

Lezioni dal corso di
'Macchine e sistemi energetici'
a.a. 2009-2010

**ELEMENTI DI BASE
DEGLI IMPIANTI NUCLEARI**

30/04/2010
Ing. Claudio Laterza

Cosa sono gli impianti “nucleari”?

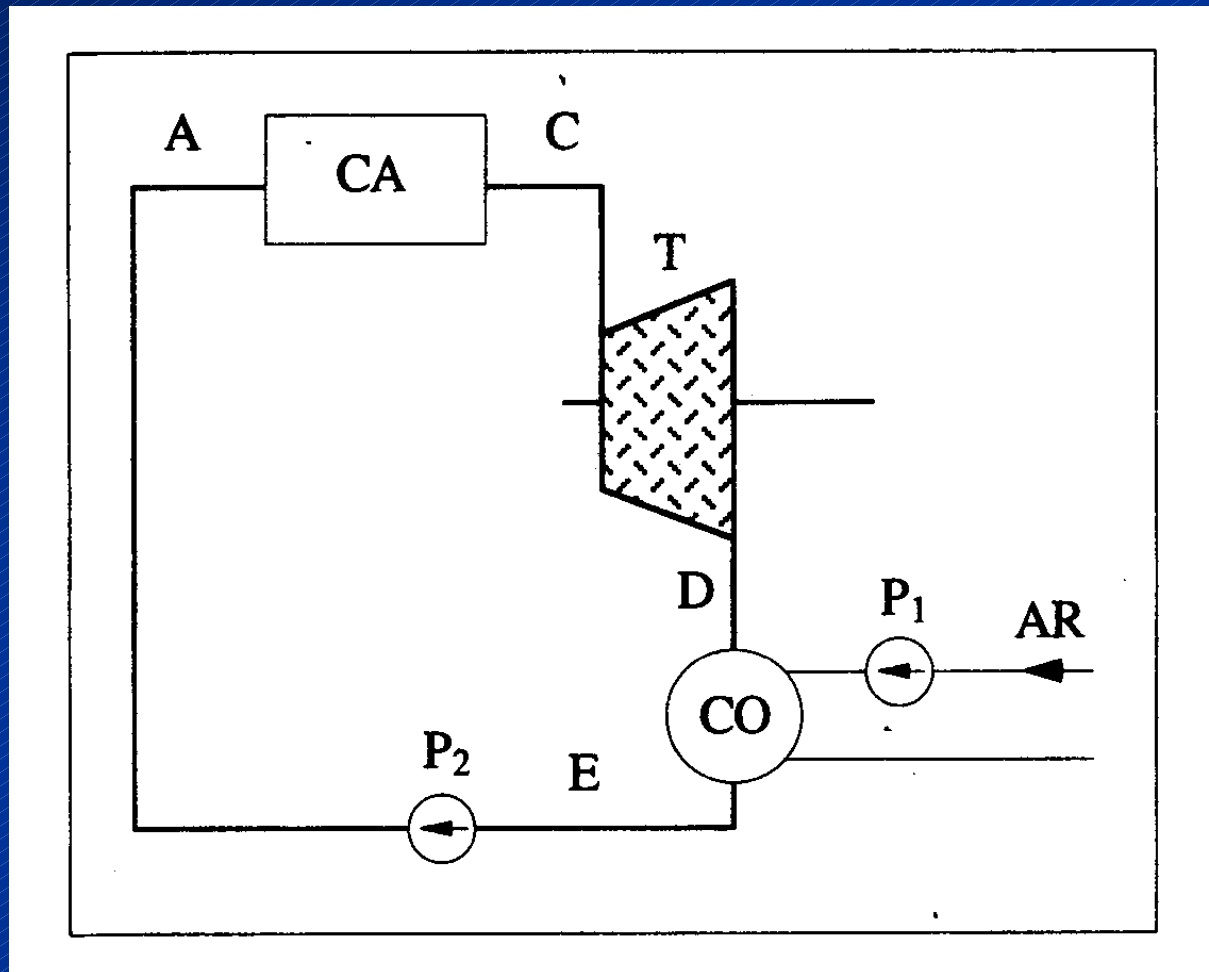
Con la dizione “impianti nucleari” siamo soliti indicare centrali termoelettriche in cui il generatore di calore è un reattore nucleare in luogo di un reattore chimico.

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

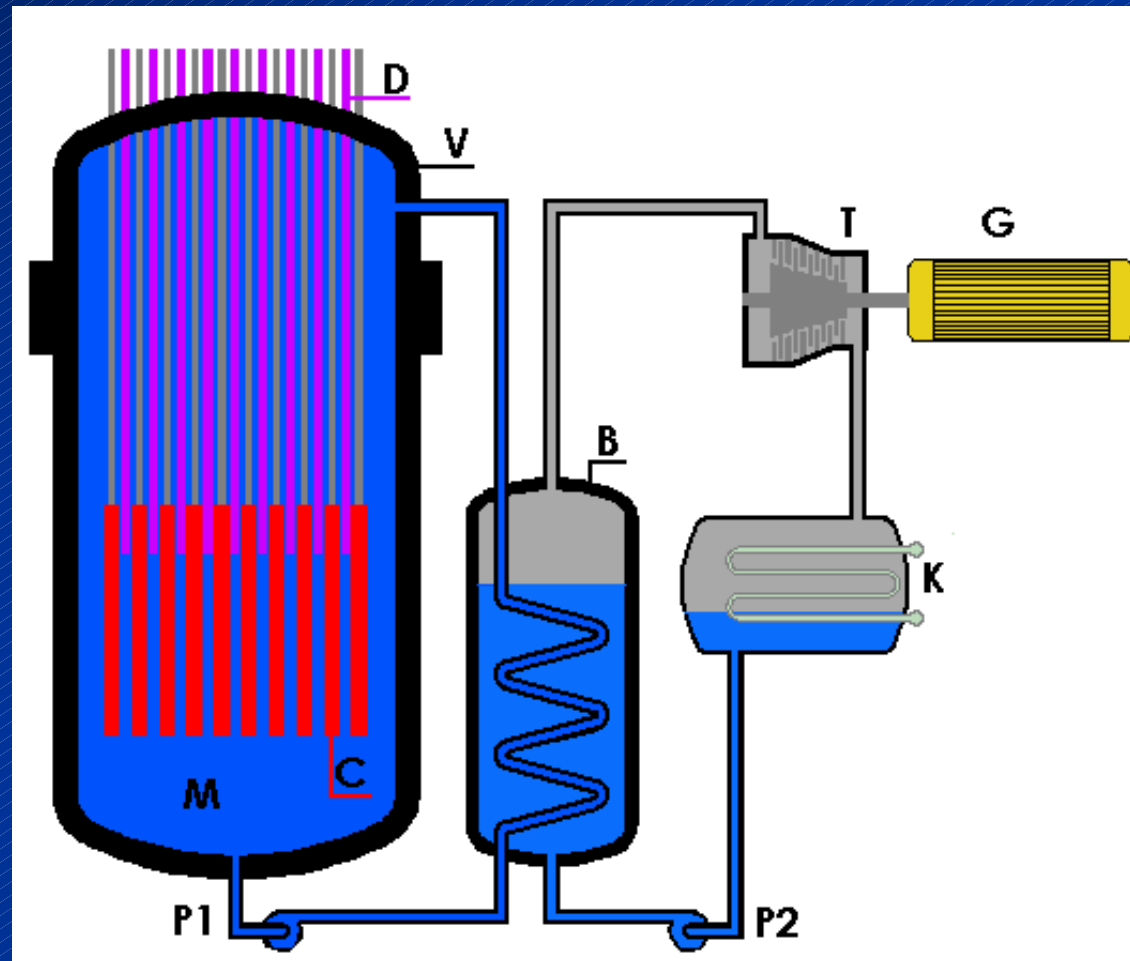
Gli impianti nucleari possono essere impianti motore a vapore o a gas a seconda del tipo di fluido che espande in turbina.

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

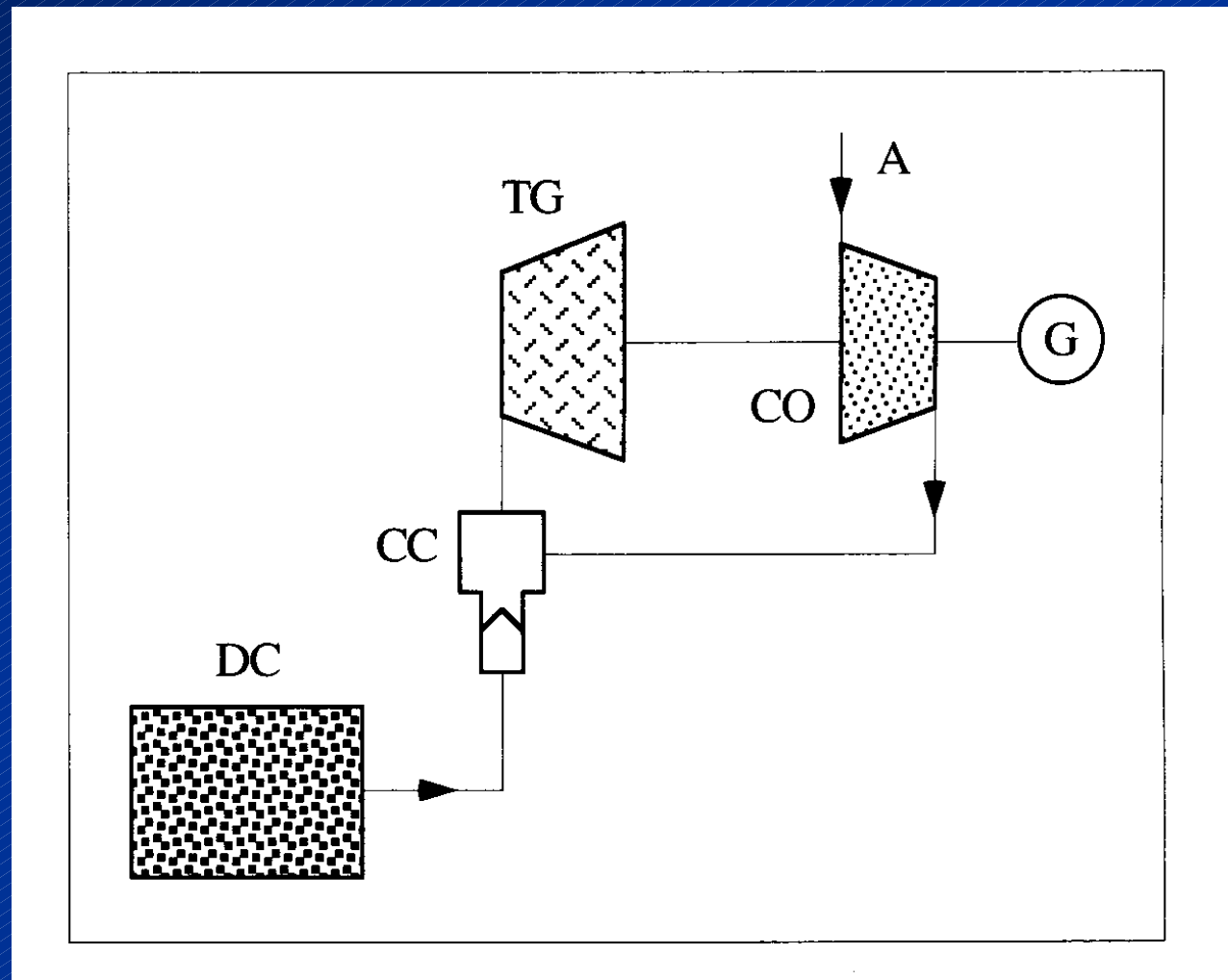
Impianto a vapore "tradizionale"



Ciclo a vapore con reattore nucleare



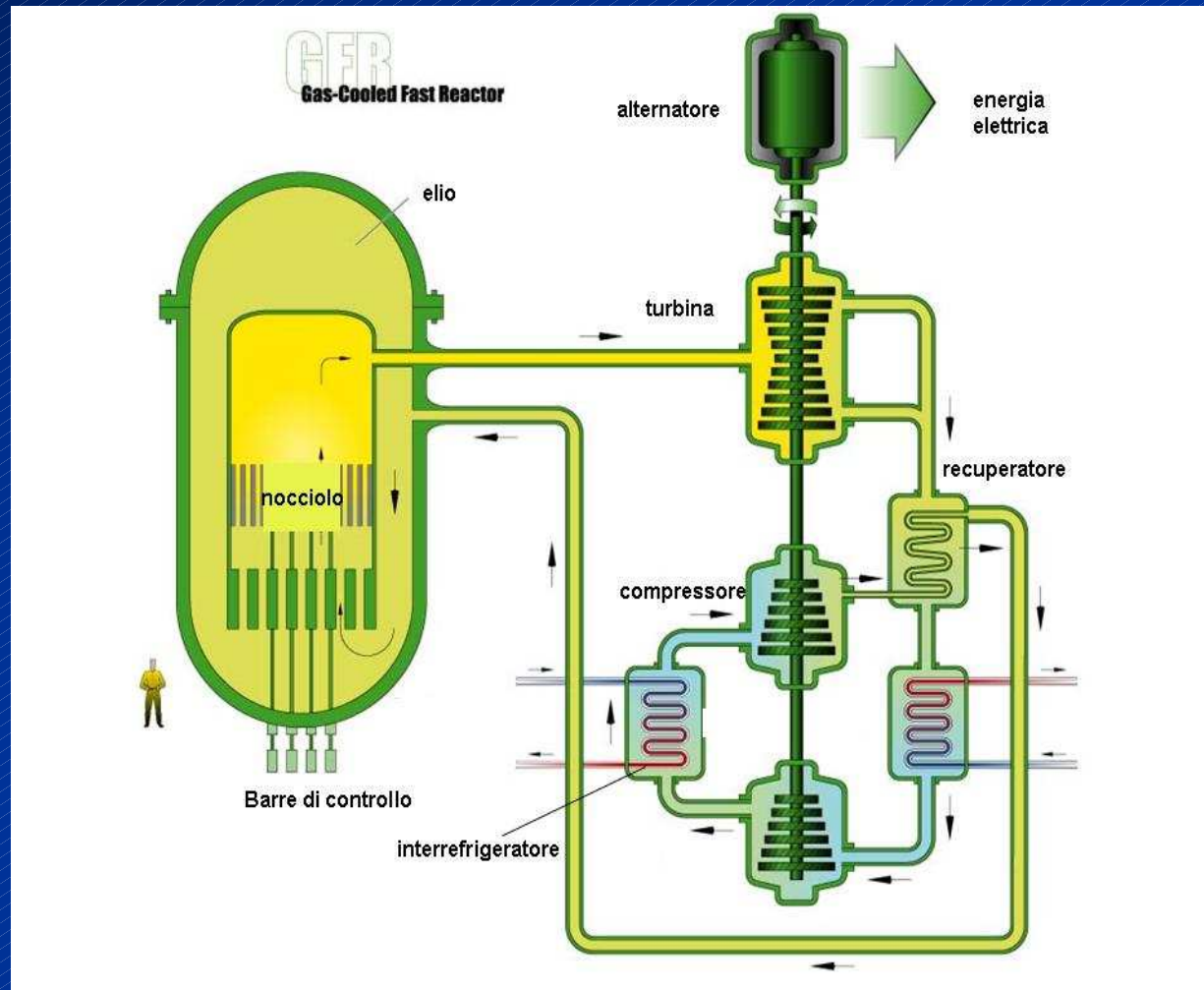
Impianto tradizionale con turbina a gas



D=Deposito

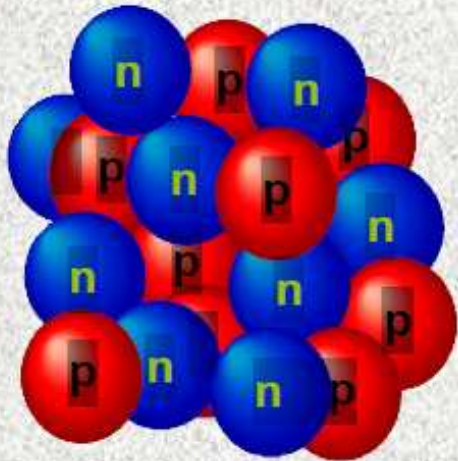
C=Combustibile

Ciclo Brayton-Joule con reattore nucleare

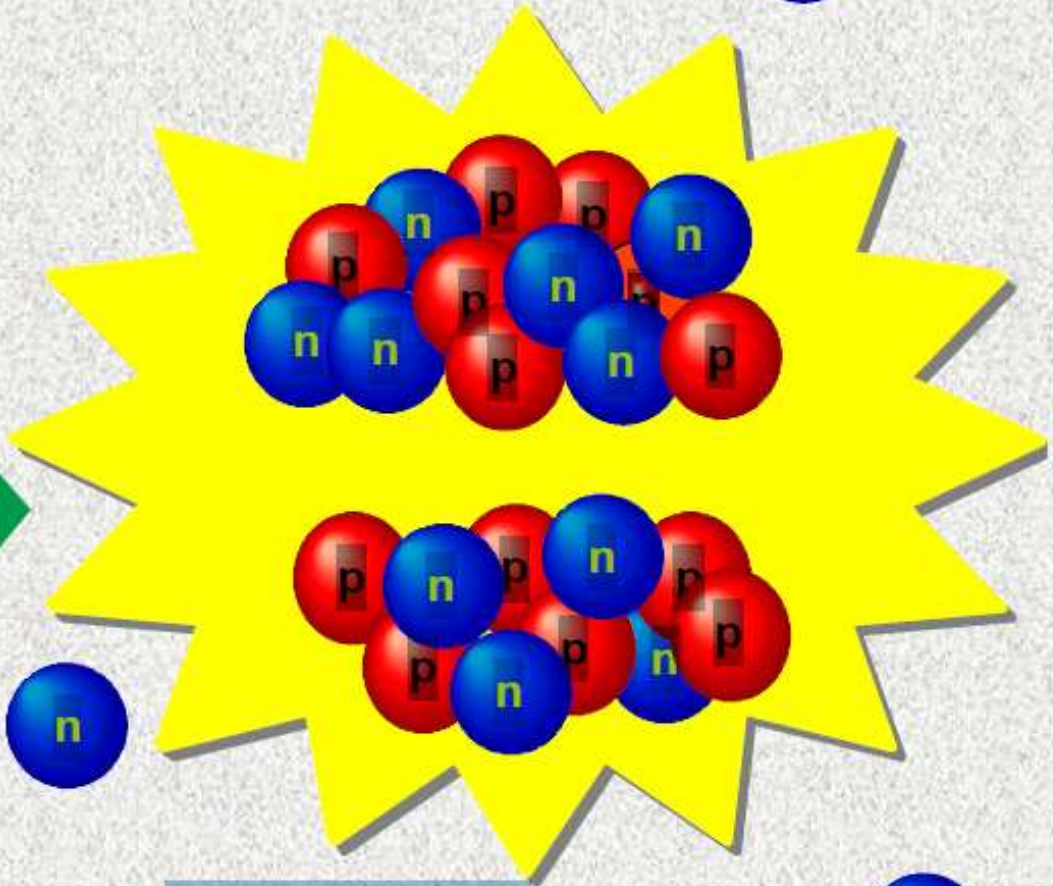


Come si produce calore in un impianto a fissione nucleare?

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 CH₄, 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:



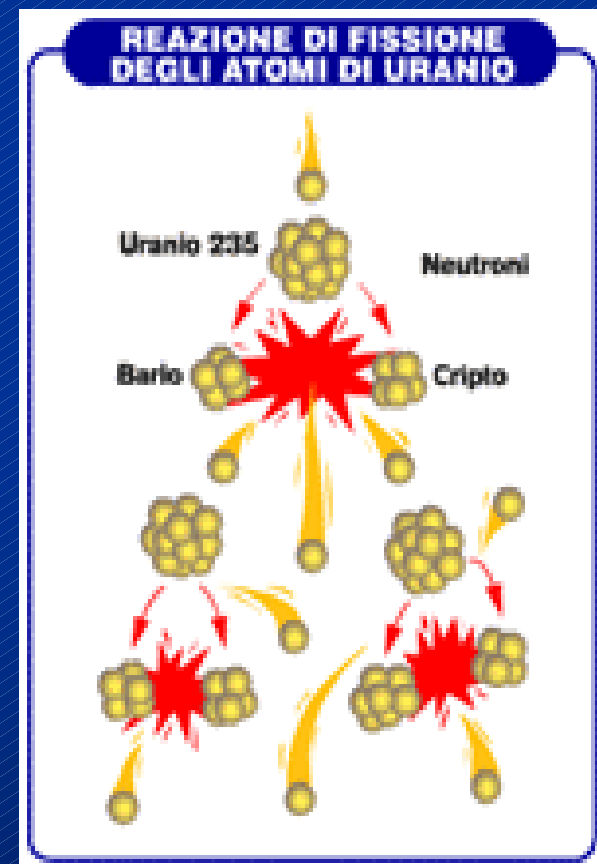
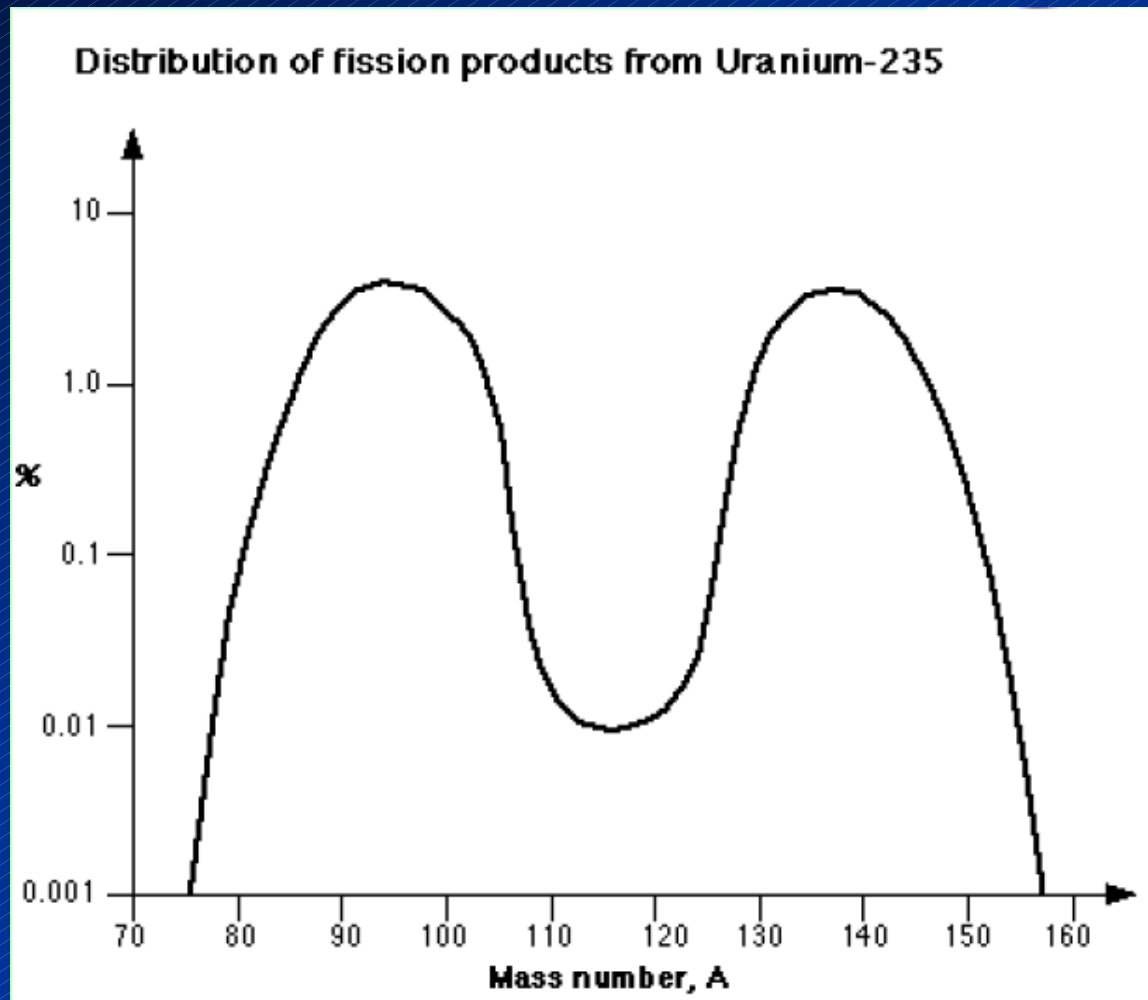
Perché la fissione è probabilistica?

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.

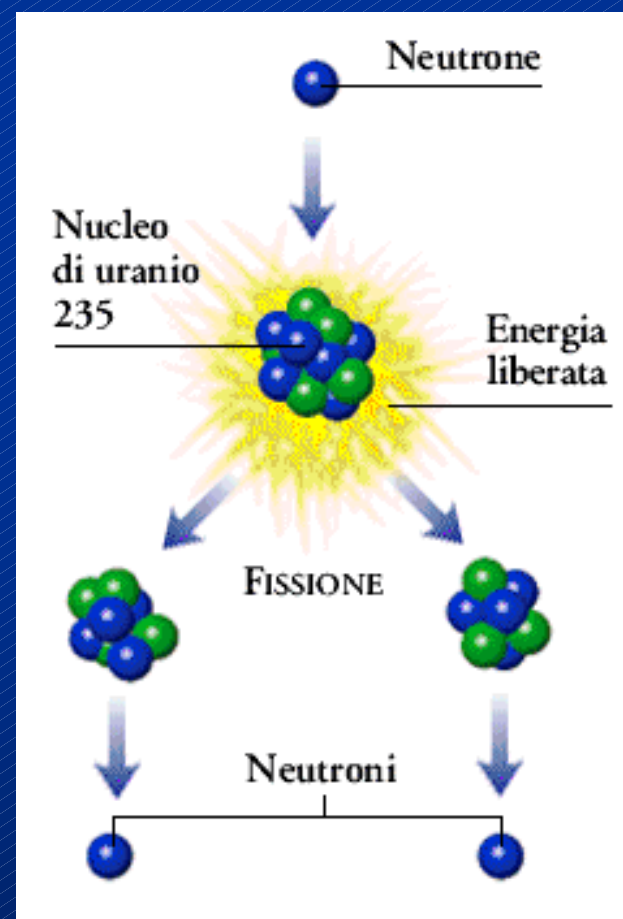
Nel caso di U^{235} si è visto che rallentando opportunamente la velocità dei neutroni aumentano le probabilità di cattura neutronica. Per questo motivo, il combustibile nucleare nella maggioranza dei casi è immerso in un moderatore.

Un esempio di reazione probabile

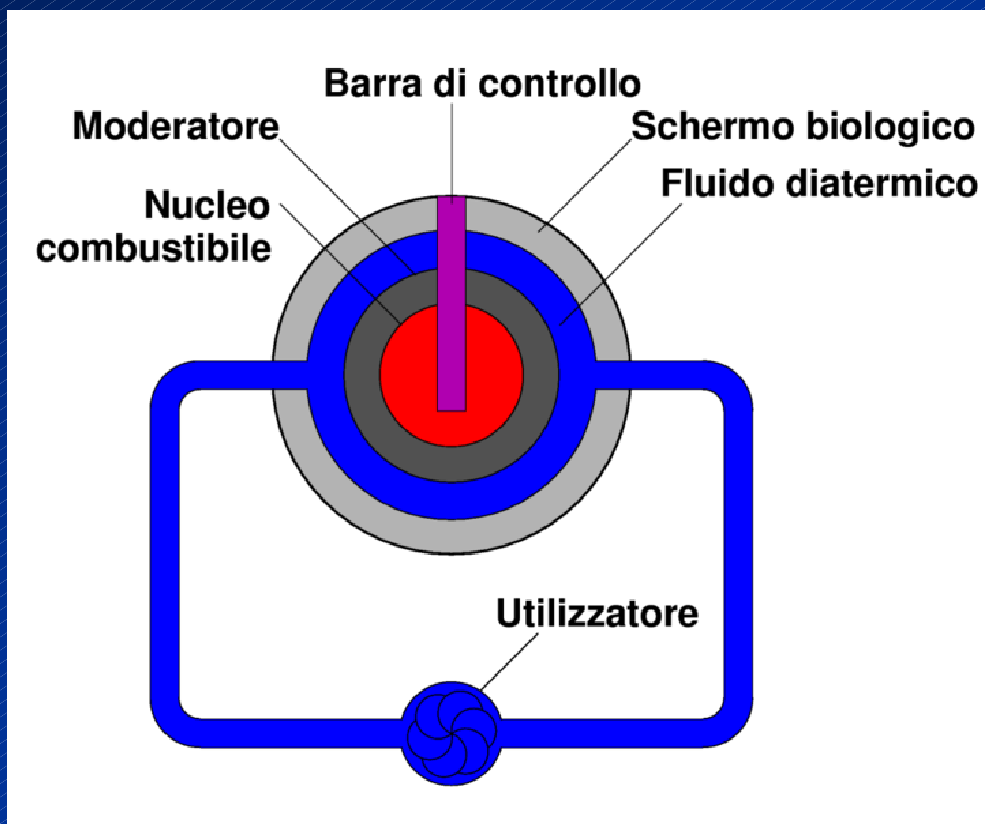


Come si controlla la reazione?

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

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.

Le scorie radioattive /1

I prodotti di fissione sono generalmente instabili e, dunque, radioattivi.

Le scorie di fissione si possono suddividere in elementi a bassa, media o alta radioattività in funzione del tempo di decadimento ovvero del tempo necessario perché si dimezzi l'attività nucleare (ovvero il numero di emissione nell'unità di tempo).

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

I primi decadono in pochi mesi, i secondi in qualche secolo, gli ultimi in decine di migliaia di anni.

La pericolosità delle scorie, però, non dipende solo dai tempi di decadimento, ma anche dal tipo di attività.

Le scorie radioattive /2

Nei processi di decadimento sono solitamente rilasciati nell'ambiente circostante raggi α , β e γ .

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

Le scorie radioattive /3

Le radiazioni α , β e γ interagiscono profondamente con la materia, provocando una intensa ionizzazione. Questo fenomeno, estremamente accentuato per le particelle α , meno di tutti per le γ , comporta differenti esiti in caso di interazione di queste particelle con organismi biologici. Le radiazioni α sono infatti profondamente dannose perché in grado di indurre mutazioni genetiche nella materia biologica; diversamente, le particelle β e γ , pur maggiormente penetranti, sono meno dannose per gli esseri umani essendo meno ionizzanti.

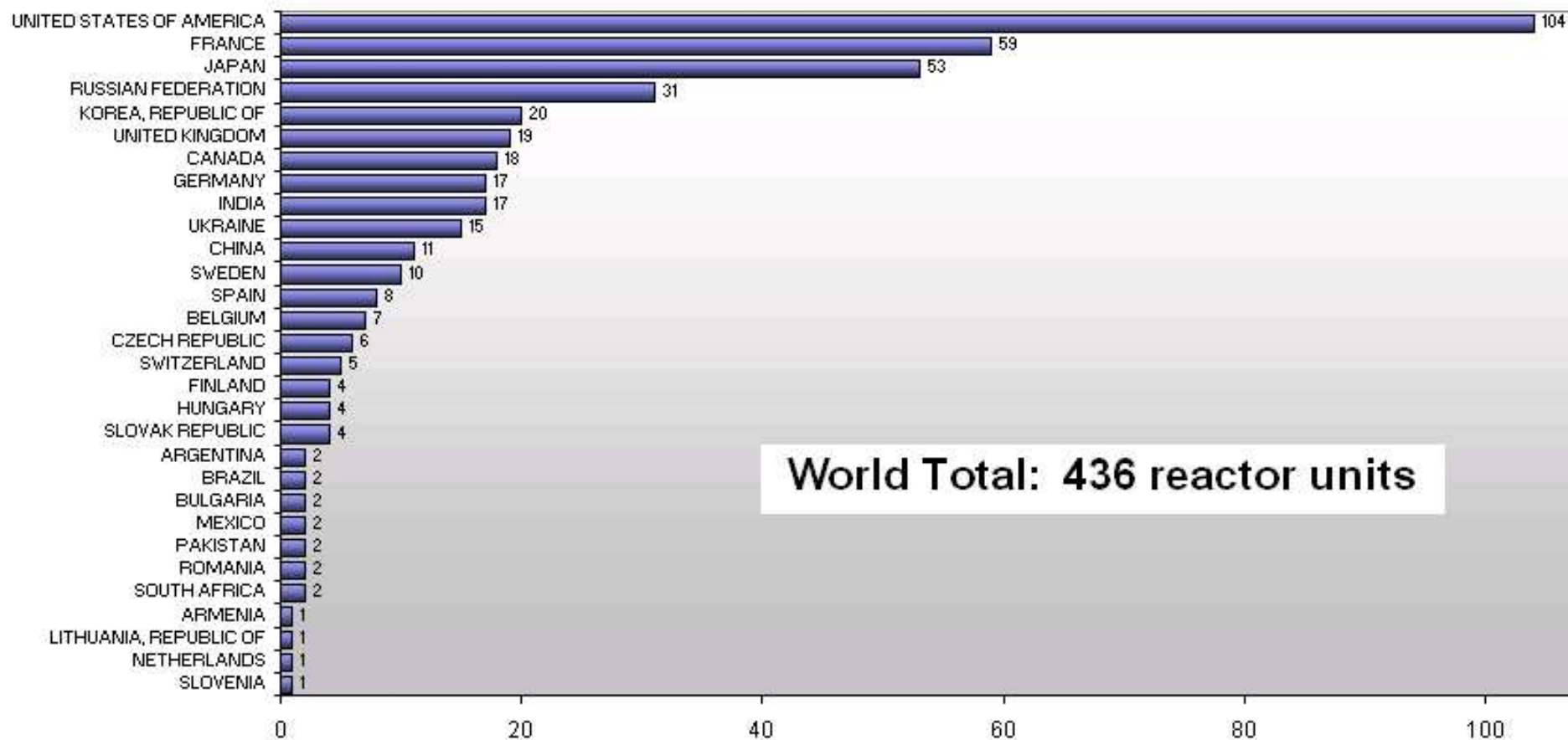
Reattori nel mondo

I reattori operativi al 16-04-2010 erano 438 (436 nel marzo del 2009) con una potenza elettrica cumulata di 372 GW (370 nel marzo del 2009).

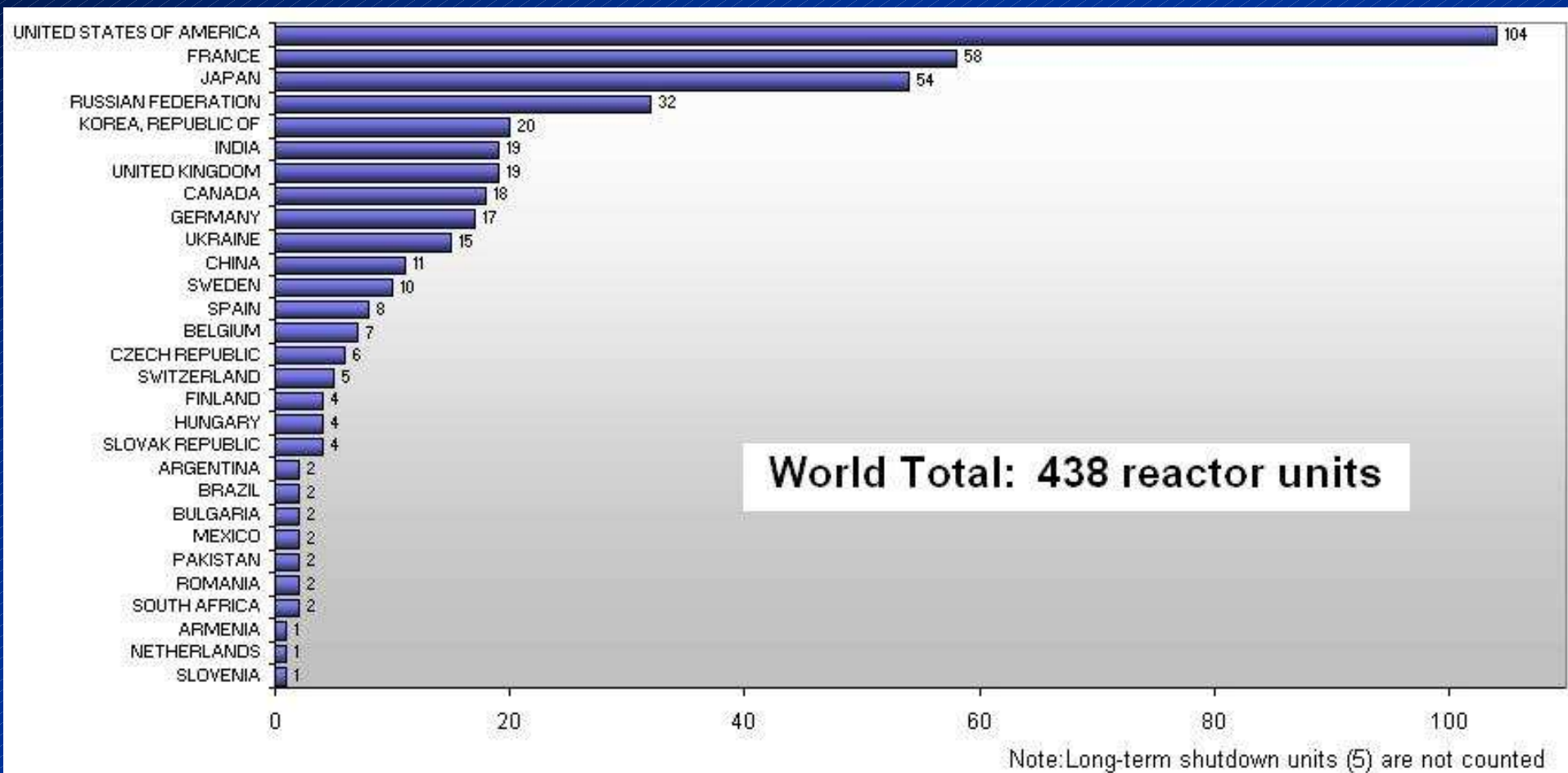
Gli impianti operativi in USA, Francia e Giappone sono 216 (tanti quanti nel marzo del 2009 con uno in più in Giappone ed uno in meno in Francia).

Alla data del 16-04-2010 i reattori in costruzione erano 54 con una potenza elettrica cumulata di 51 GW. Di questi ben 31 (22 nel marzo del 2009) sono in costruzione in Cina, India e Corea del Sud.

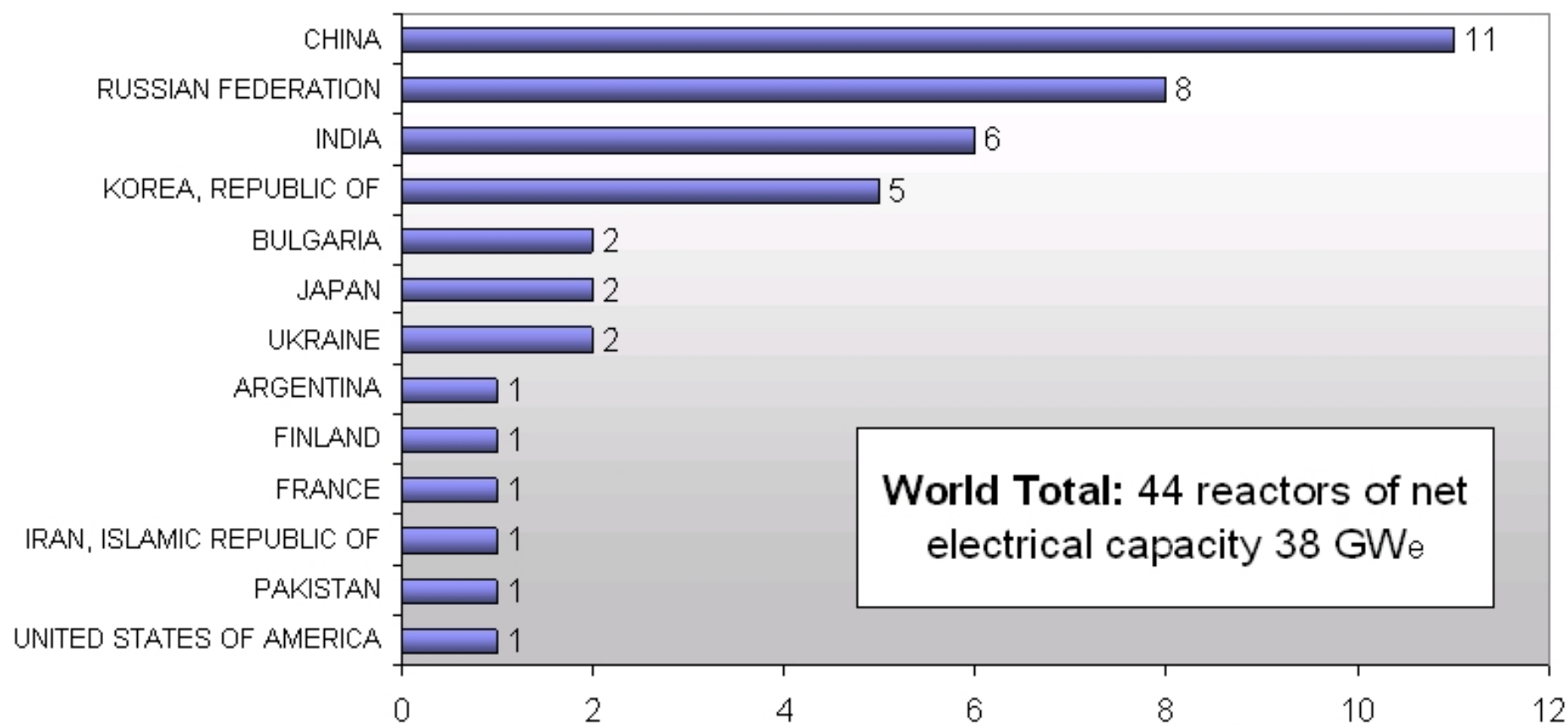
Reattori funzionanti 2009



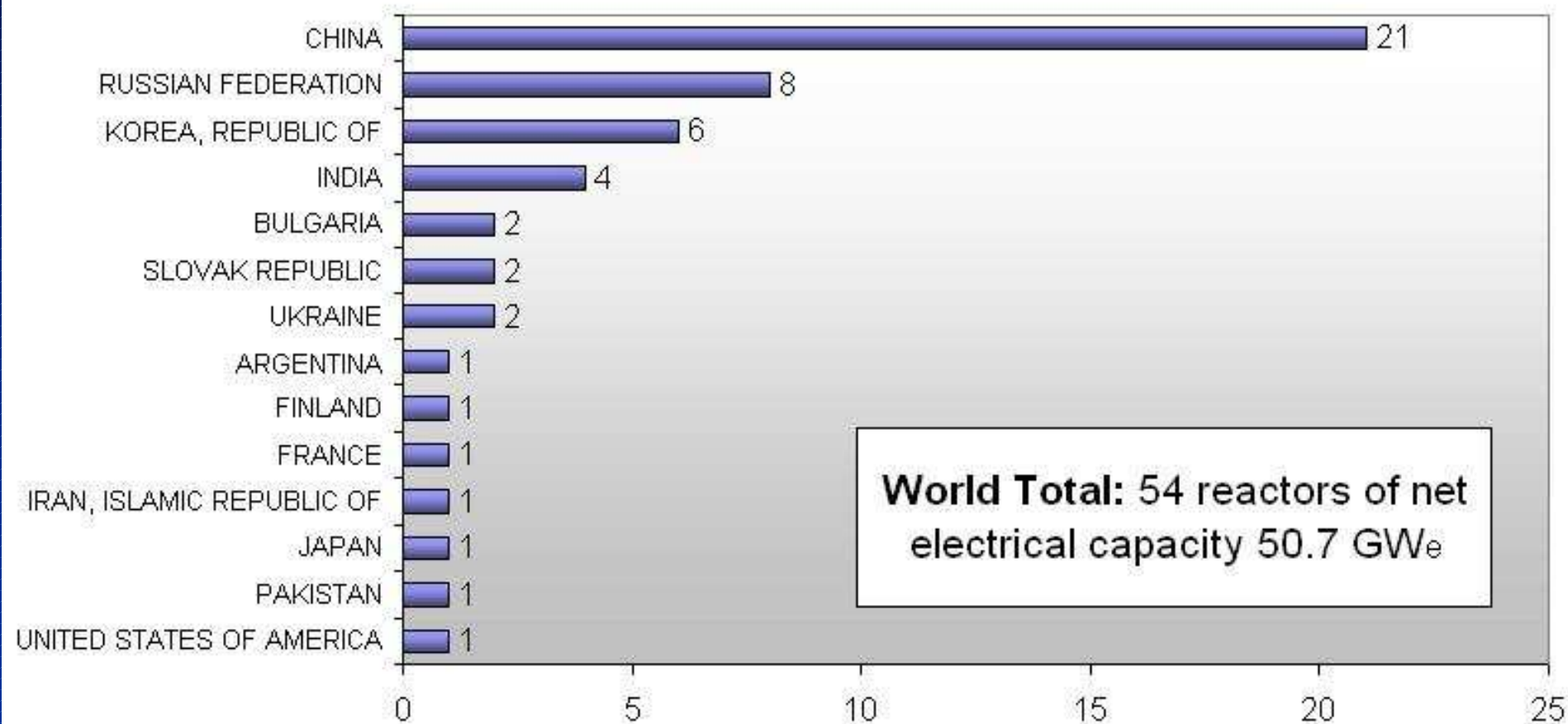
Reattori funzionanti 2010



Reattori in costruzione 2009



Reattori in costruzione 2010



Classificazione degli impianti

Gli impianti nucleari sono classificabili per:

- Combustibile (uranio, plutonio, torio nelle varie forme)
- Refrigerante (acqua, CO₂, elio, sali fusi, sodio)
- Moderatore (H₂O, D₂O, elio, grafite)

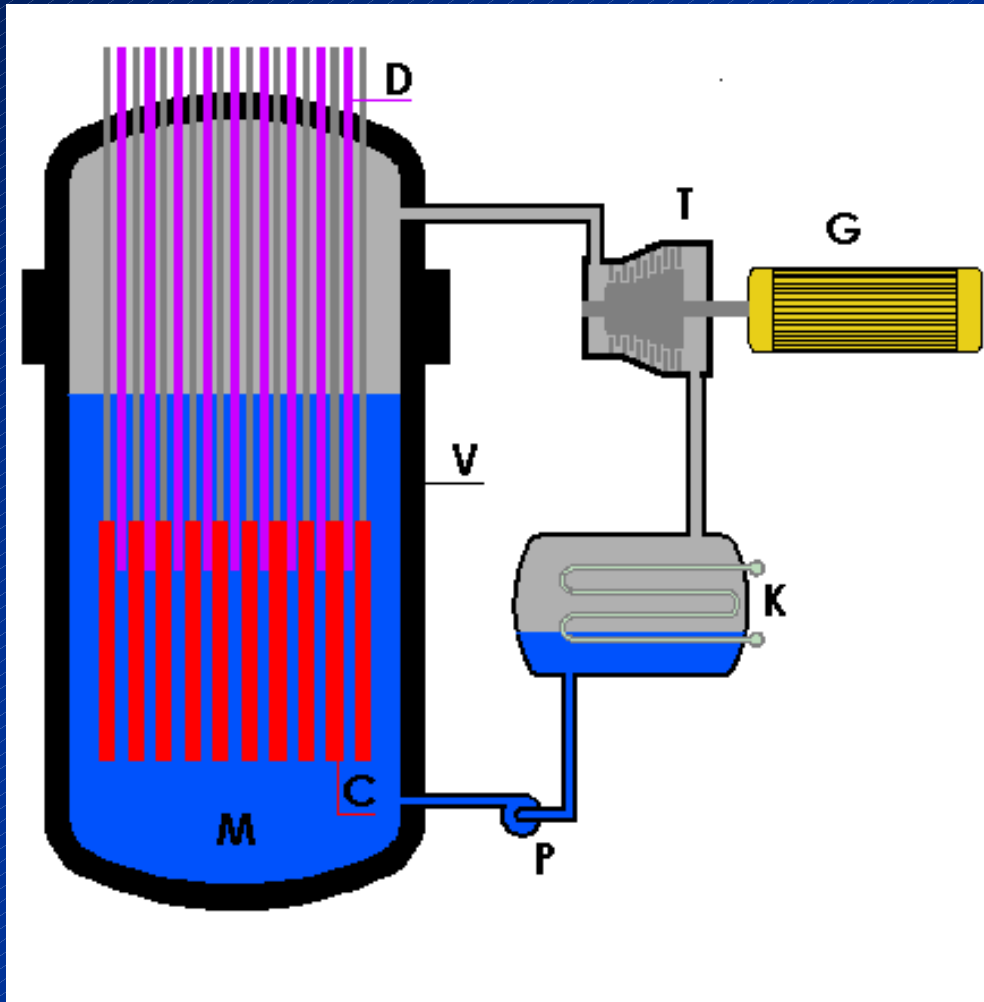
Gli impianti BWR e PWR

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

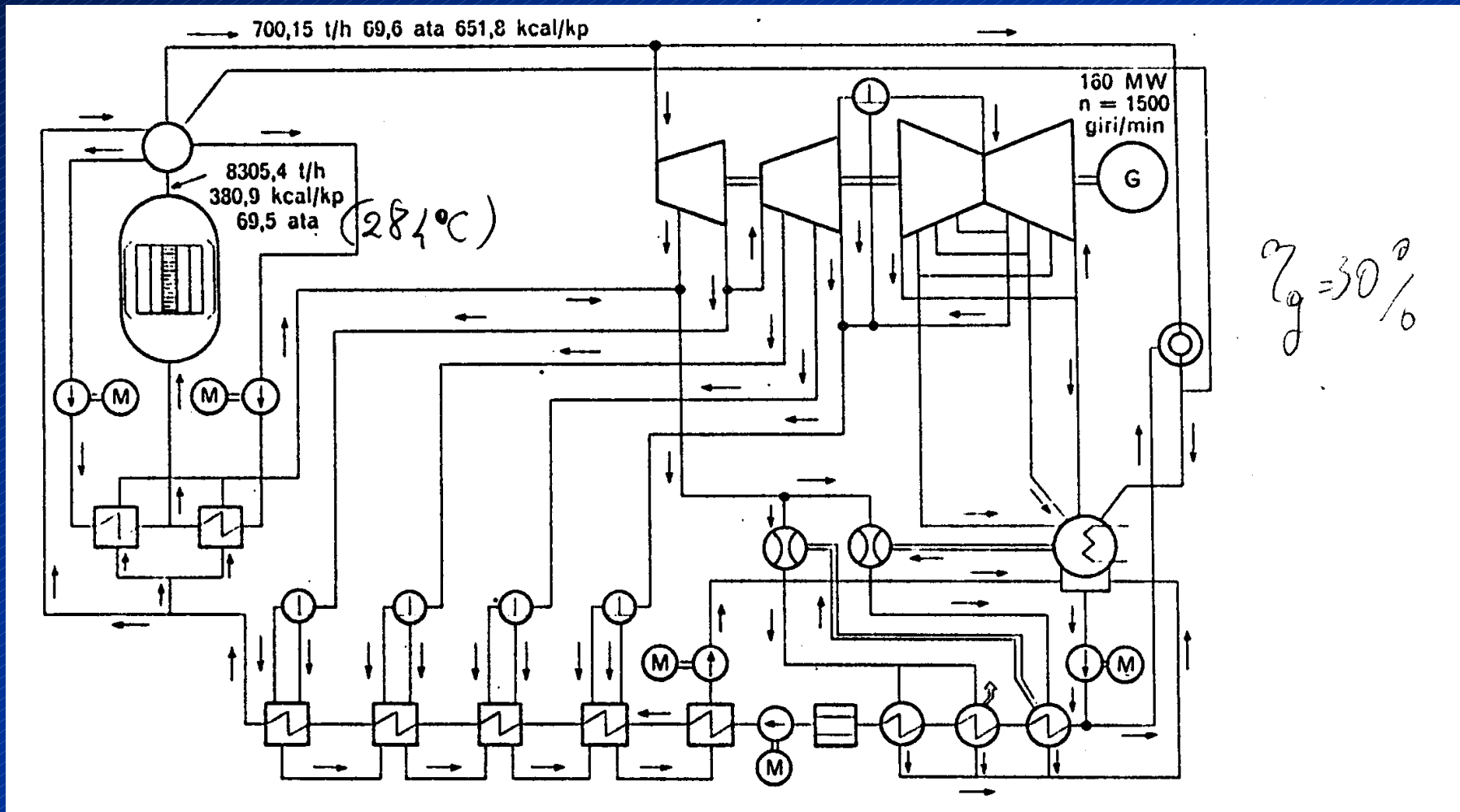


B=Boiling

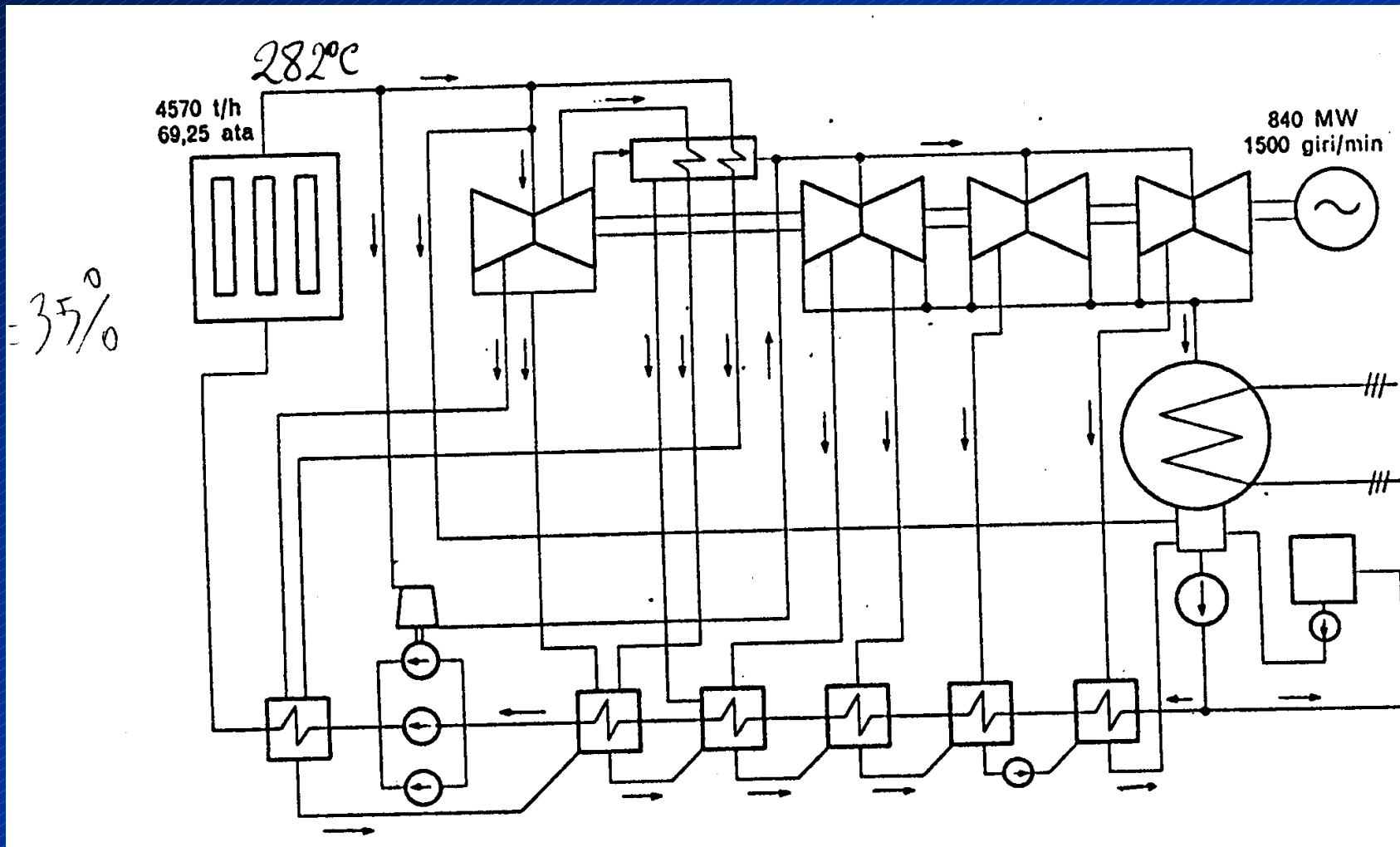
W=Water

R=Reactor

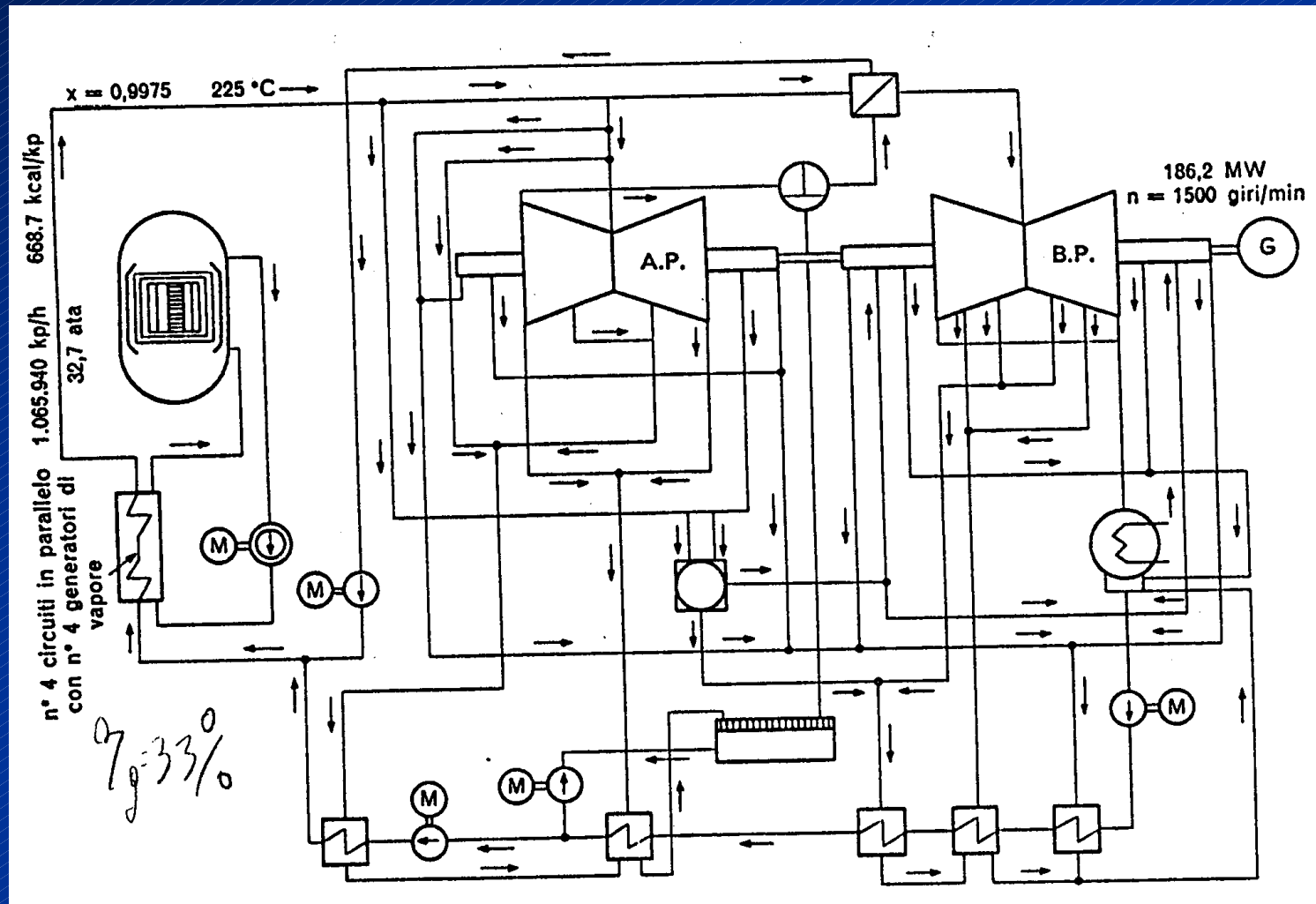
Centrale del Garigliano (1962, BWR)



Centrale di Caorso (1978, BWR)



Centrale di Trino Vercellese (1964, PWR)



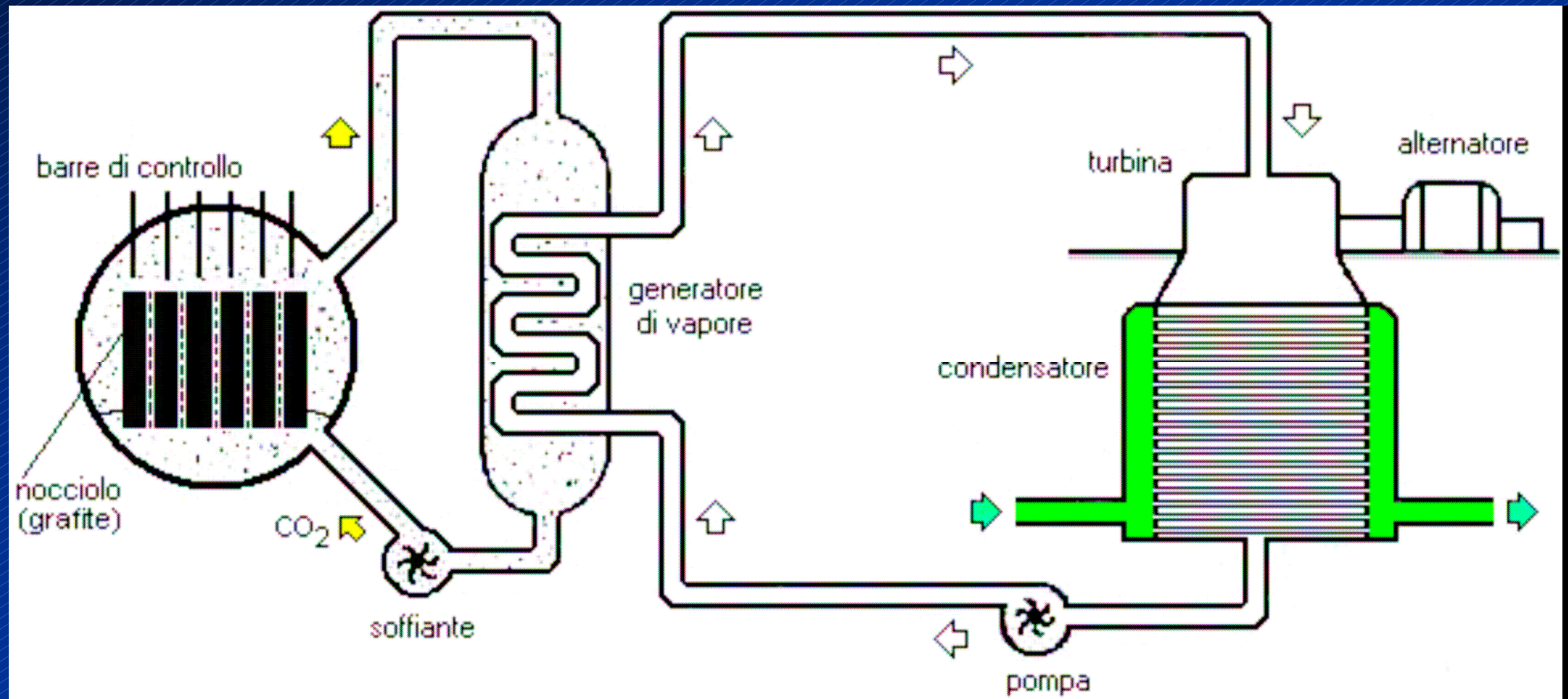
Gli impianti GCR

Negli impianti GCR (Gas Cooled Reactor) il fluido refrigerante è un gas (tipicamente CO_2 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_2 come refrigerante e grafite come moderatore.

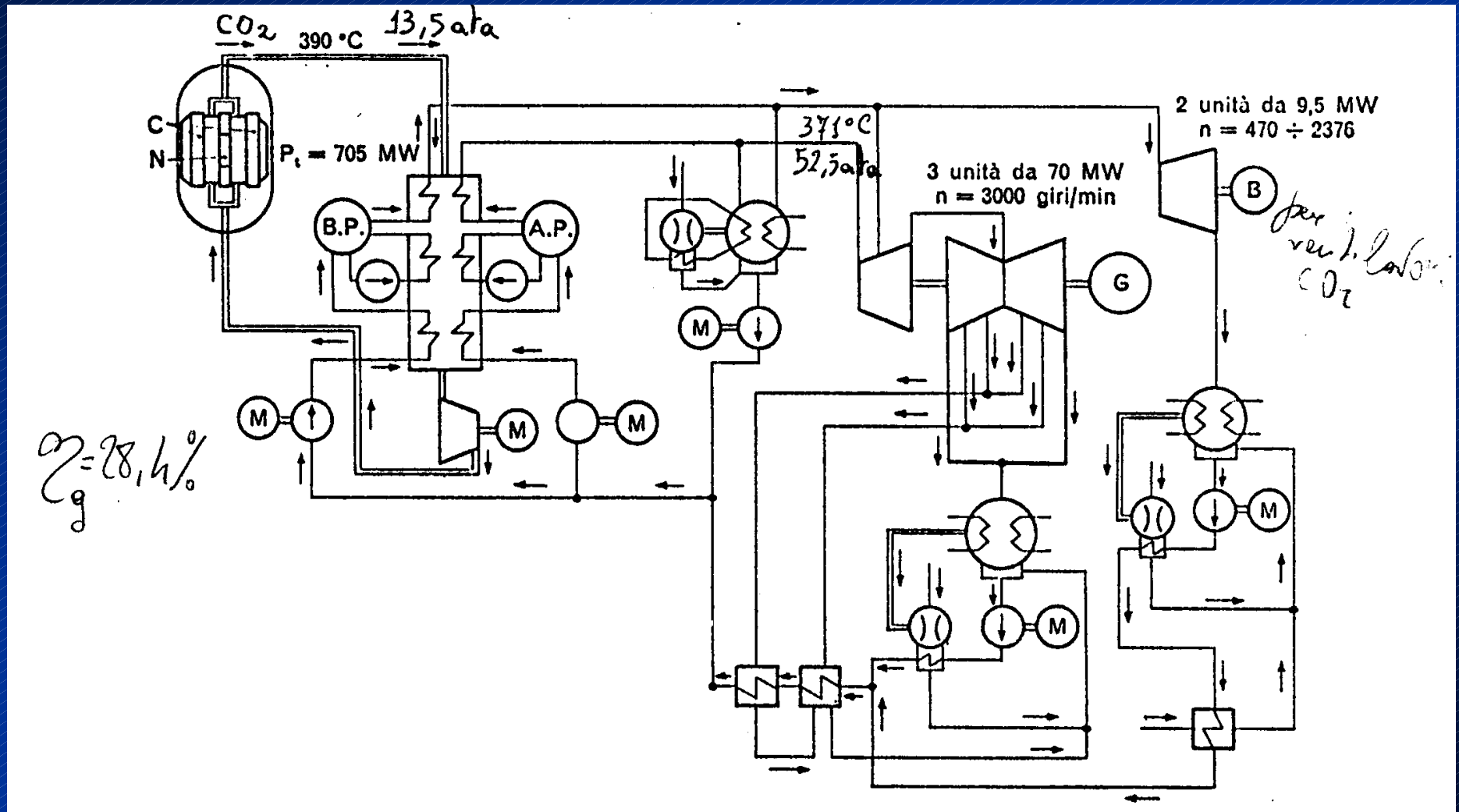
Nella centrale di Latina, il combustibile è uranio contenuto in una guaina di lega al magnesio (magnox) che ha la funzione di confinare i prodotti di fissione e, al contempo, di proteggere il combustibile dall'attacco chimico della CO_2 .

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)

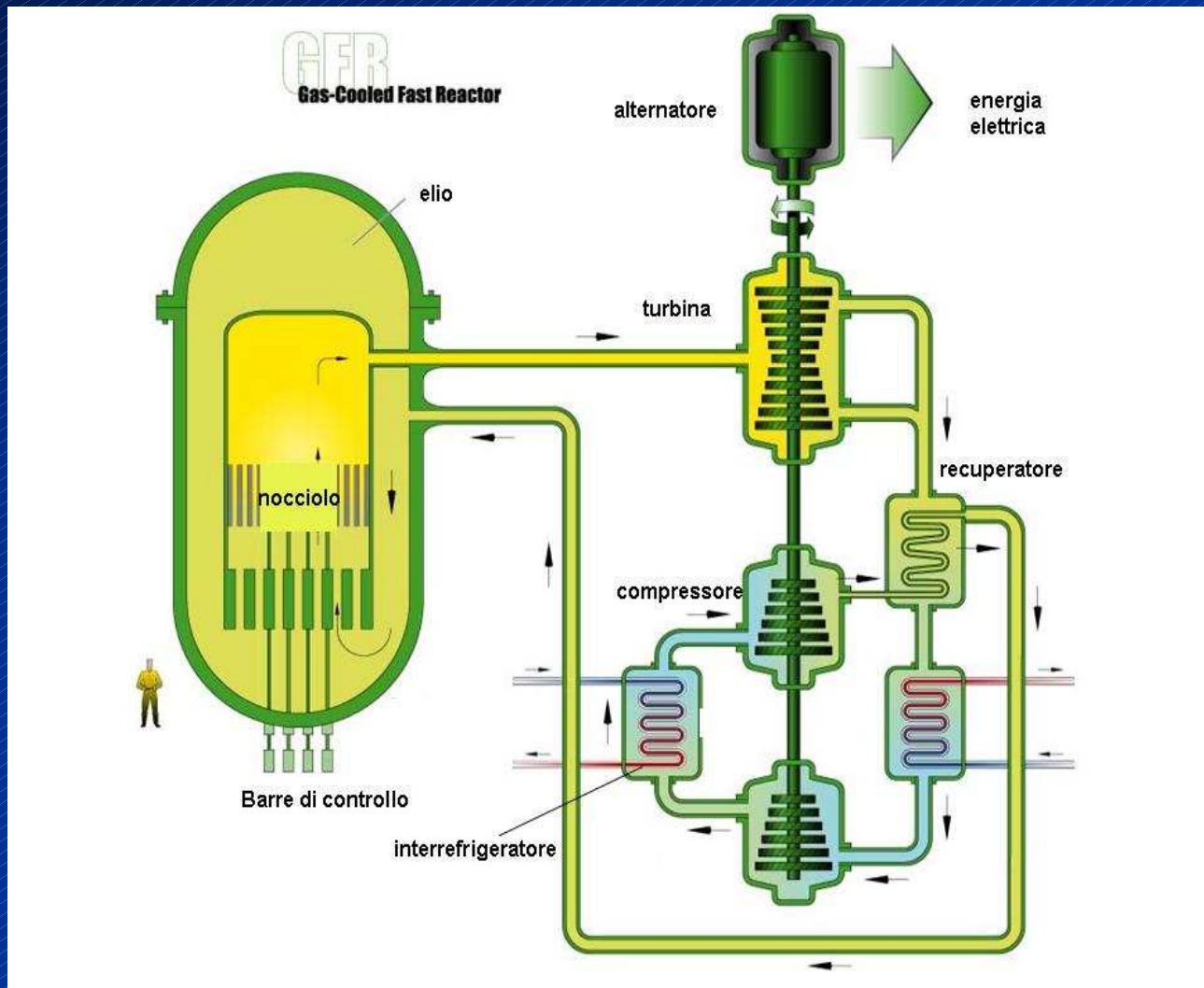


Gli impianti di IV generazione

Dovranno garantire:

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

Esempio: GFR



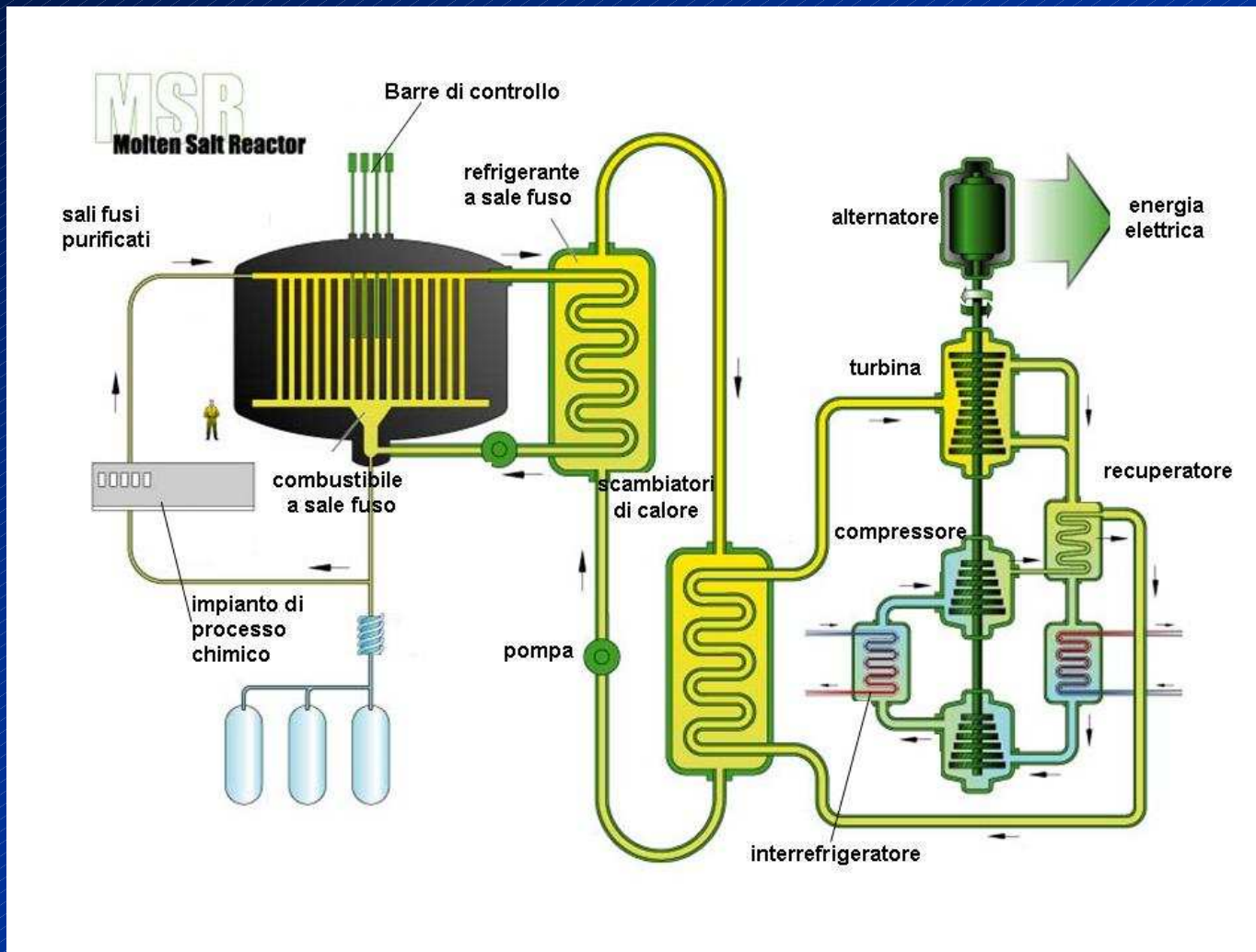
G=Gas

cooled

F=Fast

R=Reactor

Esempio: MSR

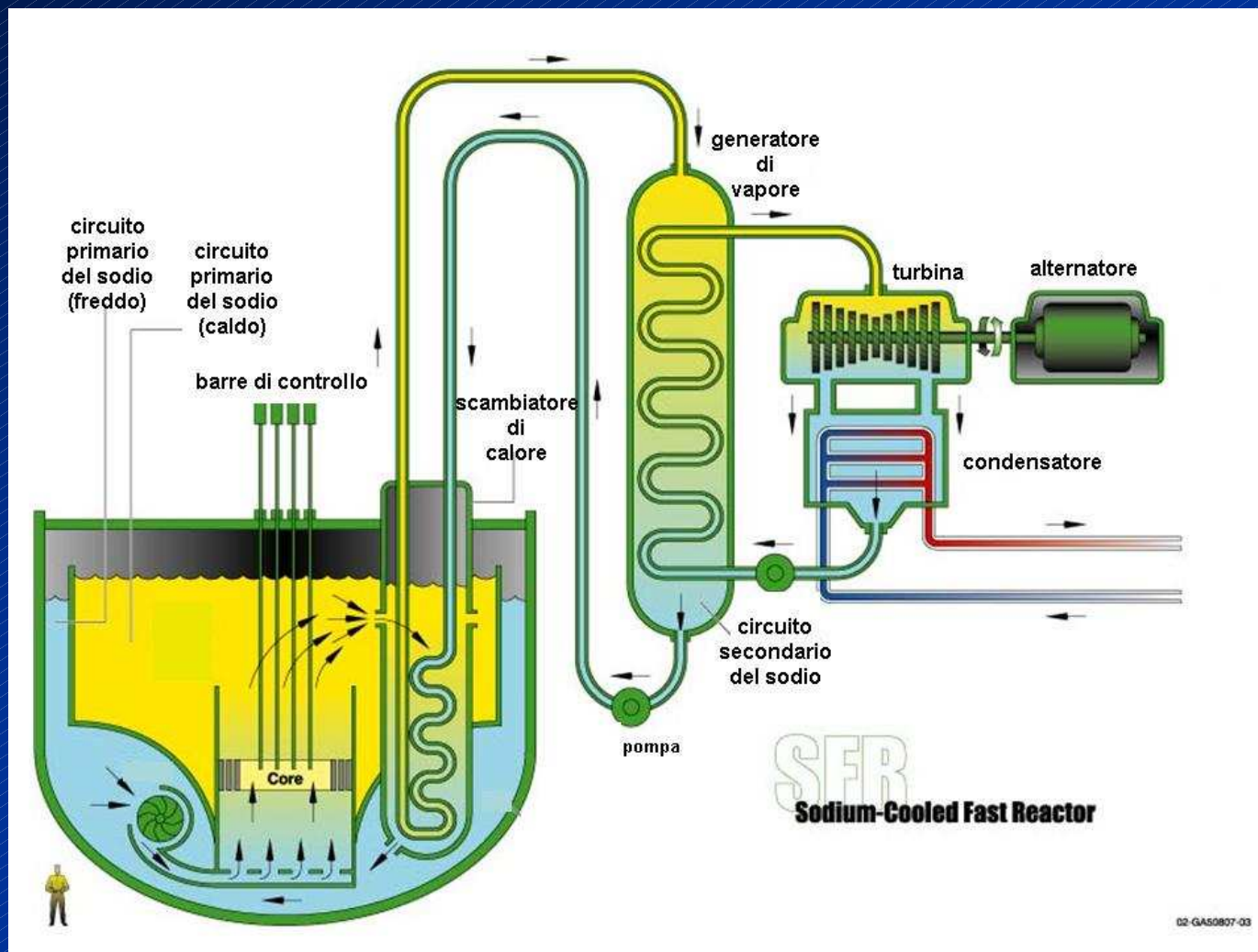


M=Molten

S=Salt

R=Reactor

Esempio: SFR

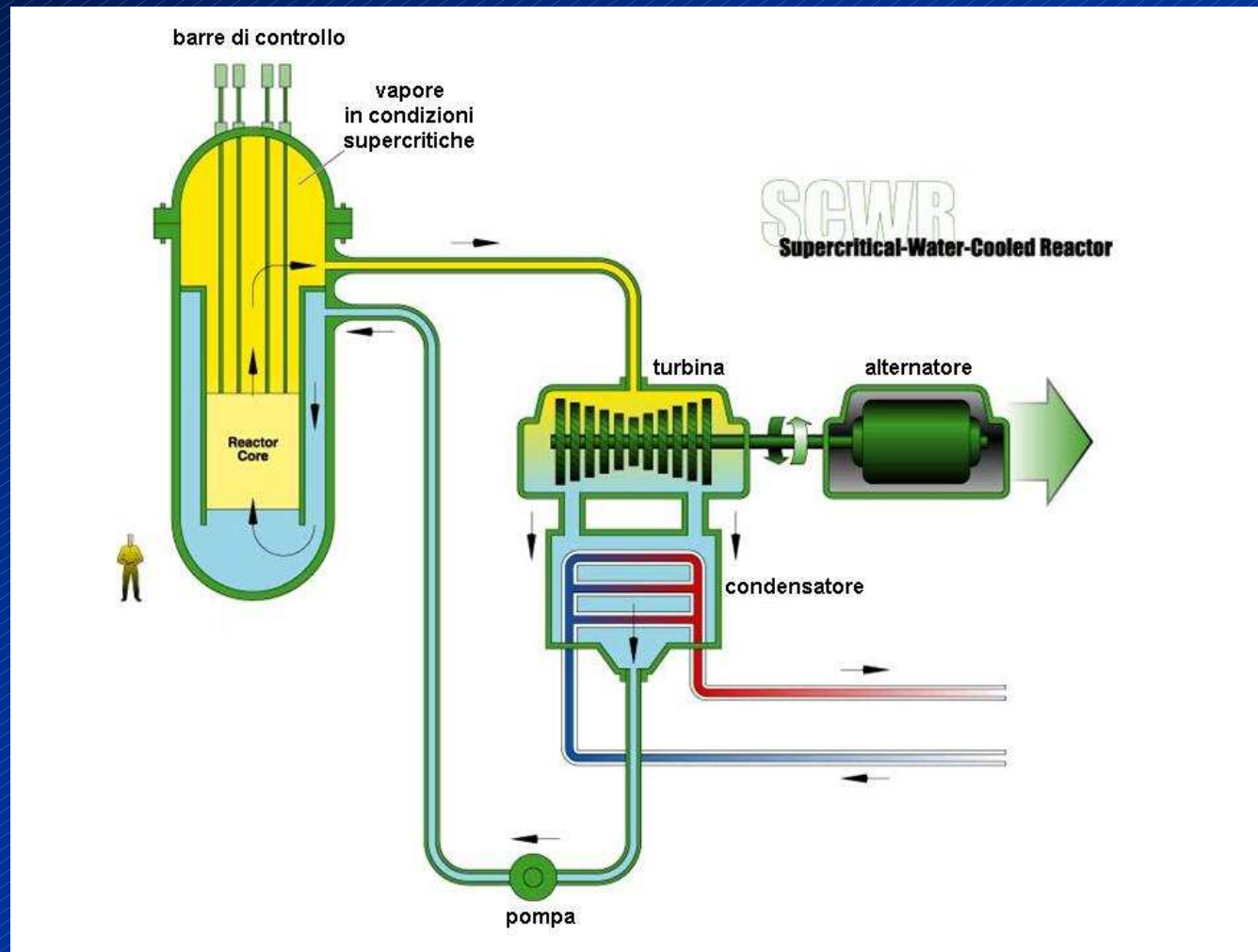


S=Sodium

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} . Gli FBR sono, dunque, reattori estremamente competitive sotto il profilo ambientale essendo caratterizzati da un minor tasso di generazione di scorie nucleari.