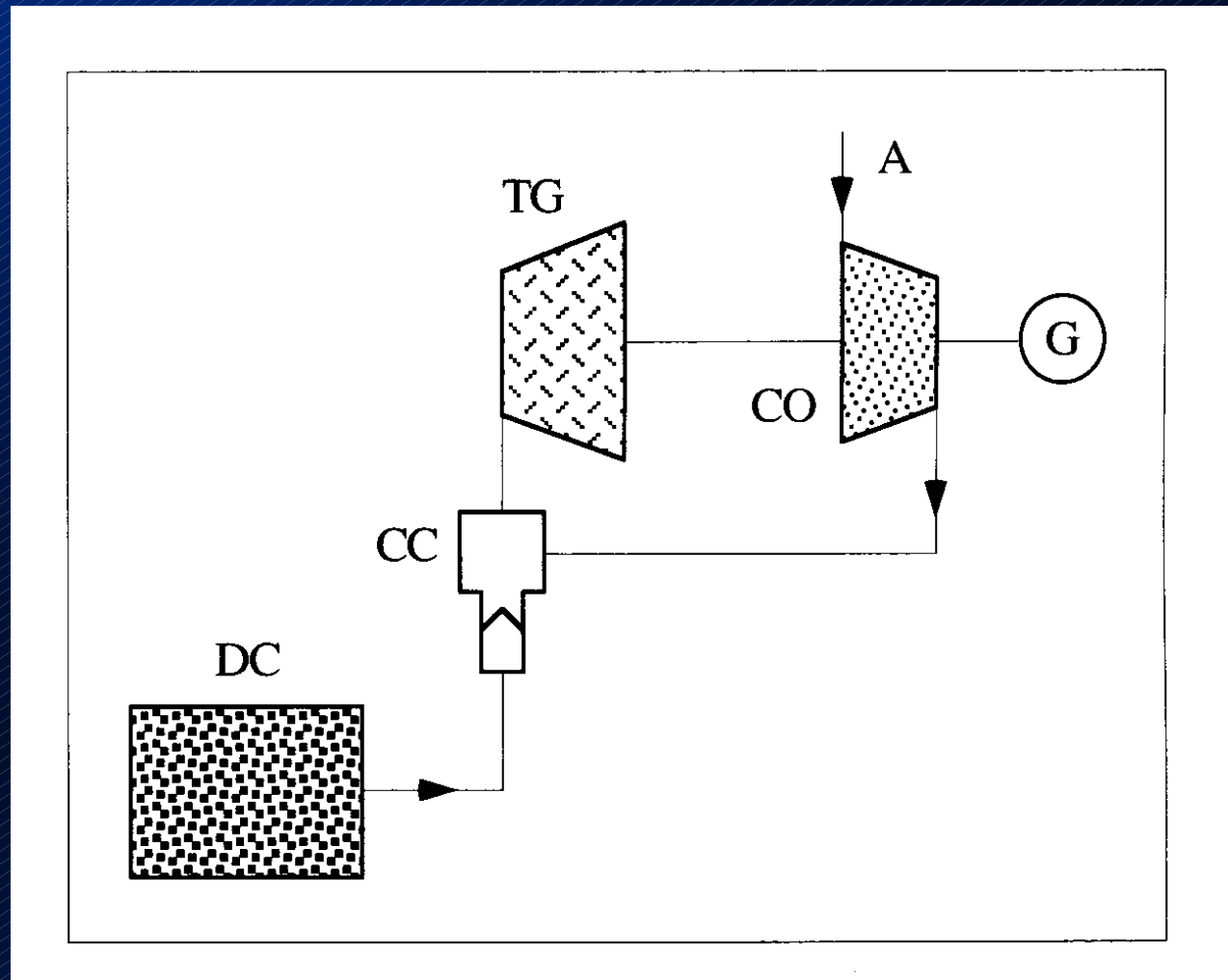
# Impianto a vapore “tradizionale”



# Ciclo a vapore con reattore nucleare



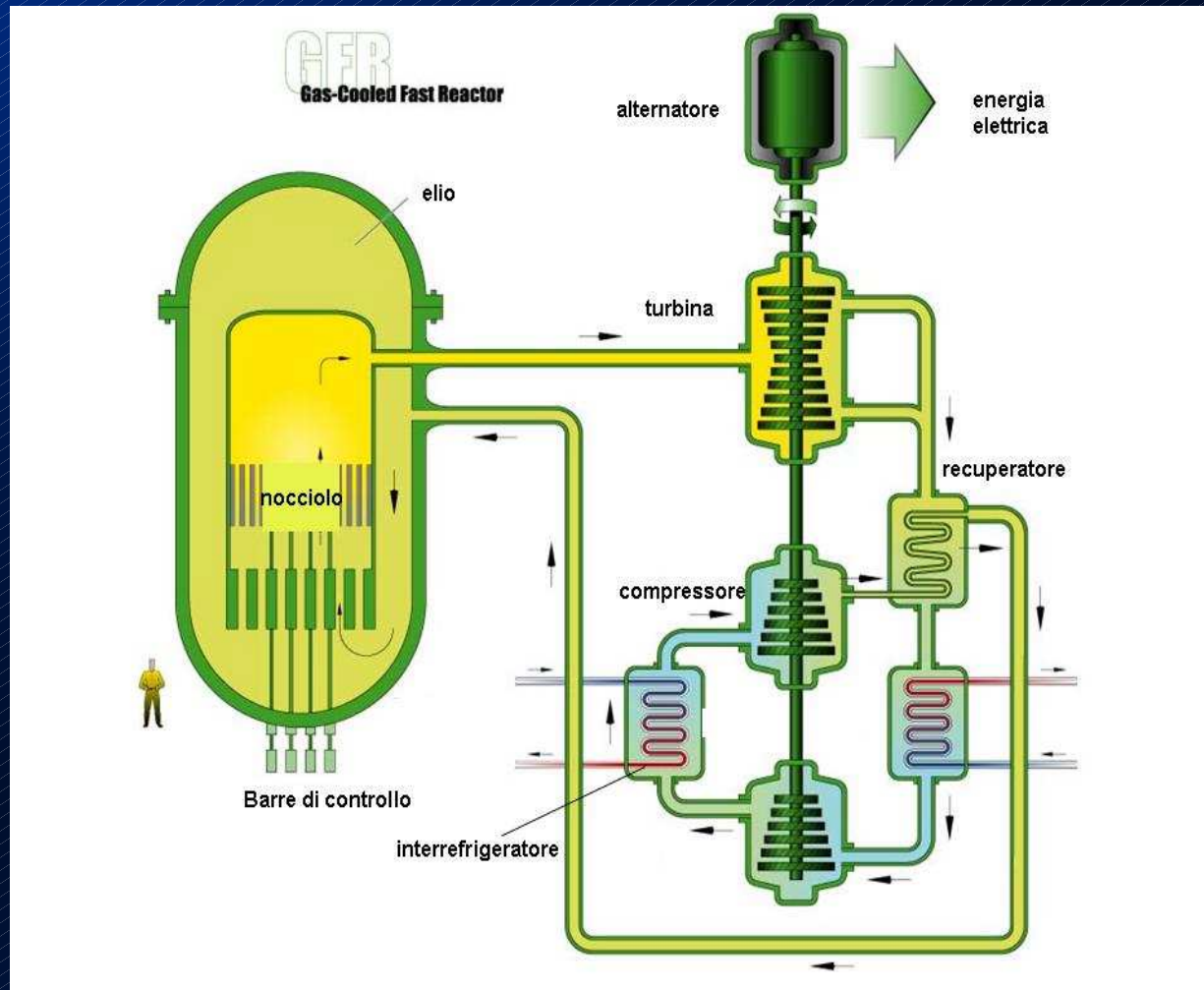
# Impianto tradizionale con turbina a gas



**D=Deposito**

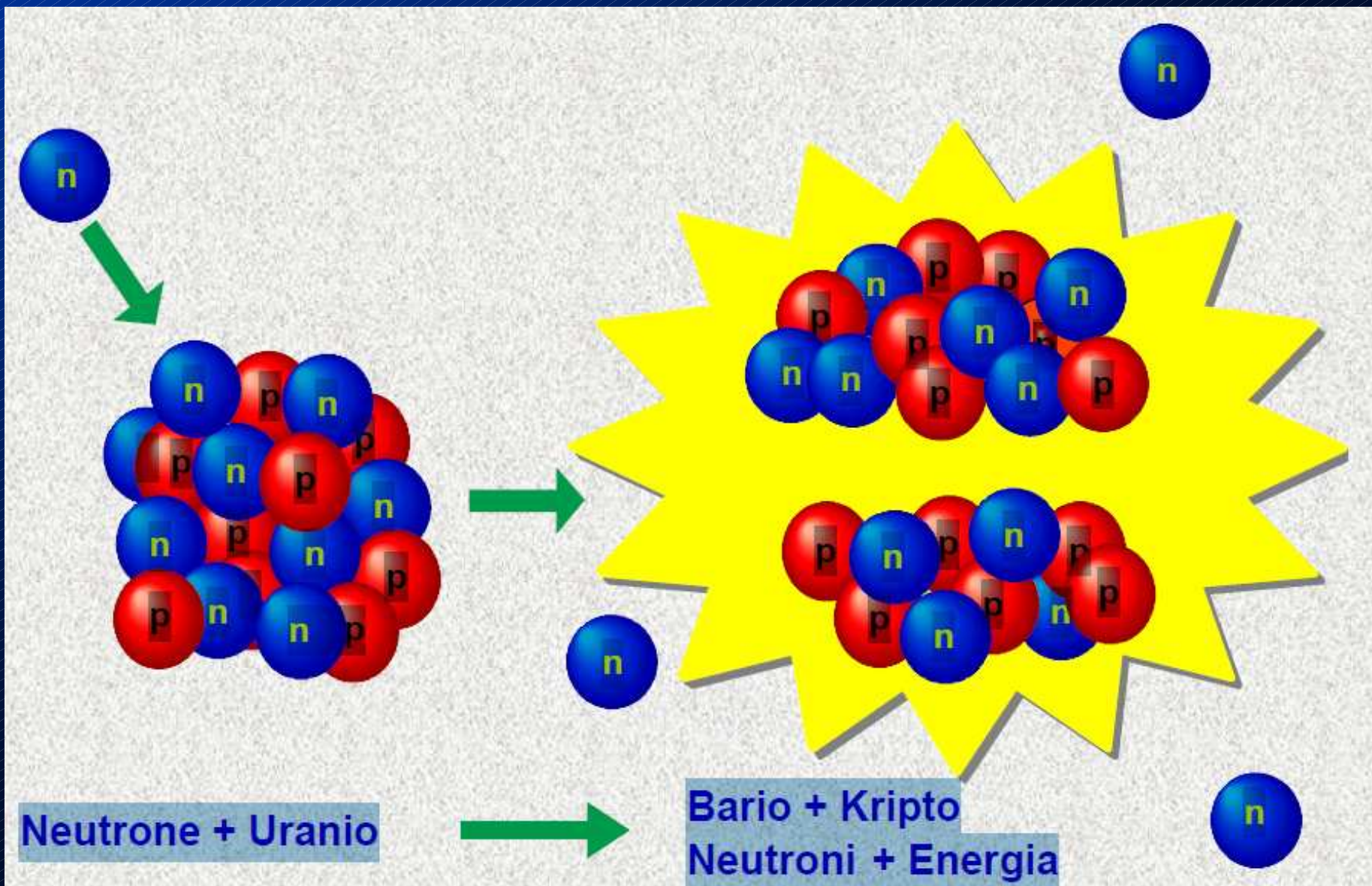
**C=Combustibile**

# Ciclo Brayton-Joule con reattore nucleare



# Come si produce calore in un impianto a fissione nucleare?

Se bombardati con neutroni, alcuni atomi pesanti, per esempio di uranio, manifestano una certa tendenza a spaccarsi, originando atomi più leggeri, altre particelle nucleari (principalmente neutroni) e calore. Si può verificare che la somma delle masse dei frammenti (atomi+particelle) è sempre leggermente inferiore alla massa del nucleo prima della scissione. La differenza si è convertita in energia termica liberata verso l'ambiente secondo la nota reazione di Einstein  $E=mc^2$ , dove  $c$  è la velocità della luce ed è pari a 300.000 km/s. Dalla conversione in energia di 1 kg di materiale fissile si generano  $9 \cdot 10^{16}$  J ovvero 90.000 TJ ovvero 25 TWh.



Neutrone + Uranio

Bario + Kripto  
Neutroni + Energia

# Qual è l'energia liberata in una reazione di fissione nucleare?

In un impianto nucleare, il calore addotto proviene dalla fissione di atomi pesanti, tipicamente  $U^{235}$ , secondo il seguente schema generale:



dove  $n_{inc}$  è il neutrone che ha innescato la fissione, X e Y sono gli atomi più leggeri,  $n_{gen}$  sono i neutroni generati dalla fissione, 200 MeV è l'energia generata dalla fissione di un solo atomo di  $U^{235}$ .

In fisica nucleare è più usuale esprimere l'energia in eV che è l'energia posseduta da un elettrone libero quando è spinto da una differenza di potenziale di un volt.

# Caratteristiche della fissione

- L'energia generata in una reazione di fissione è molto maggiore di quella derivante da una di combustione
- La fissione non è deterministica (ovvero automatica), bensì **PROBABILISTICA**
- I prodotti di fissione hanno peso compreso tra 75 e 160 u.m.a.
- Mediamente si generano 2,5 neutroni per ogni atomo di  $U_{235}$  spaccato

# Qual è l'energia liberata da una reazione di combustione?

In un impianto tradizionale, il calore addotto proviene dalla combustione di un combustibile, per esempio metano secondo la seguente reazione:



Volendo esprimere l'energia generata in termini di eV per atomo di CH<sub>4</sub>, occorre considerare che  $1\text{eV}=1,6021 \cdot 10^{-19}\text{J}$  (ovvero  $1\text{J}=6,25 \cdot 10^{18}\text{eV}$ ) e che una mole contiene un numero di Avogadro di atomi ( $N=6,022 \cdot 10^{23}$ ).

Pertanto:



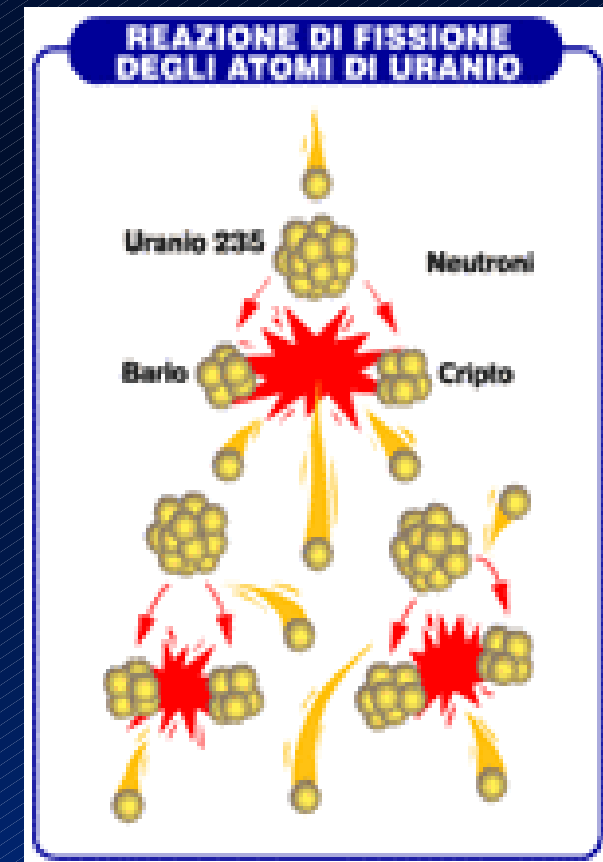
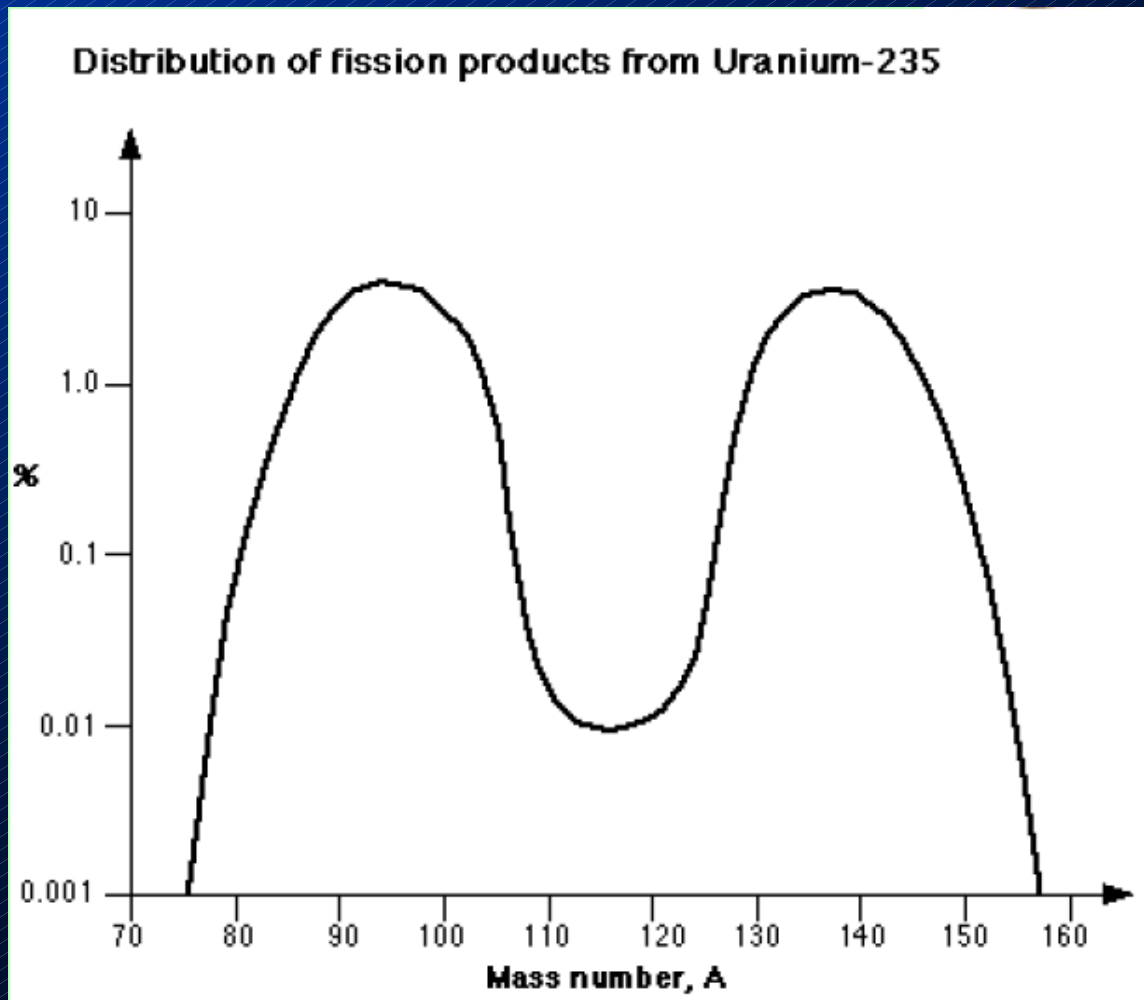
# Perché la fissione è probabilistica?

Perché si inneschi la fissione di un atomo di materiale fissile, deve accadere un neutrone deve colpire un nucleo pesante con energia sufficiente per vincere le forze attrattive nucleari.

Un neutrone "vagante" che colpisce un nucleo pesante può essere assorbito (innescando la reazione), ma anche semplicemente deviato o rallentato per effetto di urti dissipativi.

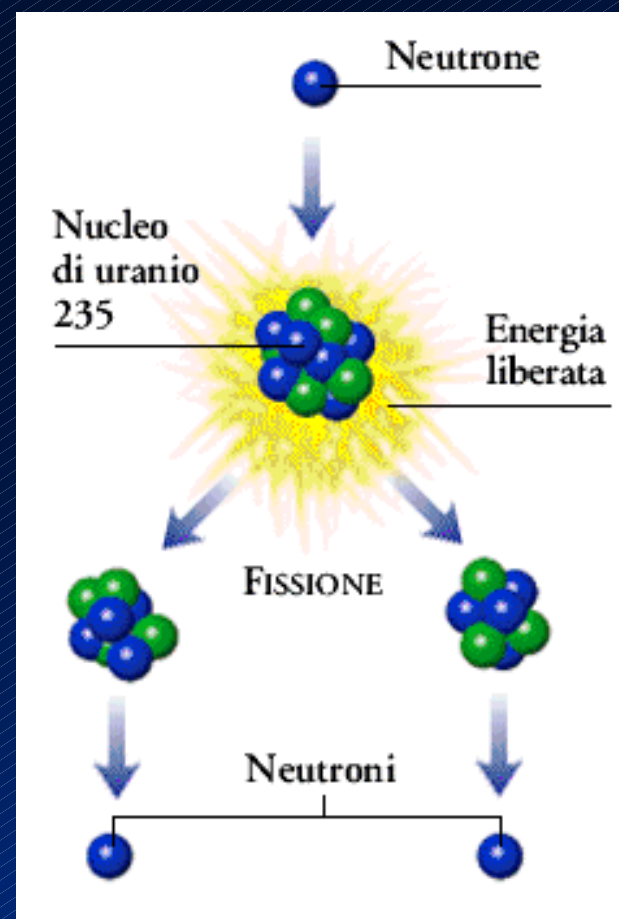
Nel caso di  $U^{235}$  si è visto che rallentando opportunamente la velocità dei neutroni aumentano le probabilità di cattura neutronica. Per questo motivo, il combustibile nucleare nella maggioranza dei casi è immerso in un **moderatore**.

# Un esempio di reazione probabile

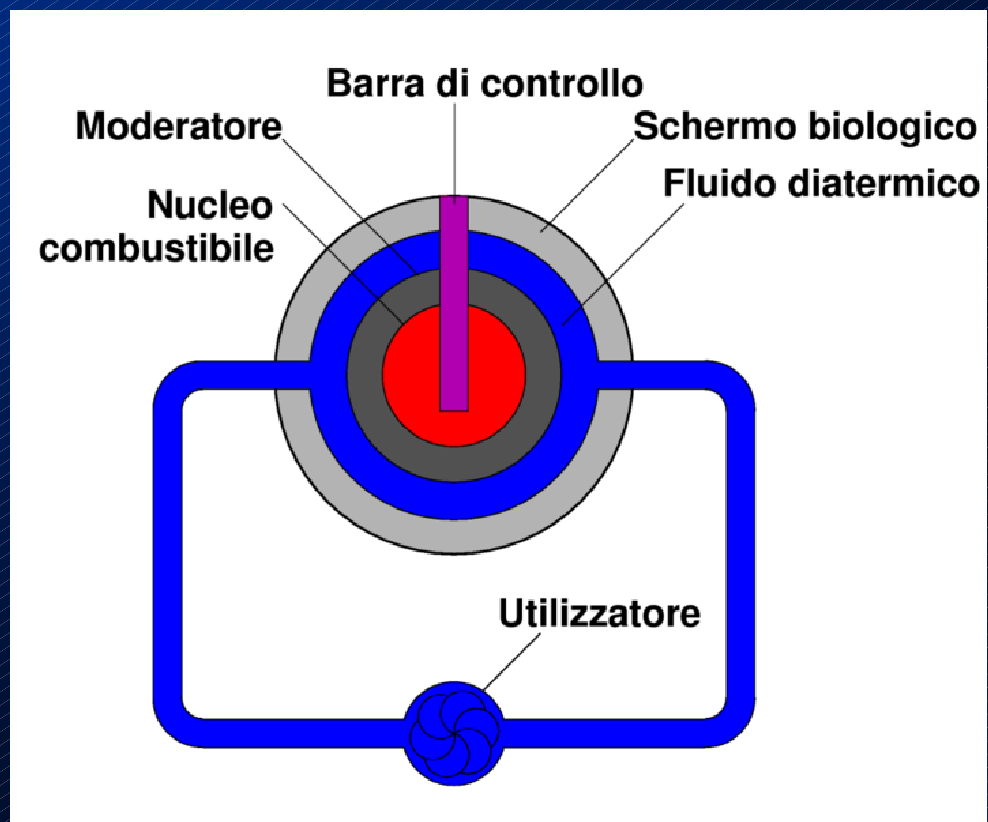


# Come si controlla la reazione?

L'organo di **regolazione** di un reattore nucleare è costituito dalle barre di controllo. Per autoalimentare un processo di fissione nucleare in forma controllata occorre che solo uno dei neutroni generati da una reazione a sua volta ne inneschi un'altra. Diversamente, o il reattore si spegne o la reazione avanza in forma esponenziale (come accade nella bomba atomica).



# Schema sintetico di un reattore nucleare



Le barre di controllo sono capsule di materiale in grado di assorbire neutroni senza dare origine a fissione. Quando occorre diminuire la potenza del reattore si abbassano le barre di controllo per incapsulare maggiormente il combustibile nucleare; diversamente, si alzano le barre di controllo quando occorre incrementare la potenza.

# La radioattività /1

L'energia di legame (ovvero l'energia che occorre somministrare dall'esterno per spaccare un nucleo) è funzione del numero di massa. Con l'aumentare del numero atomico, diminuisce la stabilità degli atomi. Addirittura, nel caso di elementi particolarmente pesanti, gli atomi possono trasformarsi spontaneamente in nuclei più leggeri mediante emissione di energia e rilascio di particelle. Tale processo è detto decadimento radioattivo.

# La radioattività /2

I prodotti di fissione sono generalmente instabili (radioattivi) ovvero tendono spontaneamente a raggiungere uno stato più stabile attraverso l'emissione di una o più particelle (decadimento).

Il momento esatto in cui un atomo instabile decade in uno più stabile è assolutamente casuale; pertanto, al massimo è possibile fare previsioni di carattere statistico. Per esempio, il tempo di dimezzamento o emivita di un radionuclide individua il tempo necessario perché, data una certa quantità, siano decaduti il 50% degli atomi.

La radioattività si misura in decadimenti al secondo; nel SI l'unità di misura è il bequerel (Bq).

# La pericolosità delle scorie radioattive /1

Le scorie di fissione sono generalmente instabili e, dunque, radioattive. In prima analisi, possono essere suddivise in elementi a bassa, media o alta radioattività in funzione del tempo di decadimento.

Le prime decadono in pochi mesi o qualche anno, le seconde fino a qualche secolo, le ultime in decine di migliaia di anni.

# La pericolosità delle scorie radioattive /2

La pericolosità delle scorie, però, non dipende solo dai tempi di decadimento, ma anche dal tipo di attività ovvero da quantità e modi di rilascio di particelle e, quindi, di energia ad esse associate.

La **dose assorbita** è una grandezza fisica che misura la quantità di energia per unità di massa assorbita da un mezzo a seguito di esposizione a radiazioni ionizzanti.

Nel SI, la dose assorbita è misurata in gray (Gy) che rappresenta 1 J di radiazione assorbita da 1 kg di massa.

# Il tipo di emissioni

Nei processi di decadimento sono solitamente rilasciati nell'ambiente circostante neutroni, nonché raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

I raggi  $\alpha$  sono costituiti da nuclei di atomi di elio, i raggi  $\beta$  da un flusso di elettroni ad alta energia, i raggi  $\gamma$  sono radiazioni elettromagnetiche del tipo della luce, ma con lunghezza d'onda molto più piccola.

# I danni biologici /1

Le radiazioni  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , interagiscono profondamente con la materia, provocando una intensa ionizzazione. Questo fenomeno, estremamente accentuato per le particelle  $\alpha$ , meno di tutti per le  $\gamma$ , comporta differenti esiti in caso di interazione di queste particelle con organismi biologici.

Le radiazioni  $\alpha$  sono infatti profondamente dannose perché in grado di indurre mutazioni genetiche nella materia biologica; diversamente, le particelle  $\beta$  e  $\gamma$ , pur maggiormente penetranti, sono meno dannose per gli esseri umani essendo meno ionizzanti.

# I danni biologici /2

Una grandezza fisica più pertinente per misurare il danno biologico e gli effetti su un organismo o un tessuto organico è la **dose equivalente**. Rispetto alla dose assorbita, che fornisce misure assolute, la dose equivalente valuta gli effetti biologici della radiazione sull'organismo.

In generale, la dose equivalente  $H$  è proporzionale alla dose assorbita  $A$  attraverso un fattore  $w_r$

$$H = A w_r$$

dove  $w_r$  è pari a 1 per raggi  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , a 20 per i raggi  $\alpha$ , mentre è compresa tra 3 e 11 per fasci di neutroni.

# I danni biologici /3

La dose equivalente si misura in sievert (Sv) o più comunemente in mSv. Un sievert a differenza di un gray (Gy) produce gli stessi effetti biologici indipendentemente dal tipo di radiazione considerata.

E' possibile anche definire **l'intensità di dose equivalente** che rappresenta la dose equivalente nell'unità di tempo e si misura in Sv/s o, più comunemente, in mSv/h. L'intensità di dose equivalente è importante per mettere in relazione il danno biologico e le singole capacità di riparazione del danno da parte degli organismi.

# Dosi equivalenti tipiche

Causa dell'assorbimento	dose equivalente
Fondo naturale di radiazione (media)	2,4 mSv/anno
Massima dose di fondo naturale (Ramsar valore medio)	10,2 mSv/anno
Radiografia convenzionale	< 1 mSv
Tomografia Assiale Computerizzata (TAC)	2-15 mSv
PET, tomografia ad emissione di positroni	10- 20 mSv
Scintigrafia	10- 20 mSv
Radioterapia	10- 40 mSv

# Limiti biologici

Dose equivalente	Effetti biologici
1.000 mSv	Alterazioni temporanee dell'emoglobina
2.000-5.000 mSv	Nausea, perdita dei capelli, emorragie
4.000 mSv	Morte nel 50% dei casi
6.000 mSv	Sopravvivenza improbabile

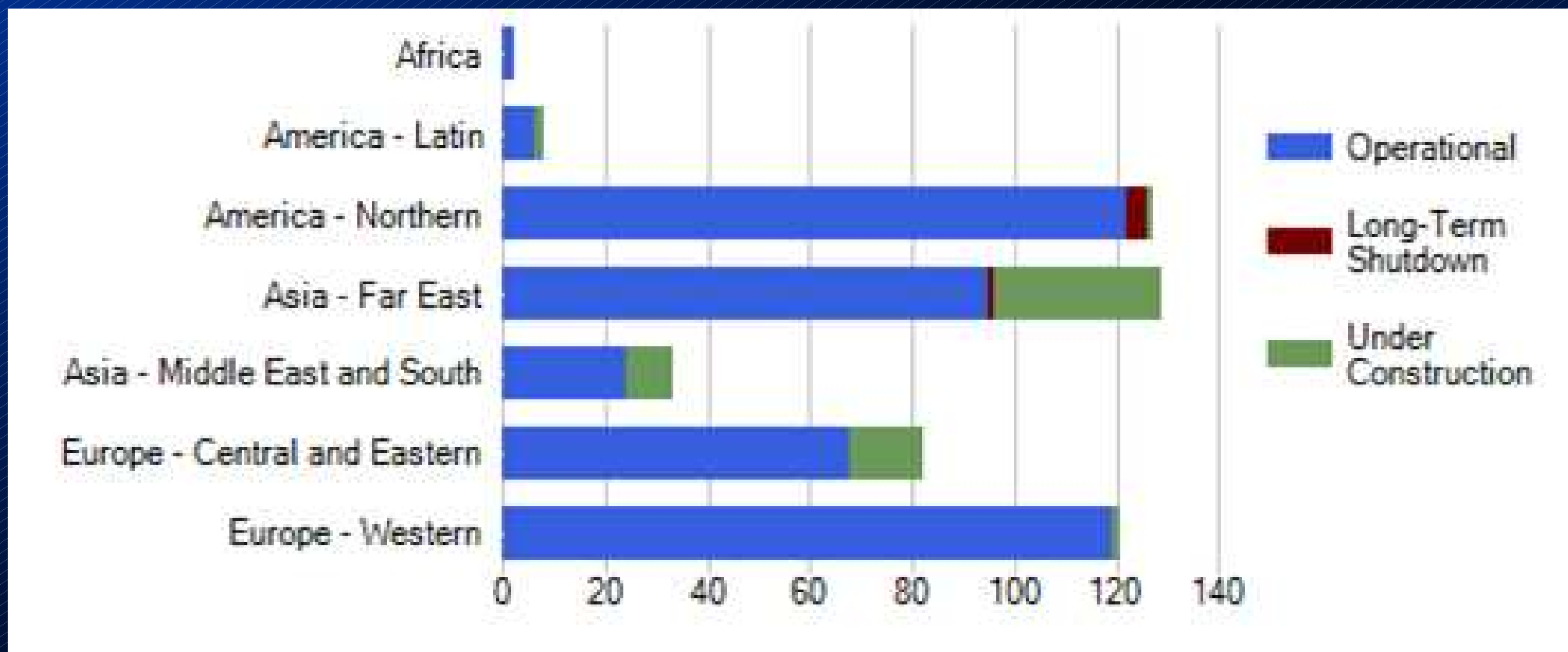
# Reattori nel mondo

I reattori **operativi** al 16-04-2012 erano **436** (436 nel marzo del 2009, 438 nell'aprile del 2010, 444 in maggio 2011) con una potenza elettrica cumulata di 370 GW (370 nel marzo del 2009, 372 GW nell'aprile del 2010, 376 GW in maggio 2011).

Gli impianti operativi in USA, Francia e Giappone sono 212 (erano 216 nel 2009, 2010 e 2011).

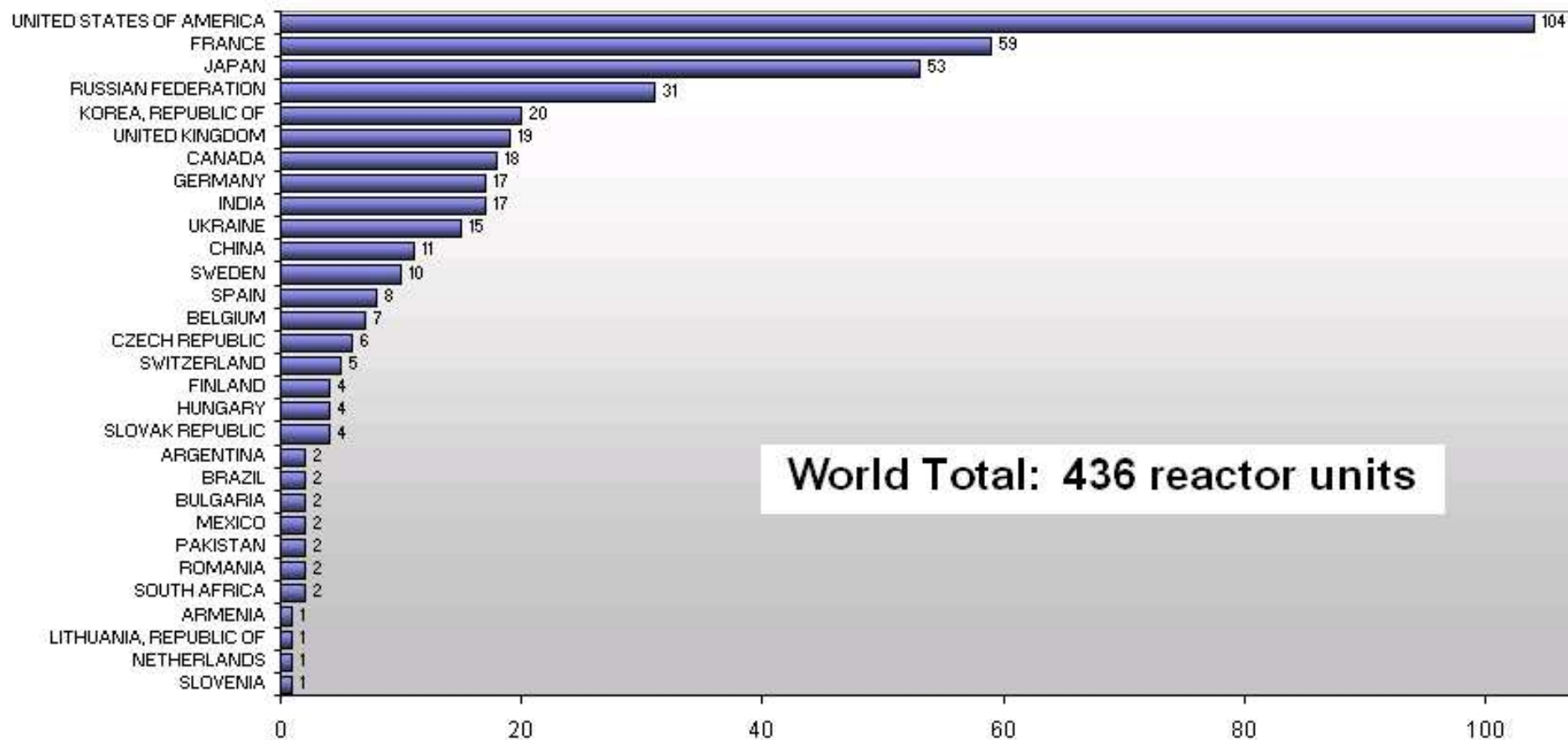
Alla data del 16-04-2012 i reattori **in costruzione** erano **61** con una potenza elettrica cumulata di 58 GW. Di questi ben 36 (22 nel 2009, 31 nel 2010, 37 nel 2011) sono in costruzione in Cina, India e Corea del Sud.

# Distribuzione nel mondo

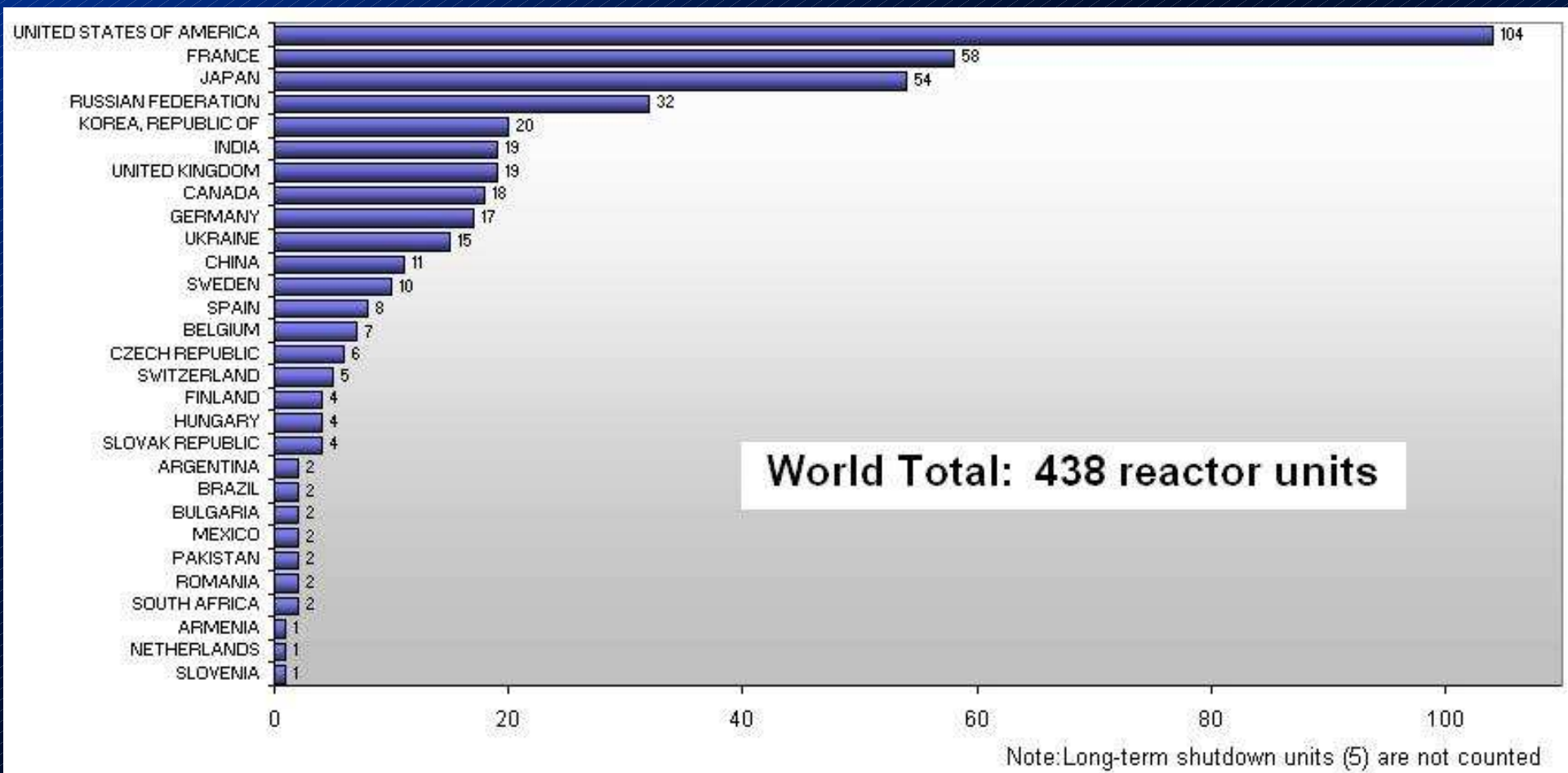


Aggiornamento al 16/04/2012

# Reattori funzionanti 2009

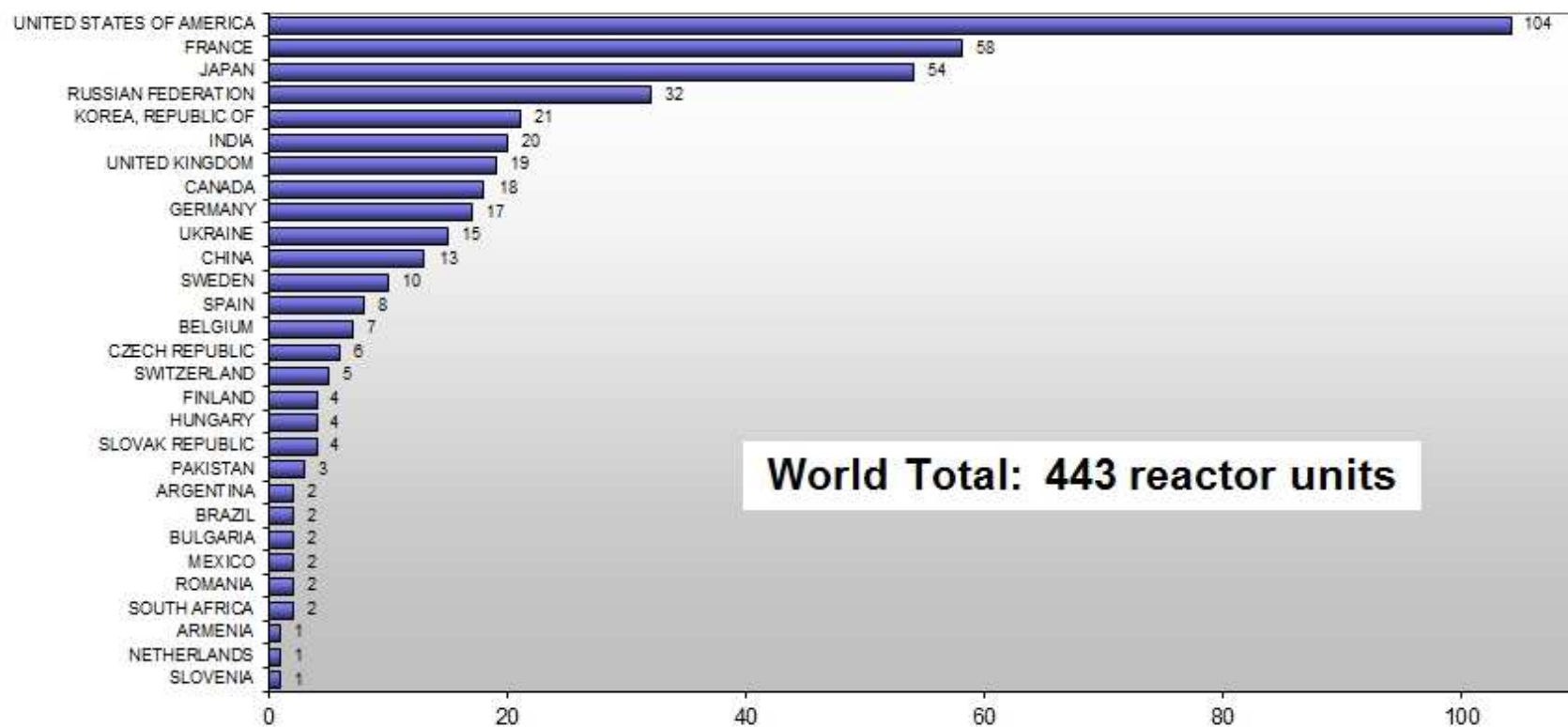


# Reattori funzionanti 2010



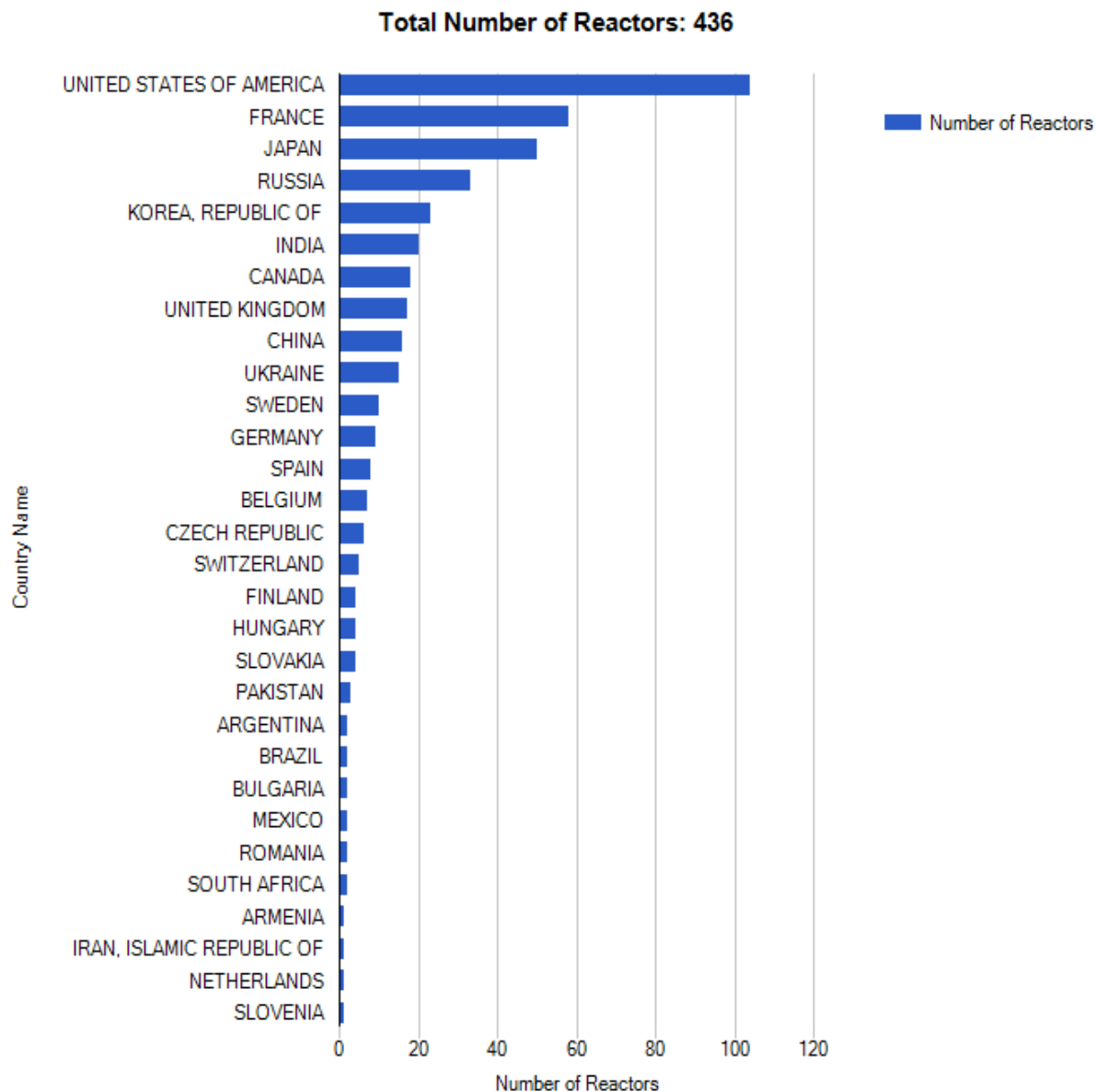
# Reattori funzionanti 2011

## Number of Reactors in Operation Worldwide

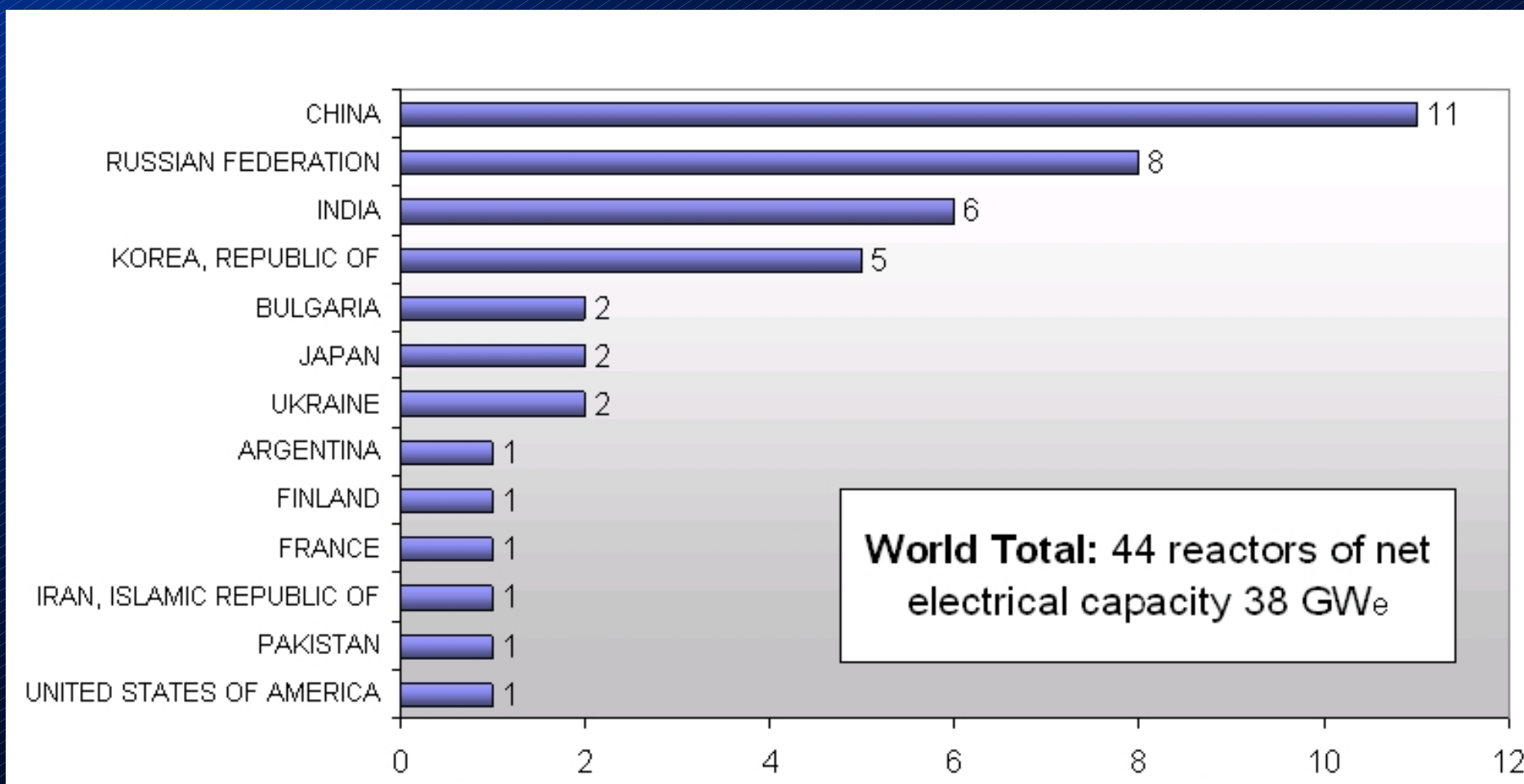


World Total: 443 reactor units

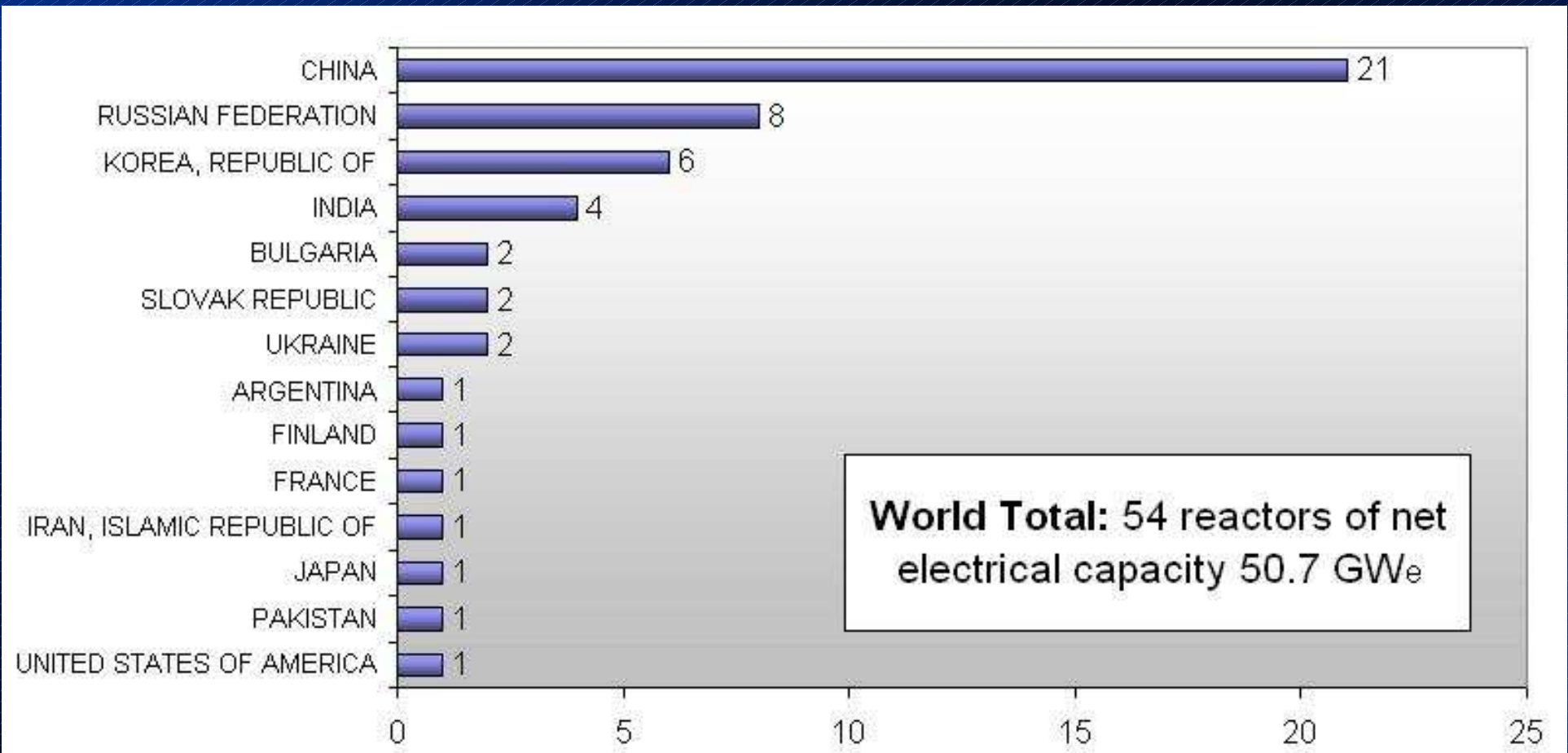
# Reattori in esercizio nel 2012



# Reattori in costruzione 2009

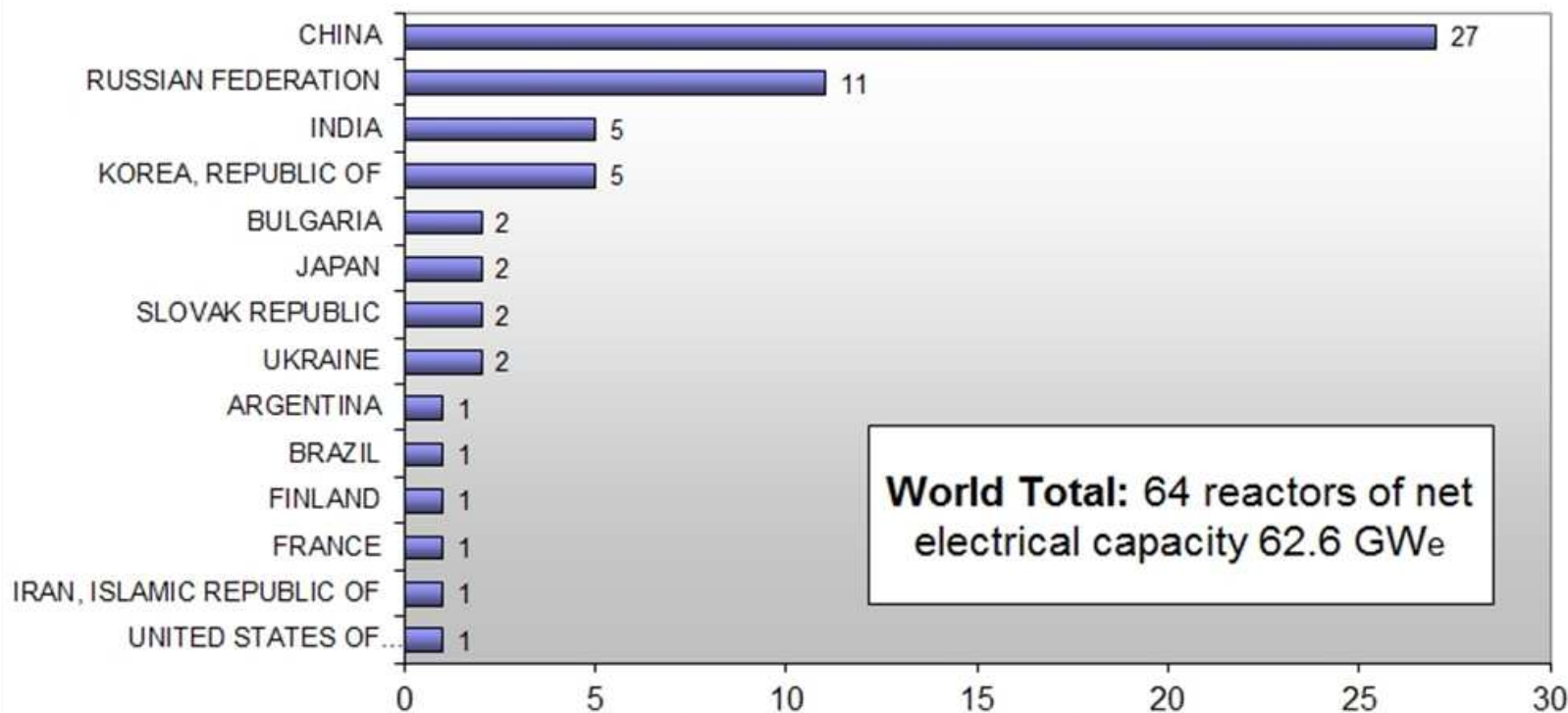


# Reattori in costruzione 2010



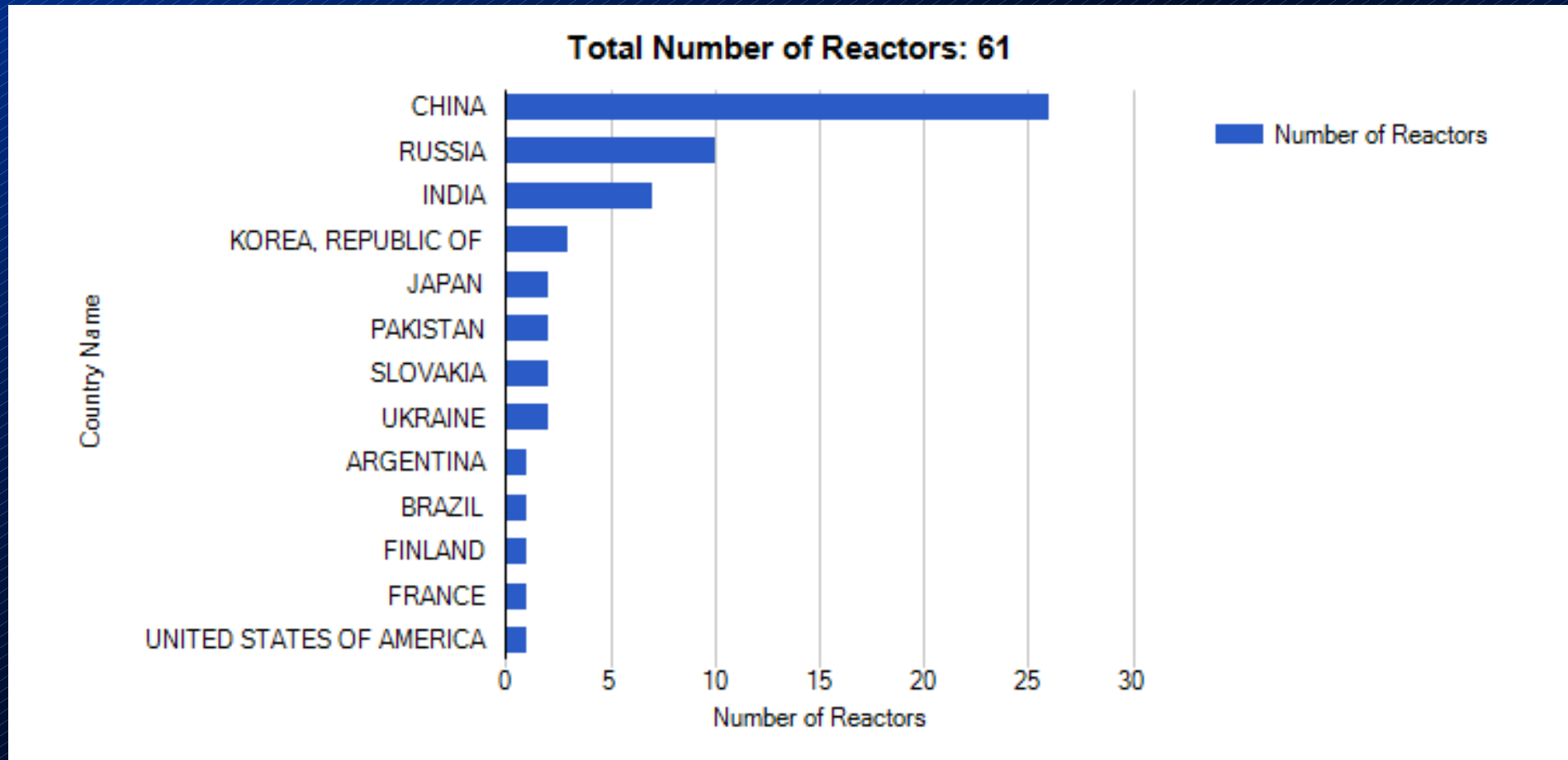
# Reattori in costruzione 2011

## Number of Reactors under Construction Worldwide

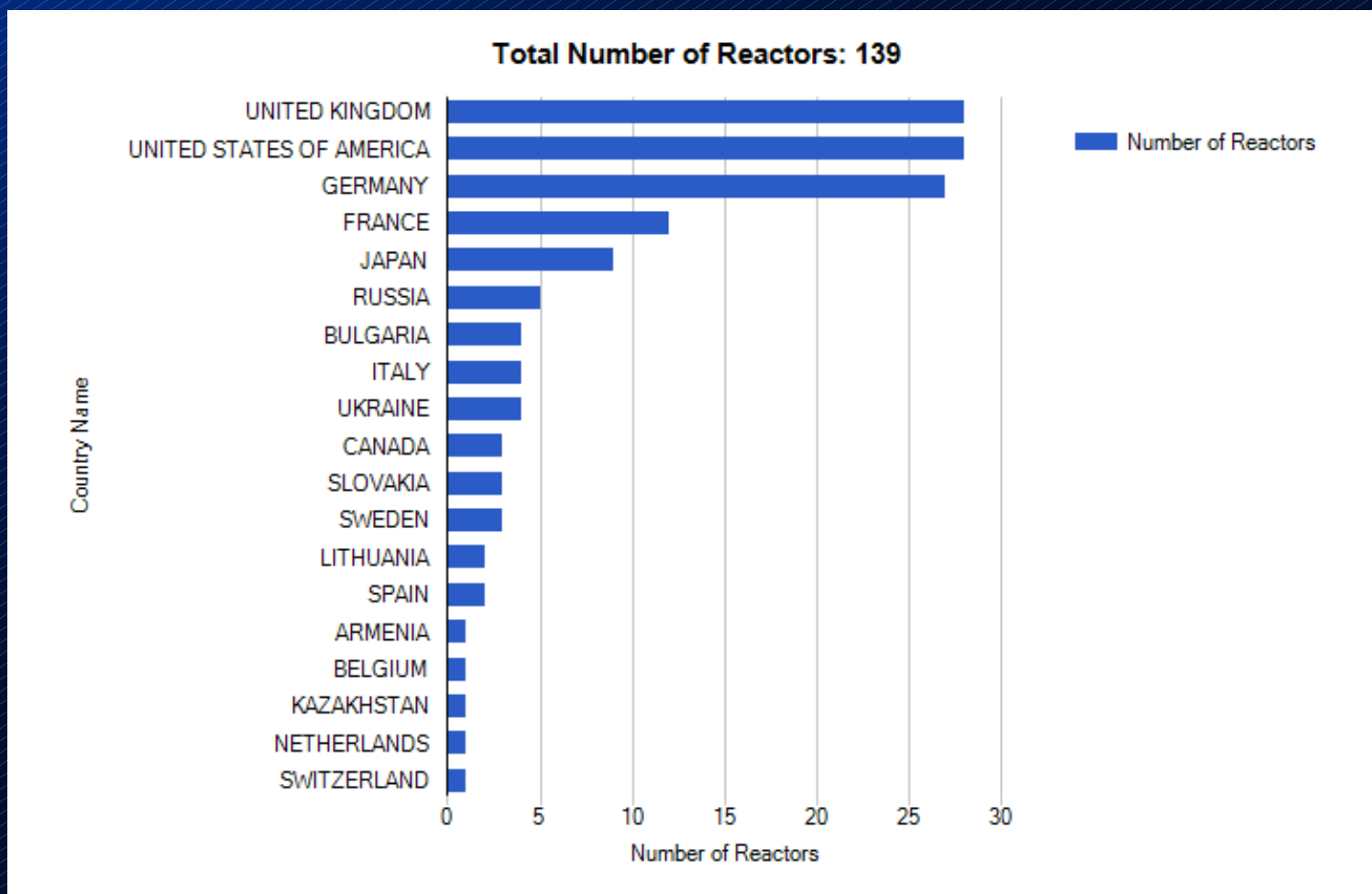


Note: The World Total includes also 2 reactors under construction in Taiwan, China.

# Reattori in costruzione 2012

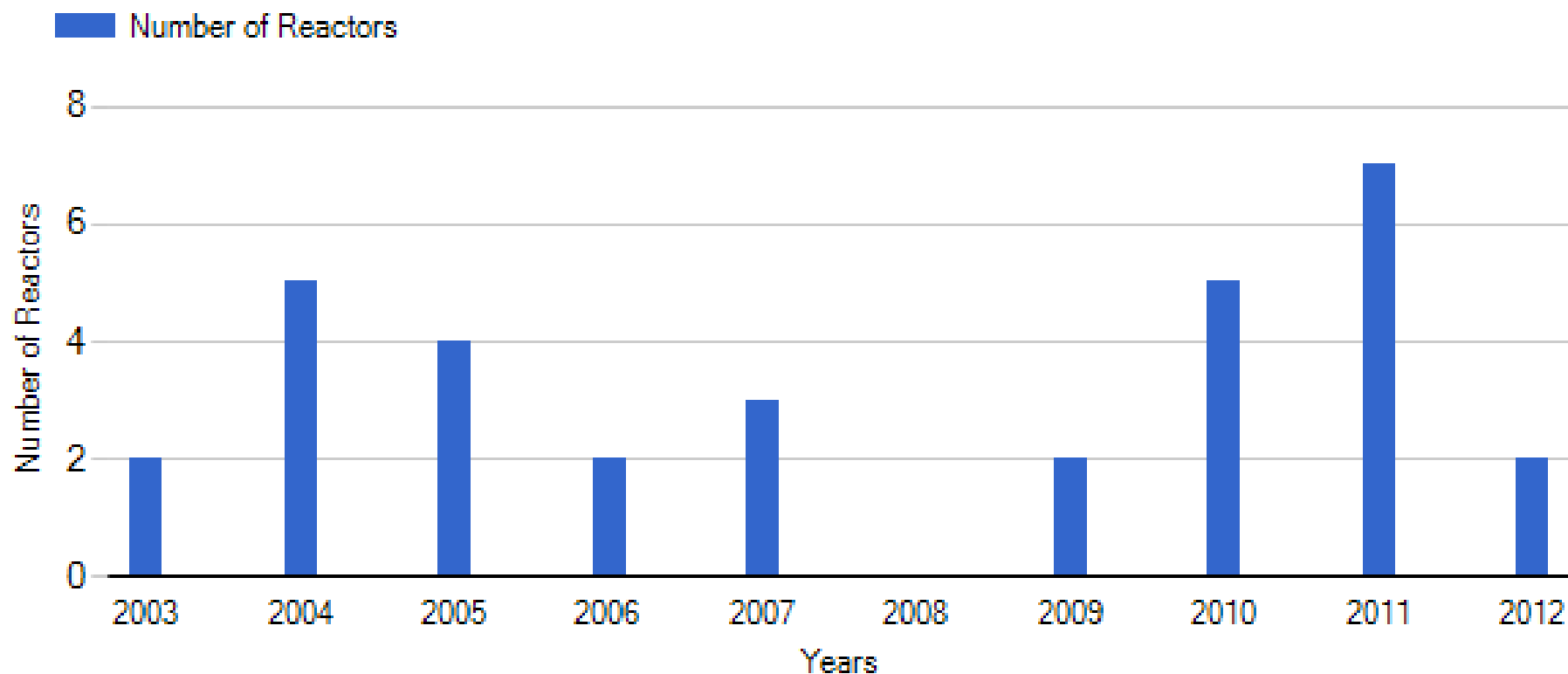


# Reattori in dismissione



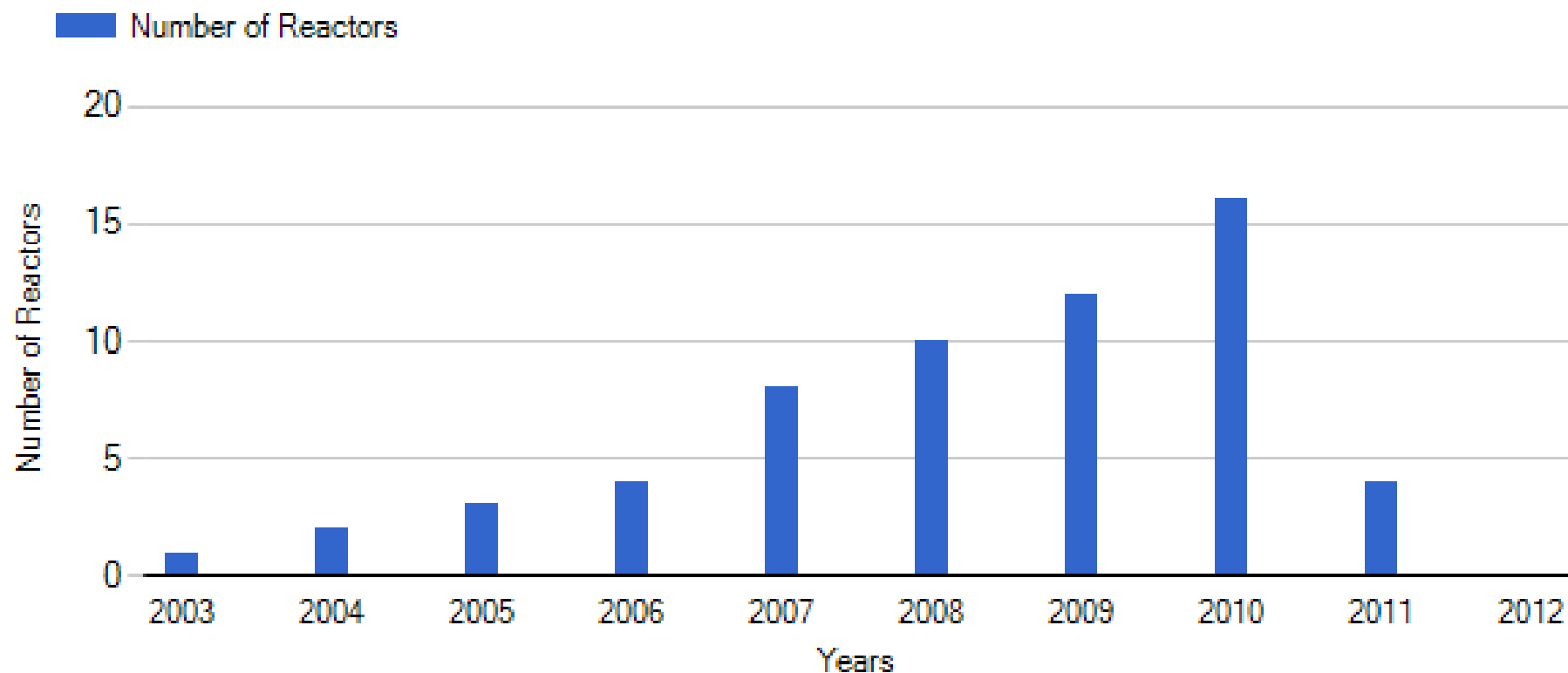
# Storico immissioni in esercizio

Trend of First Grid Connections



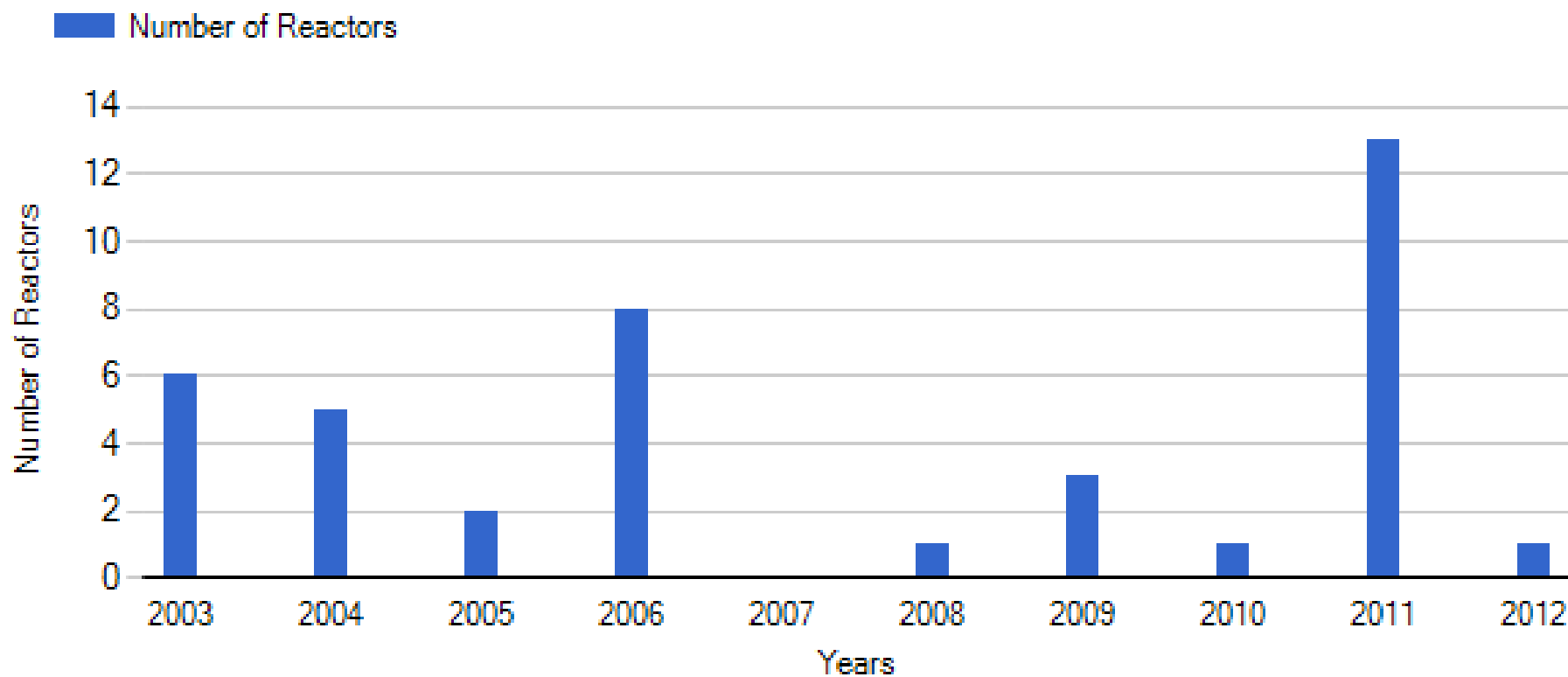
# Storico nuove realizzazioni

Trend of Construction Starts



# Storico dismissioni

Trend of Permanent Shutdowns



# Dati 2011 USA



United States of America



## SUMMARY

### Nuclear Power Reactors

Under Construction

**1**

Operational

**104**

Long-Term Shutdown

**0**

Permanent Shutdown

**28**

### Annual Electrical Power Production

Total Electricity Production (including Nuclear)

**4105734.00 GW.h**

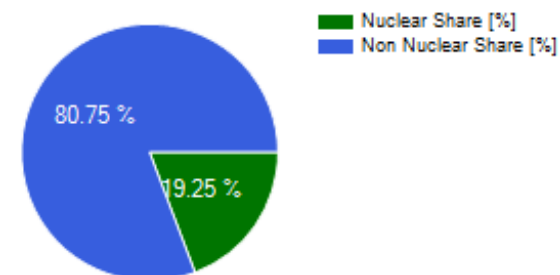
(Net, 2011)

Nuclear Electricity Production

**790225.00 GW.h**

(Net, 2011)

### Electricity Production Share in 2011



# EE da nucleare = 19,25%

# Dati 2011 Francia



## SUMMARY

### Nuclear Power Reactors

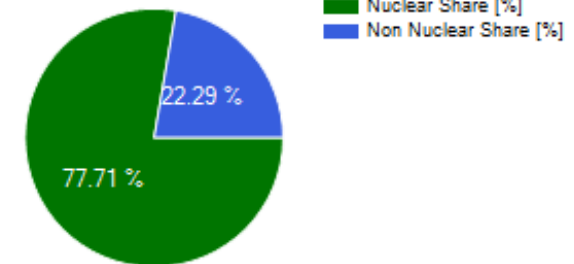
Under Construction	Operational	Long-Term Shutdown	Permanent Shutdown
1	58	0	12

### Annual Electrical Power Production

Total Electricity Production (including Nuclear)  
**541900.00 GW.h**  
(Net, 2011)

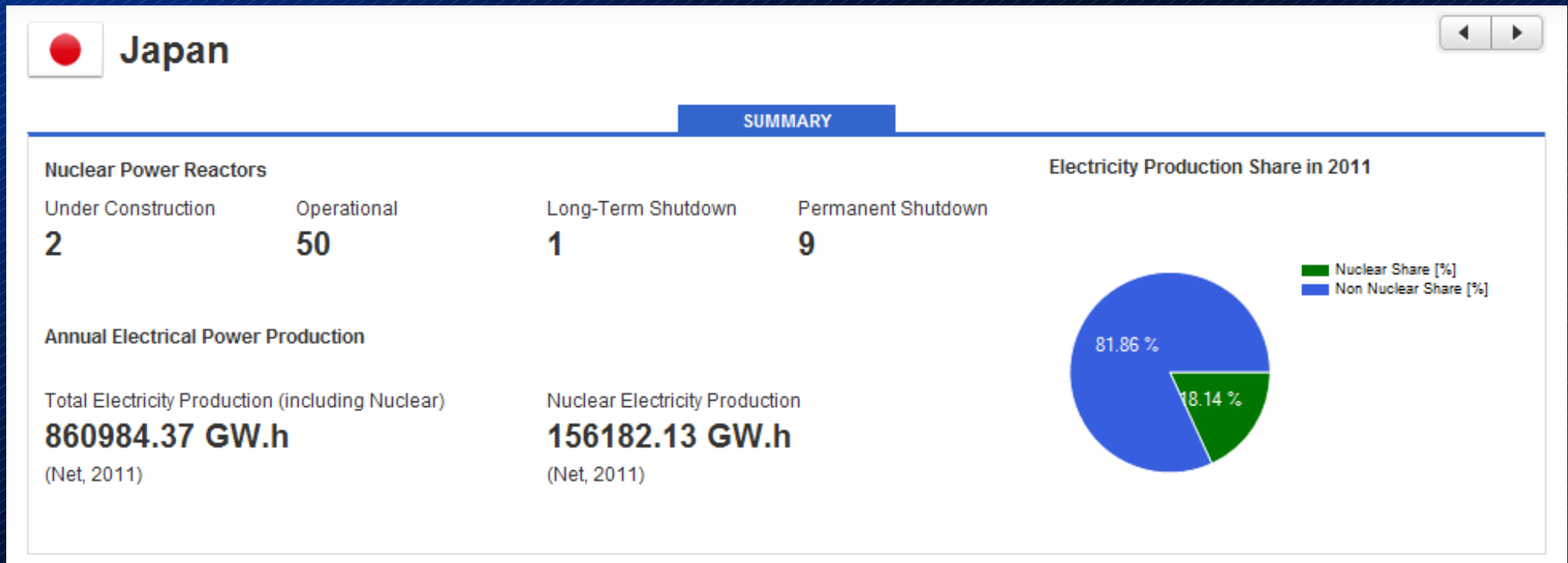
Nuclear Electricity Production  
**421100.00 GW.h**  
(Net, 2011)

### Electricity Production Share in 2011



# EE da nucleare = 77,71%

# Dati 2011 Giappone



**EE da nucleare = 18,14%**

# Dati 2011 Cina



China, People's Republic of

## SUMMARY

### Nuclear Power Reactors

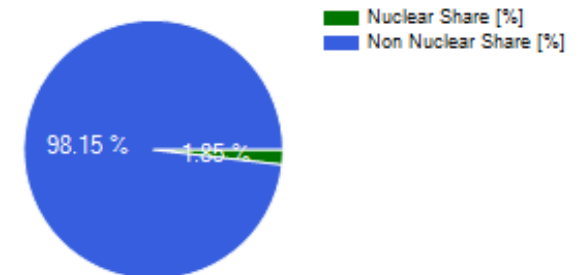
Under Construction	Operational	Long-Term Shutdown	Permanent Shutdown
26	16	0	0

### Annual Electrical Power Production

Total Electricity Production (including Nuclear)  
**4721700.00 GW.h**  
(Gross, 2011)

Nuclear Electricity Production  
**87400.00 GW.h**  
(Gross, 2011)

### Electricity Production Share in 2011



# EE da nucleare = 1,85%

# Dati 2011 Russia



Russian Federation

## SUMMARY

### Nuclear Power Reactors

Under Construction

**10**

Operational

**33**

Long-Term Shutdown

**0**

Permanent Shutdown

**5**

### Electricity Production Share in 2011

### Annual Electrical Power Production

Total Electricity Production (including Nuclear)

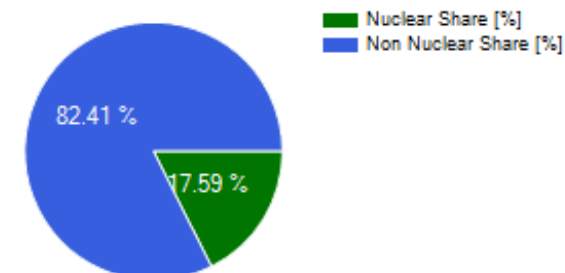
**919400.00 GW.h**

(Net, 2011)

Nuclear Electricity Production

**161708.80 GW.h**

(Net, 2011)



# EE da nucleare = 17,59%

# Dati 2011 India



India

## SUMMARY

### Nuclear Power Reactors

Under Construction

7

Operational

20

Long-Term Shutdown

0

Permanent Shutdown

0

### Electricity Production Share in 2011

### Annual Electrical Power Production

Total Electricity Production (including Nuclear)

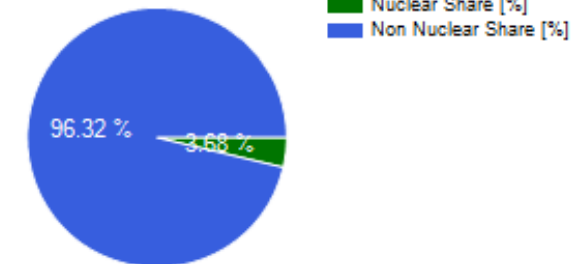
**785940.93 GW.h**

(Net, 2011)

Nuclear Electricity Production

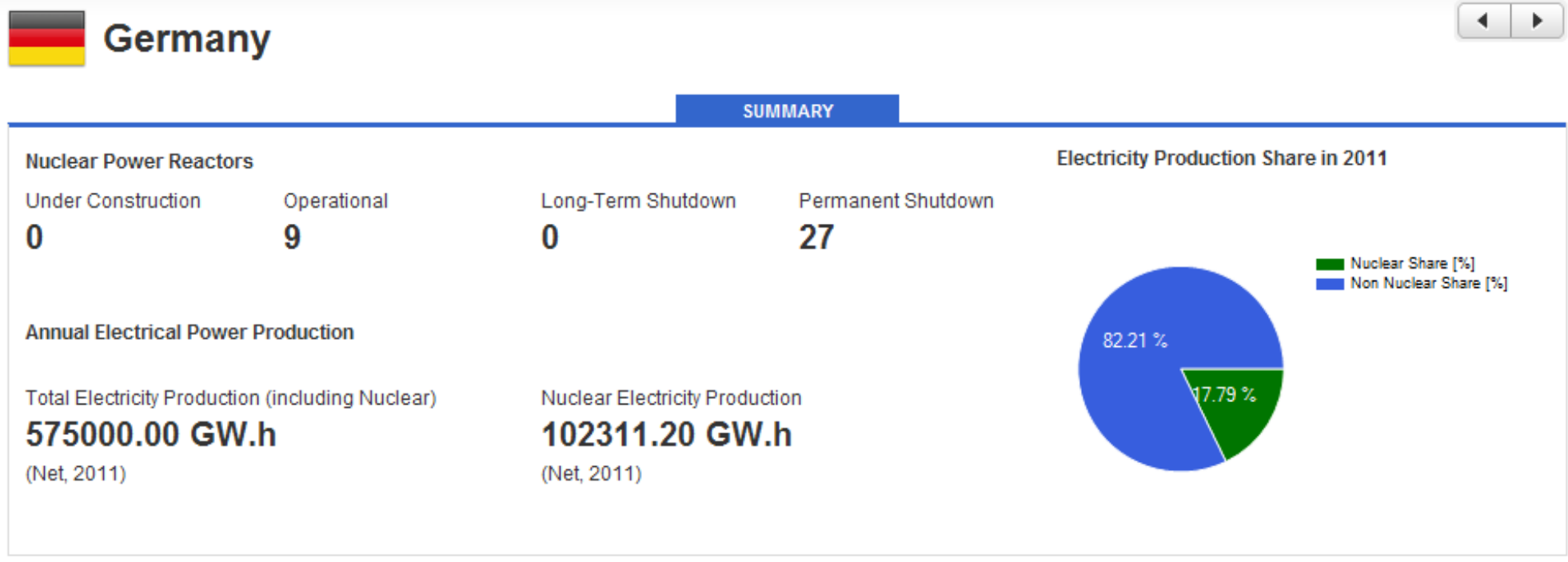
**28947.78 GW.h**

(Net, 2011)



# EE da nucleare = 3,68%

# Dati 2011 Germania



**EE da nucleare = 17,79%**

# Classificazione degli impianti

Gli impianti nucleari sono classificabili per:

- Combustibile (uranio, plutonio, torio nelle varie forme)
- Refrigerante (acqua, CO<sub>2</sub>, elio, sali fusi, sodio)
- Moderatore (H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O, elio, grafite)

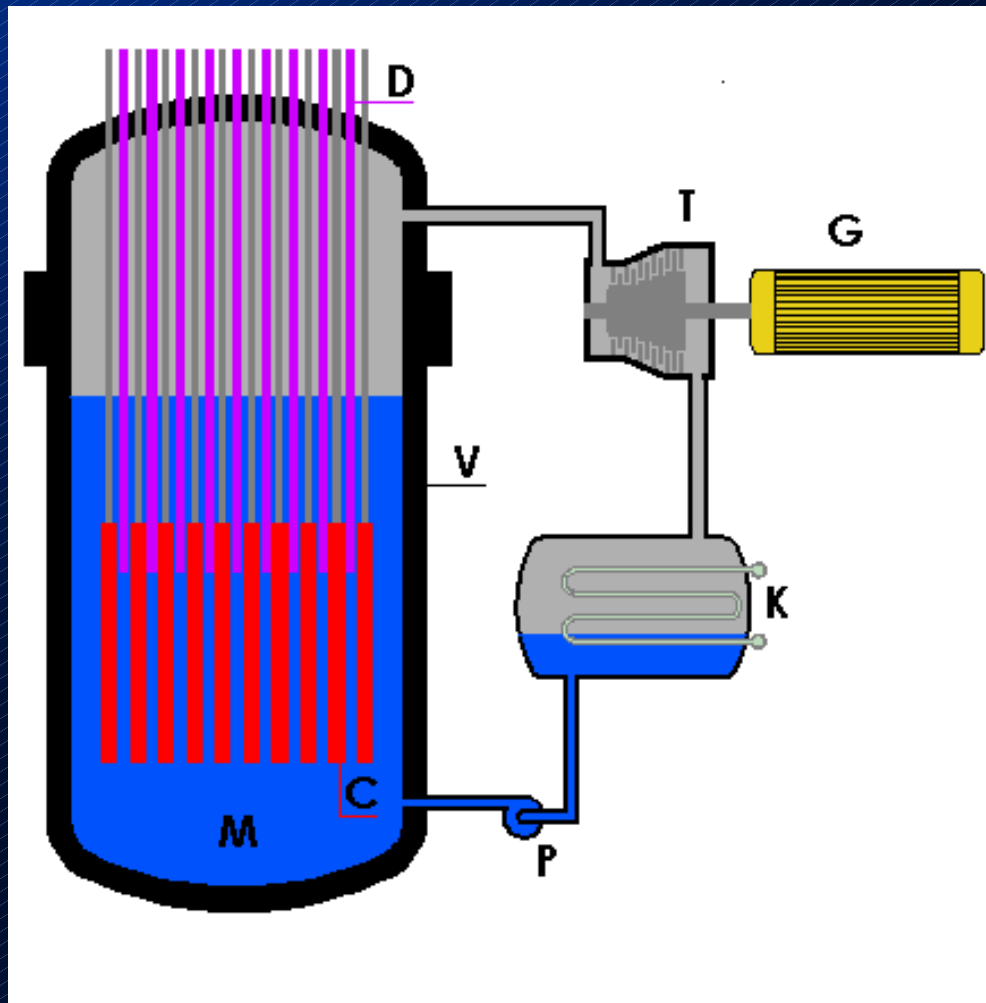
# Gli impianti BWR e PWR

Storicamente i primi impianti nucleari erano del tipo BWR (*Boiling Water Reactor*) ovvero "reattori ad acqua bollente". In questa tipologia di reattori il fluido refrigerante è acqua che, dopo essere stata vaporizzata nel reattore, viene inviata direttamente in turbina per l'espansione.

Gli impianti nucleari più diffusi al mondo sono i PWR (*Pressurized Water Reactor*) ovvero "reattori ad acqua pressurizzata". In questo caso, il fluido refrigerante è acqua in pressione che viene inviata ad uno scambiatore di calore dal lato caldo; il fluido freddo è, invece, ancora acqua, che, però, essendo a minor pressione, vaporizza e viene inviata in turbina per l'espansione.

Attualmente solo in Usa, Francia e Giappone sono operativi 150 PWR. Nel mondo sono ben oltre i 200.

# Schema impianto BWR

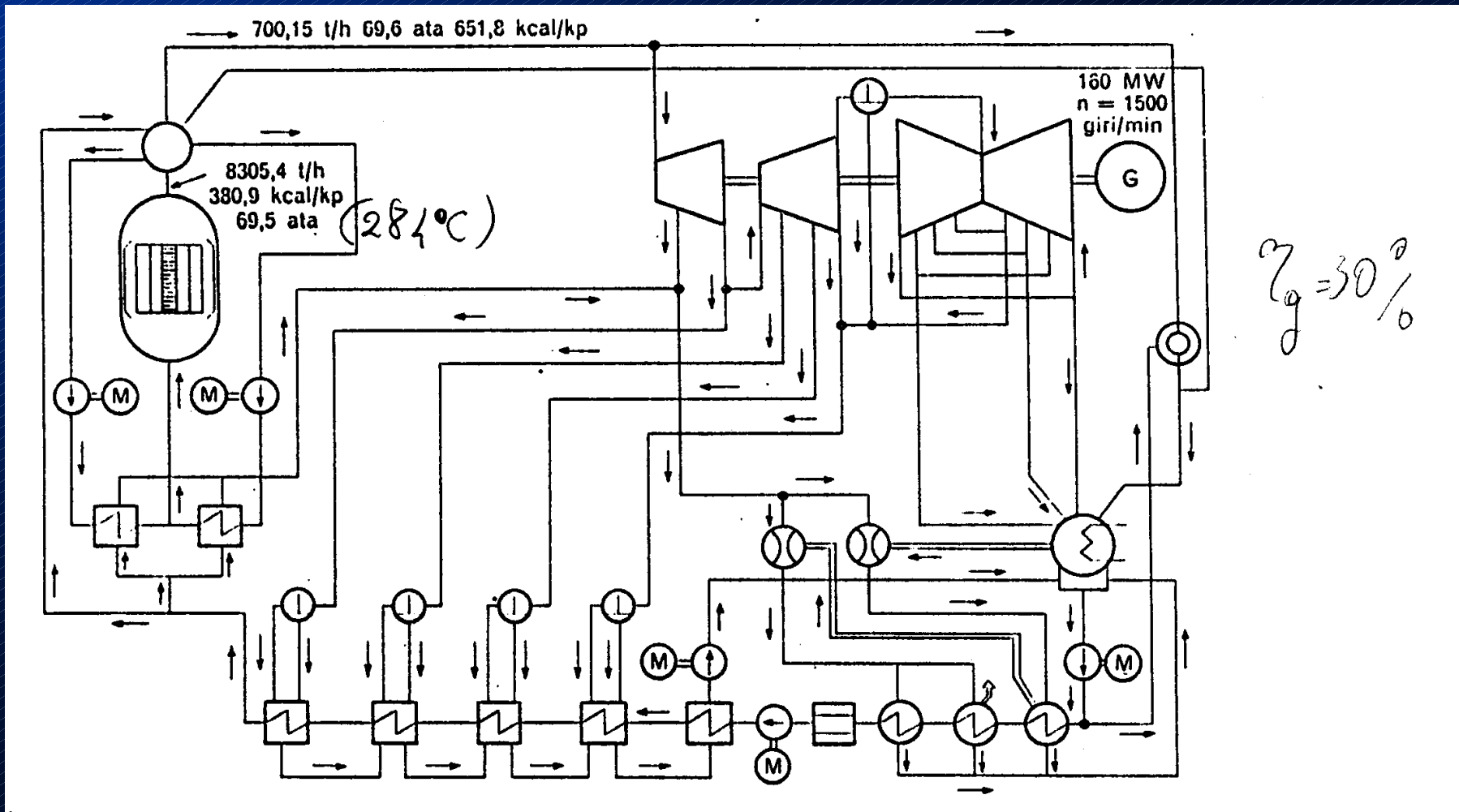


***B=Boiling***

***W=Water***

***R=Reactor***

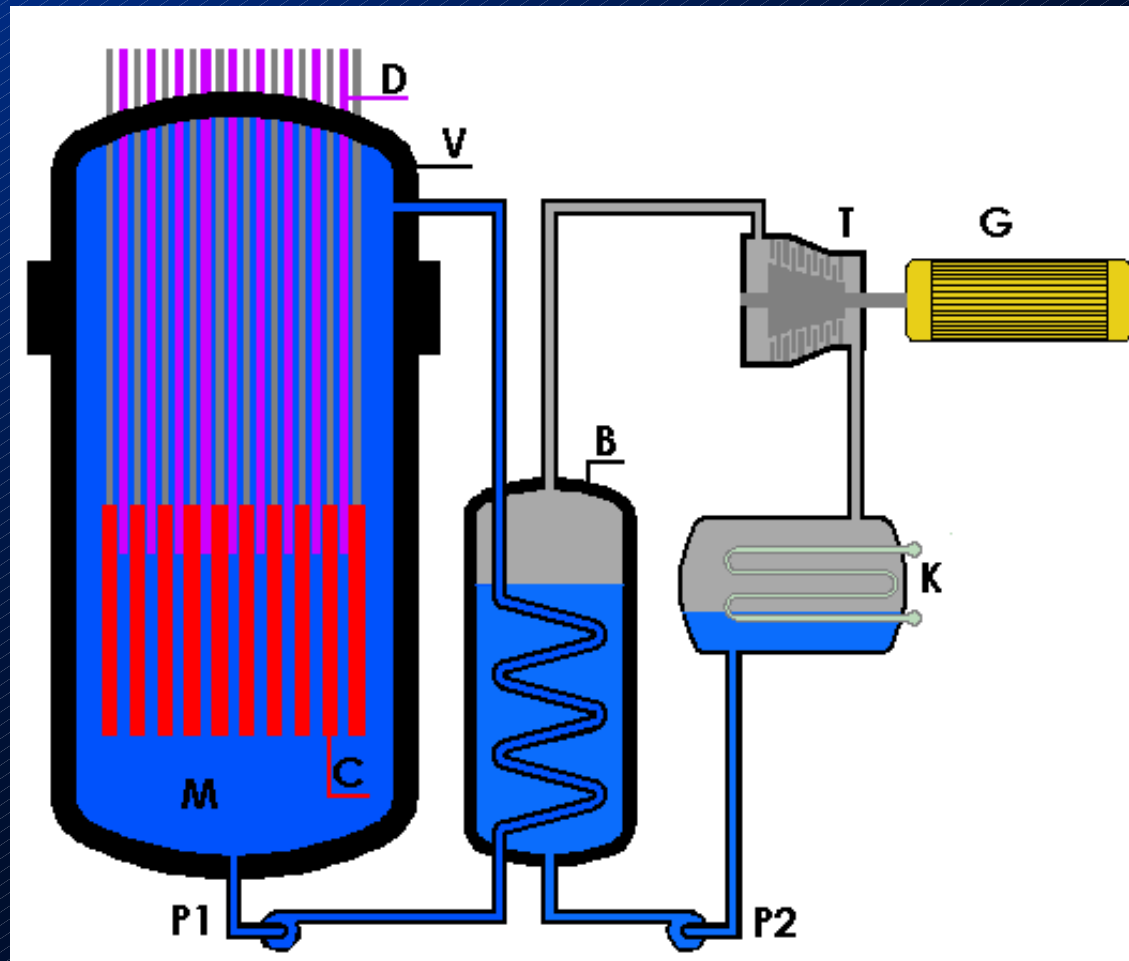
# Centrale del Garigliano (1962, BWR)



$\eta_g = 30\%$



# Schema impianto PWR

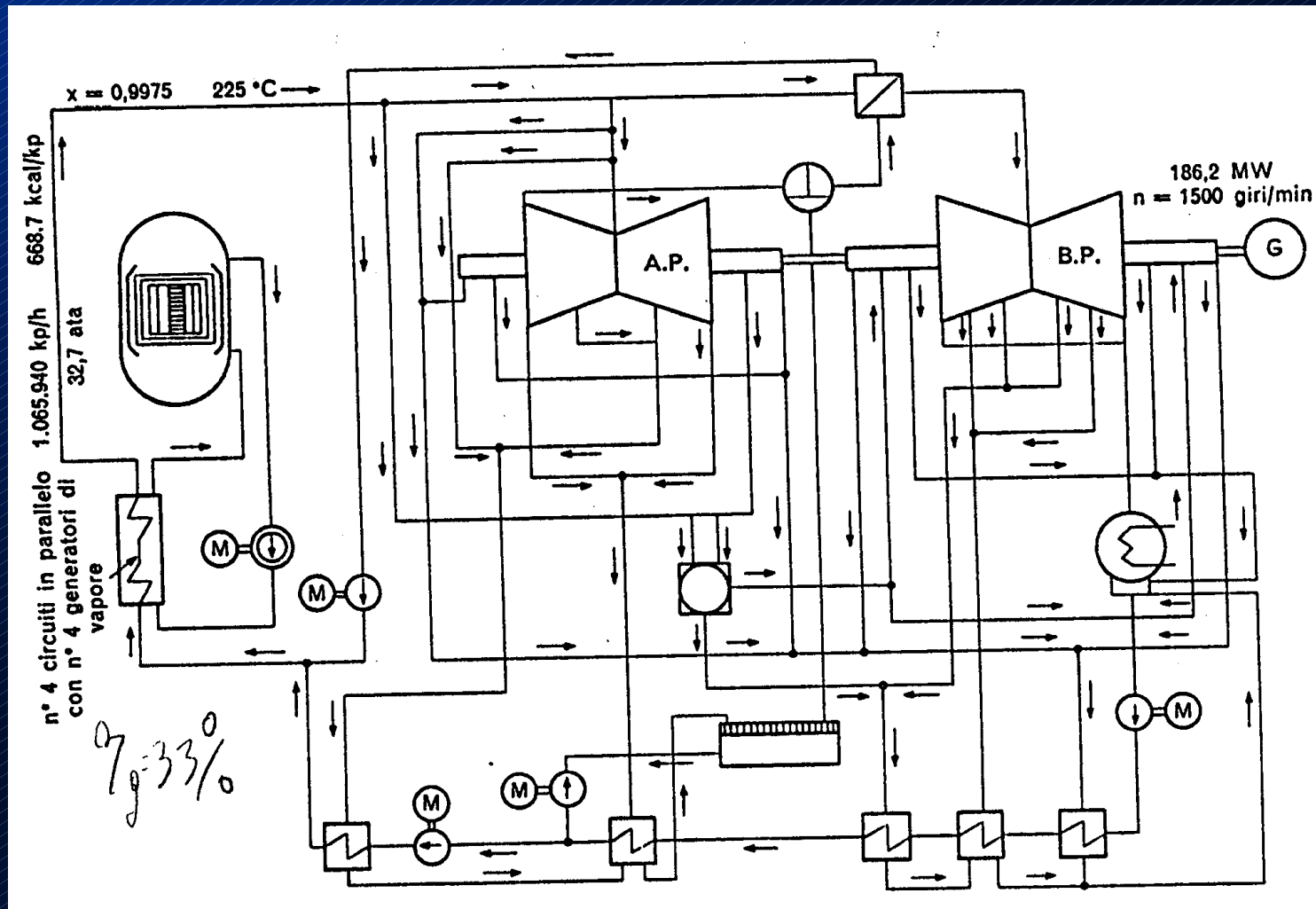


***P=Pressurized***

***W=Water***

***R=Reactor***

# Centrale di Trino Vercellese (1964, PWR)



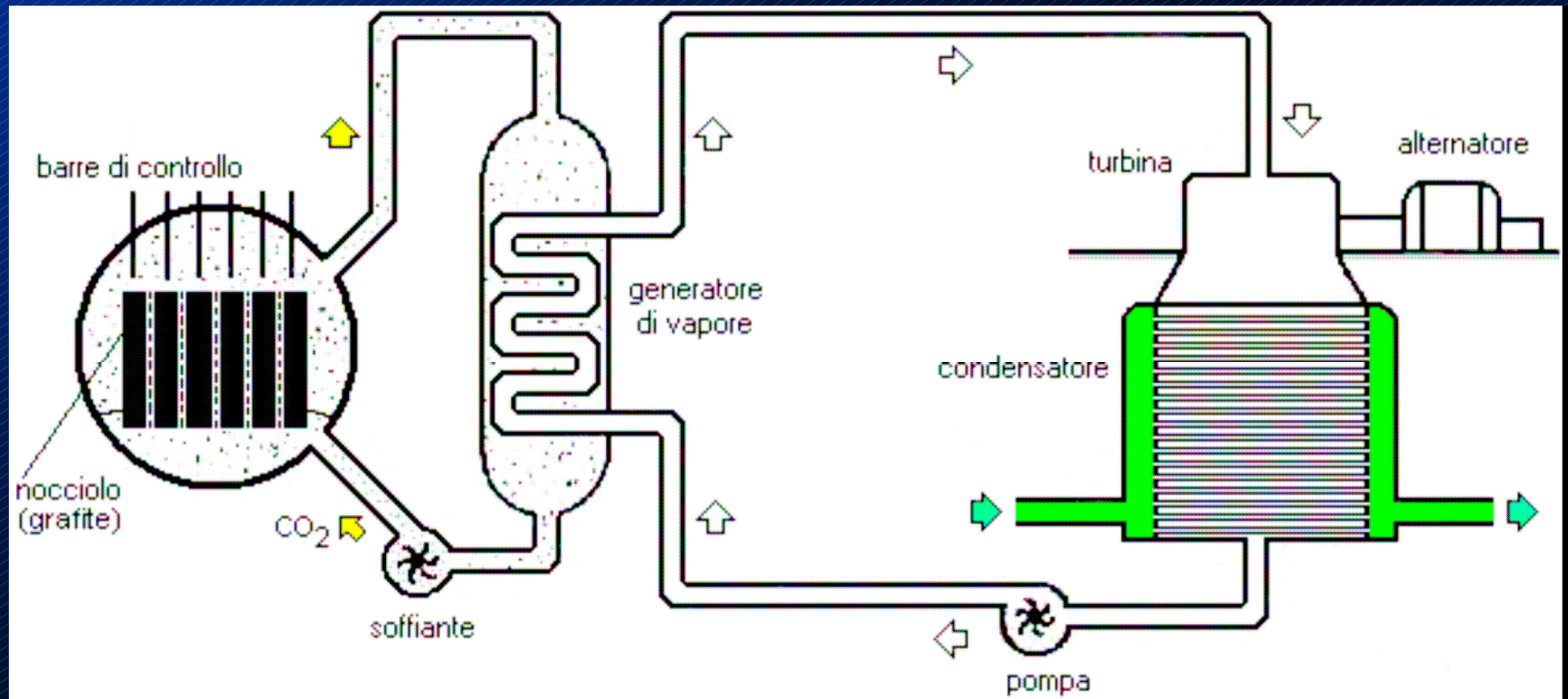
# Gli impianti GCR

Negli impianti GCR (Gas Cooled Reactor) il fluido refrigerante è un gas (tipicamente CO<sub>2</sub> o elio). La prima centrale nucleare italiana fu messa in servizio nel 1963 a Latina ed era proprio di tipo GCR. In particolare, l'unità di Latina impiegava CO<sub>2</sub> come refrigerante e grafite come moderatore.

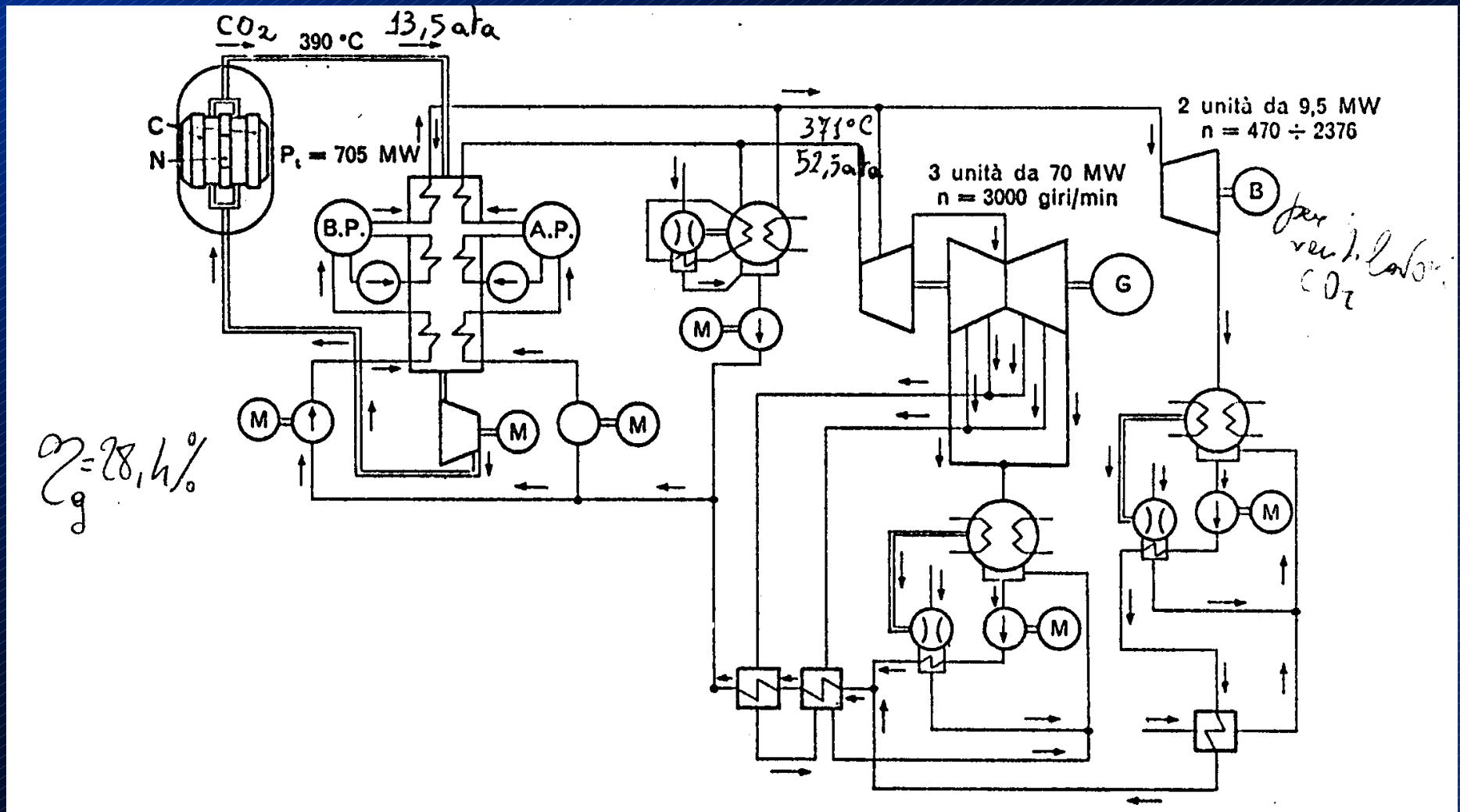
Nella centrale di Latina, il combustibile è uranio contenuto in una guaina di lega al magnesio (magnox) che ha la funzione di confinare i prodotti di fissione e, al contempo, di proteggere il combustibile dall'attacco chimico della CO<sub>2</sub>.

Negli impianti GCR, i rendimenti sono penalizzati dalla potenza assorbita dalle soffianti per la circolazione del refrigerante.

# Schema impianto GCR



# Centrale di Latina (1963, GCR)

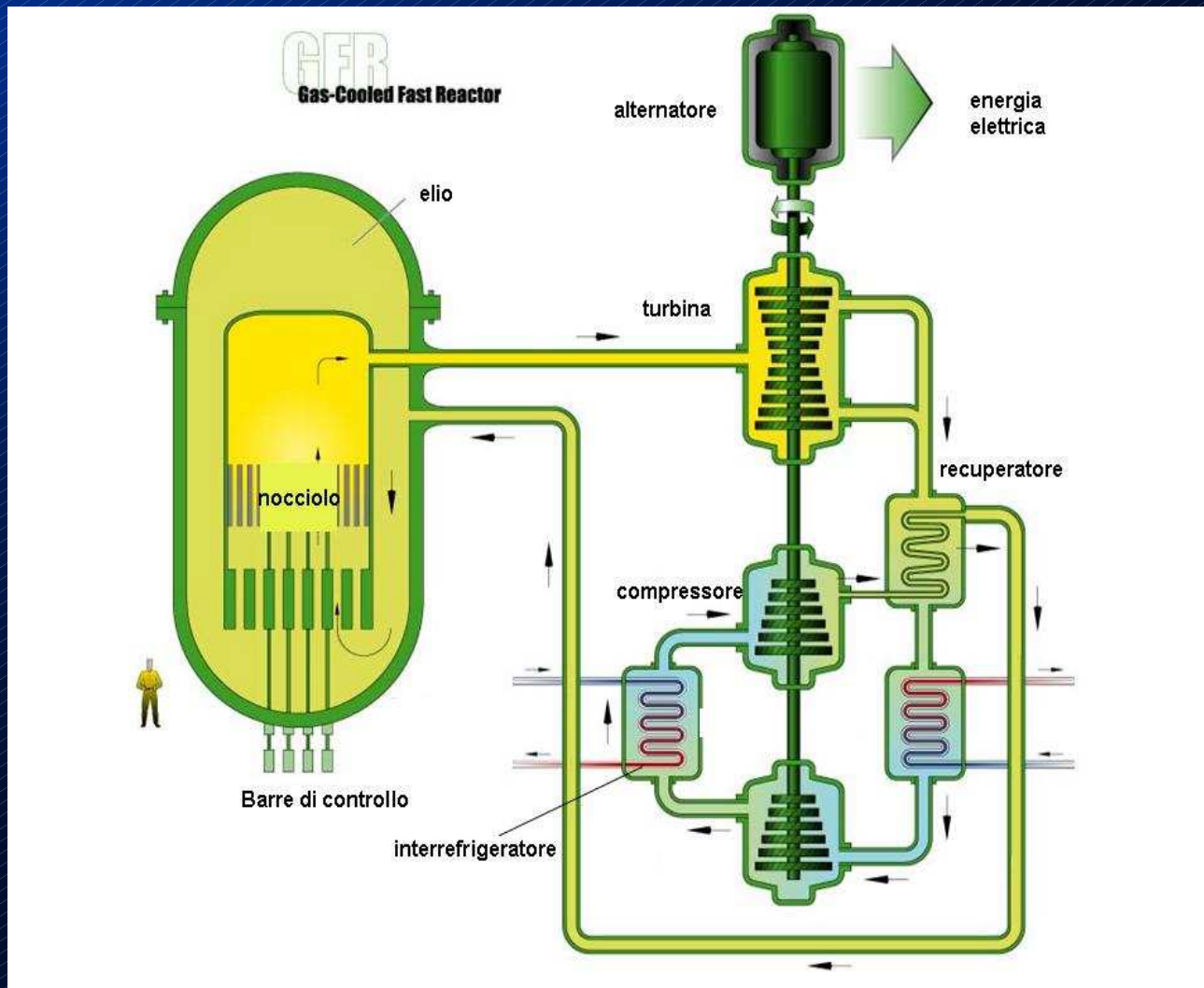


# Gli impianti di IV generazione

Dovranno garantire:

- economicità;
- sicurezza ed affidabilità tecnica;
- resistenza alla proliferazione bellica;
- protezione fisica contro atti di terrorismo;
- sostenibilità ambientale.

# Esempio: GFR



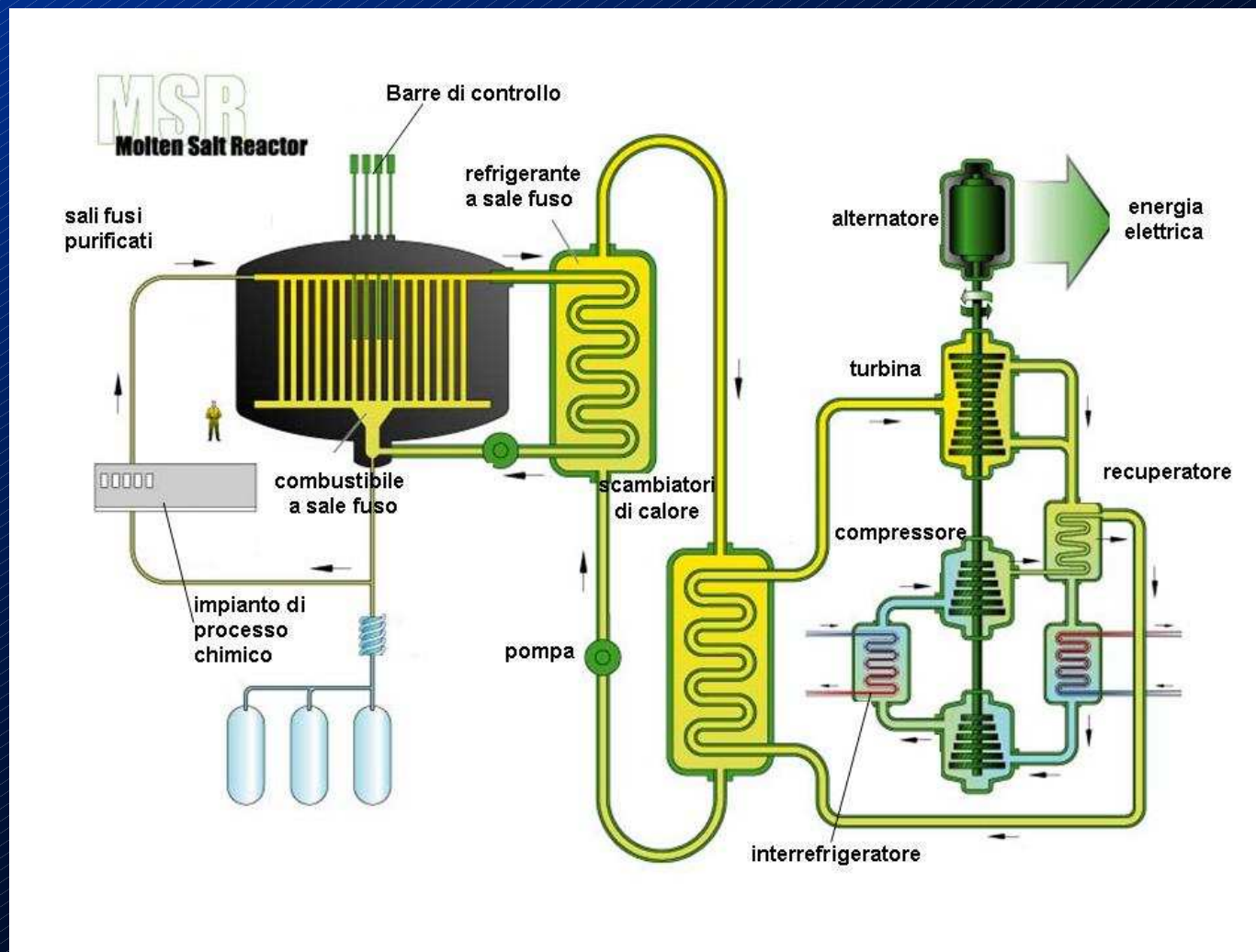
**G=Gas**

**cooled**

**F=Fast**

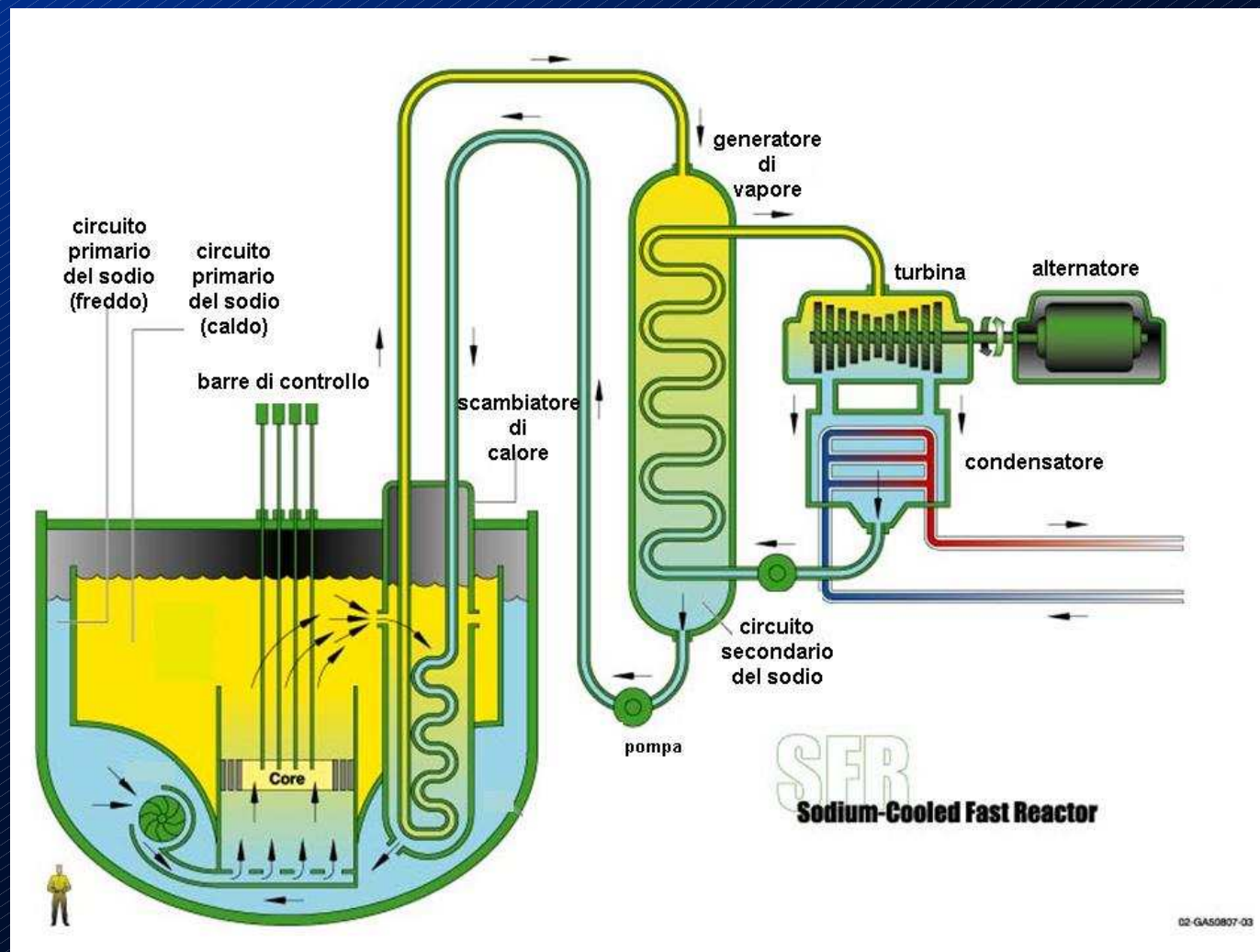
**R=Reactor**

# Esempio: MSR



**M=Molten**  
**S=Salt**  
**R=Reactor**

# Esempio: SFR

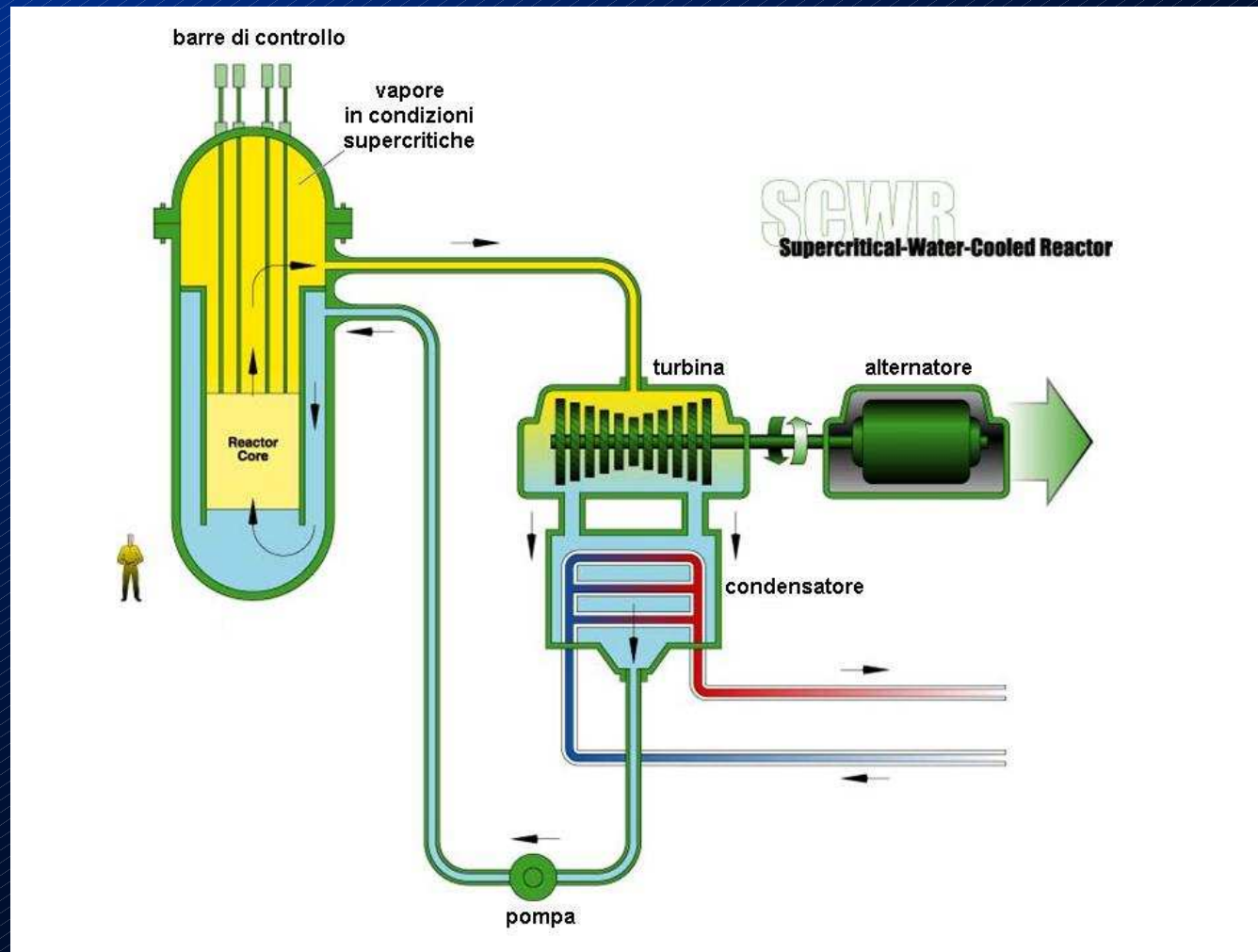


**S=Sodium**

**F=Fast**

**R=Reactor**

# Esempio: SCWR



**S=Super**

**C=Critical**

**W=Water**

**R=Reactor**

# I reattori autofertilizzanti veloci

Nei reattori di tipo FBR (Fast Breeder Reactor) il combustibile è  $U^{238}$  o, comunque, materiale fissionabile. La fissione di elementi fissionabili può essere realizzata con probabilità non nulla solamente utilizzando particelle ricche di energia cinetica, come per esempio neutroni da 2 MeV. Tali neutroni possono essere ottenuti da reazione di fissione nucleare a patto di non interporre elementi moderatori all'interno del reattore.

Gli FBR sono detti autofertilizzanti perché oltre a generare energia elettrica producono plutonio in gran quantità. Il plutonio, che non esiste in natura, è un elemento fissile alla pari dell' $U^{235}$ . Potenzialmente, gli FBR sono reattori estremamente competitivi sotto il profilo ambientale essendo caratterizzati da un minor tasso di generazione di scorie nucleari.