

Energia da processi nucleari

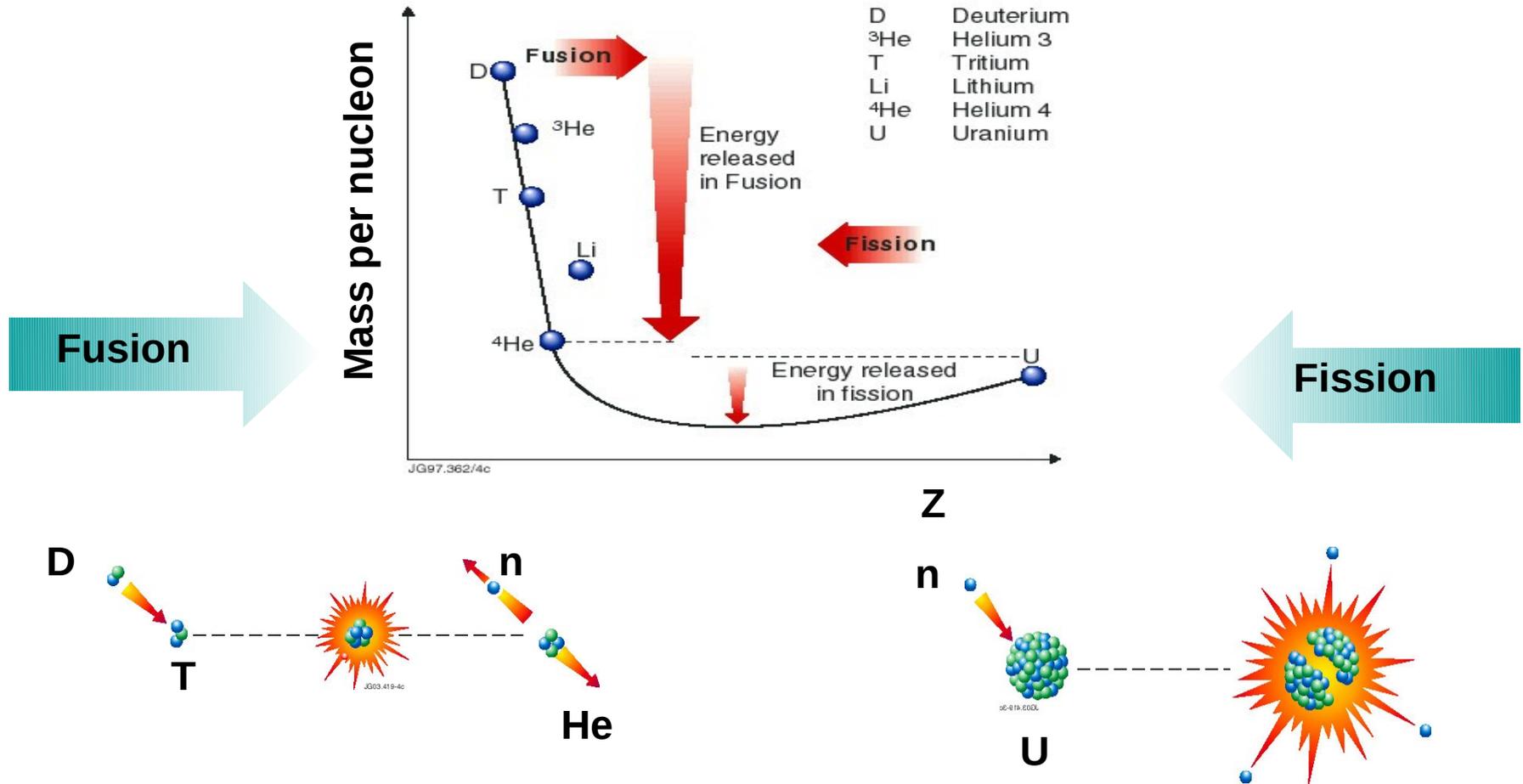
G. Bosia

Dipartimento di Fisica

Università di Torino

Produzione di energia nucleare

La possibilità di estrarre energia da processi nucleari è legata all' **eccesso di massa**.



Energia nucleare

La produzione di energia elettrica da combustibile nucleare ha avuto un rapido sviluppo in USSR Europa, US e negli anni 50-60 e successivamente anche dal JA (anni 70), utilizzando le tecnologie di produzione e di controllo sviluppate a scopi militari, con installazioni che raggiunsero rapidamente 1.5 GW di potenza elettrica prodotta.

☞ La crescita del nucleare è stata *inizialmente favorita* dalla prospettiva di:

- una potenza per unità di peso di combustibile molto superiore a quella dei combustibili fossili
- la prospettiva di un impatto ambientale trascurabile
- disponibilità di combustibile a basso costo

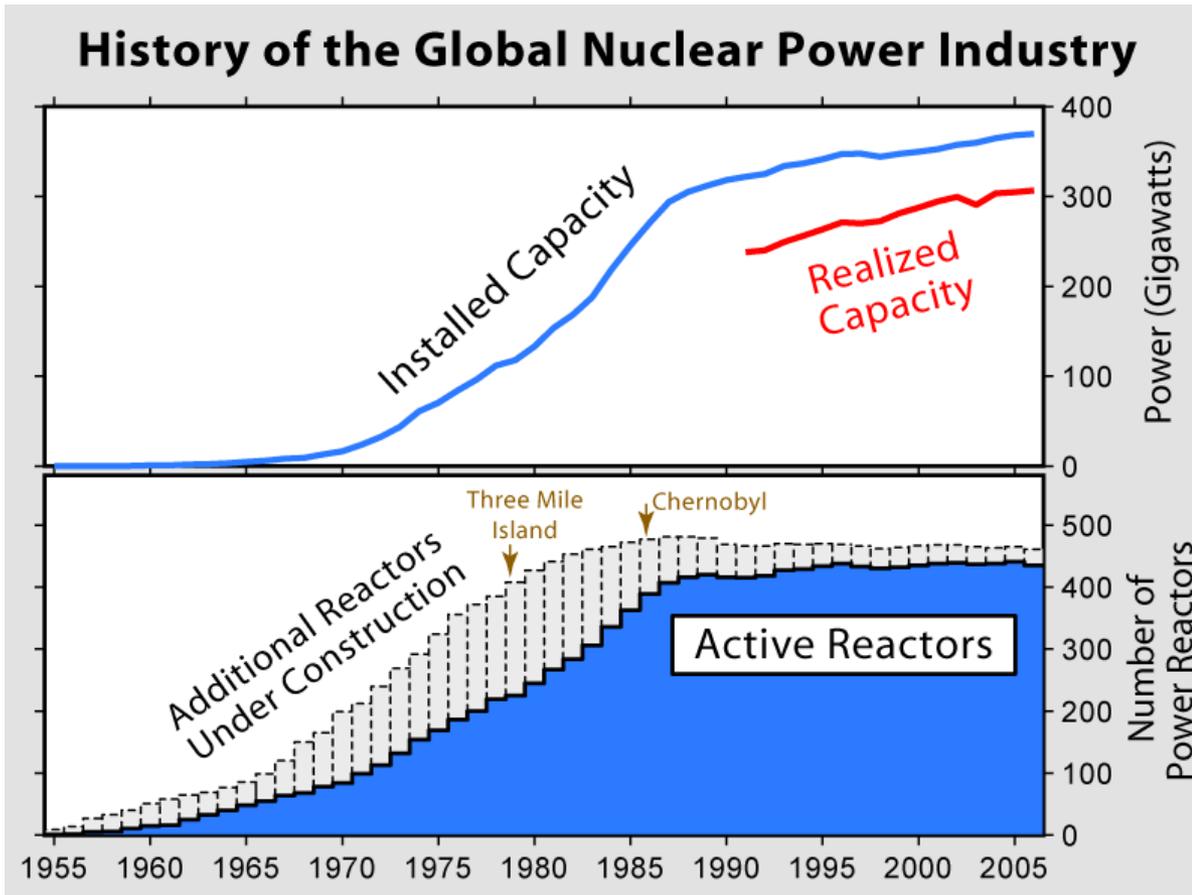


Evoluzione del nucleare

In seguito alla prima crisi del petrolio (1976). Francia e Giappone approvarono un programma energetico basato sul nucleare.

Lo sviluppo del nucleare è stato rallentato a partire dagli anni 80

- dalla grande disponibilità sul mercato di combustibili fossili a basso prezzo
- da trattati di non proliferazione di armi nucleari
- da timori di possibili incidenti, in particolare in seguito ai due incidenti di Three Miles Island (1979) e Chernobyl (1986) .
- dalle difficoltà del pubblico ad accettare siti per lo stoccaggio finale di scorie radiattive prodotte da impianti nucleari

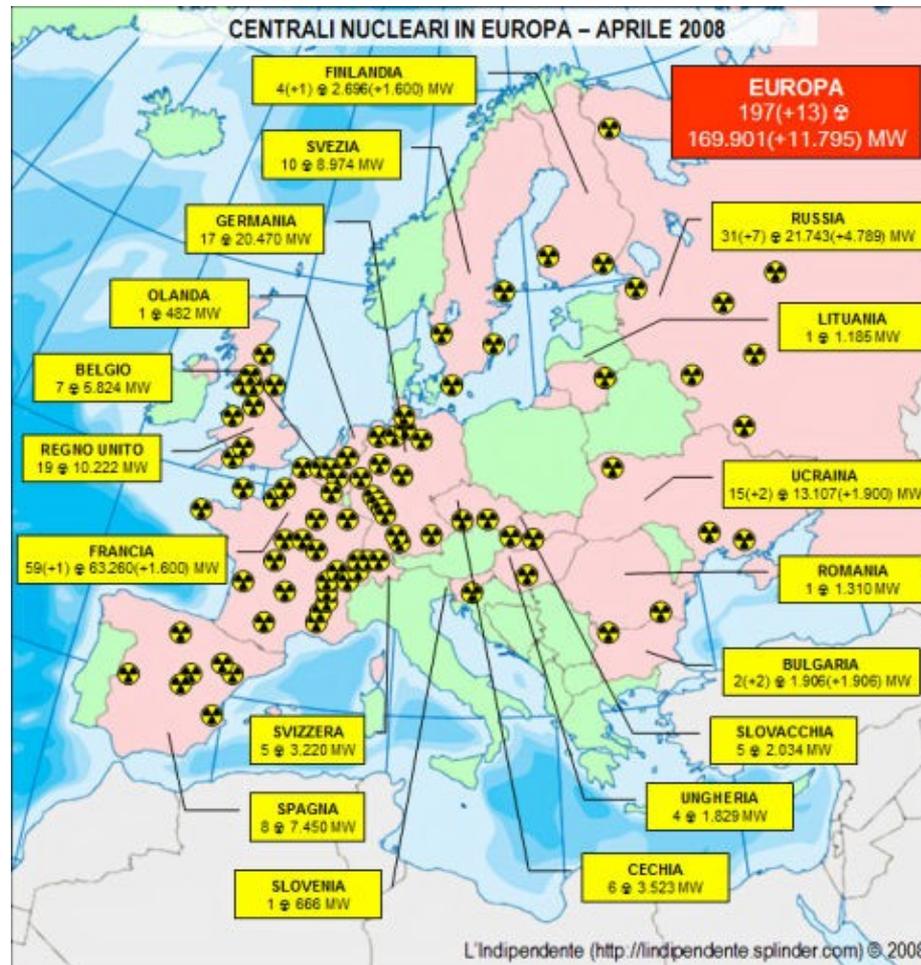


Impianti in operazione in Europa

Sono attualmente in funzione in EU 197 centrali nucleari (+ 13 in costruzione) che erogano una potenza elettrica 170 GW pari a ~ 35% della potenza elettrica complessiva.

Questa percentuale è più alta in alcuni paesi :

Francia	78%
Lituania	70%
Belgio	56%
Slovacchia	55%
Svezia	46%
US	20%
JA	30%



Siti nucleari in Italia

In seguito all' esito del referendum del 1998, la produzione di energia elettrica in centrali nucleari in Italia e' cessata.

Gli impianti disattivati sono ancora esistenti e attualmente utilizzati per lo stoccaggio temporaneo delle scorie radioattive, in attesa della scelta di un sito di stoccaggio definitivo

Il risultato del 98 è stato confermato dal recente risultato di un secondo referendum (2011)

IL NUCLEARE IN ITALIA



Fenomeni fisici associati alla produzione di energia nucleare

L' **energia nucleare** e' prodotta da processi nucleari che trasformano una parte della massa del combustibile in energia

E' possibile produrre energia da due processi nucleari :

- 1) **fissione nucleare**
- 2) **fusione nucleare**

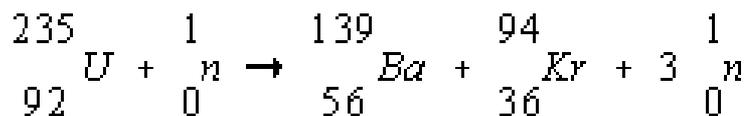
In condizioni di normale funzionamento nessuno di questi processi dissipa scorie nell' atmosfera

Combustibili nucleari : U-238, U-235....

Le risorse di Uranio in natura consistono principalmente di due isotopi di massa

U-238 (99.28%) e **U-235 (0.71%)** .

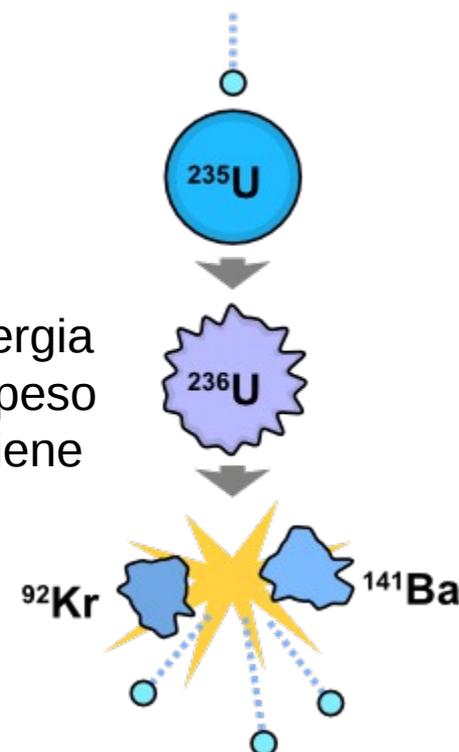
Il nucleo del **U-235** quando colpito da un neutrone di bassa energia ha un' alta probabilità di spezzarsi (**fissione**) in componenti di peso atomico inferiore, generando inoltre un numero di neutroni, e viene pertanto detto un "**isotopo fissile**"



L' U-238 *non è direttamente fissionabile*. Tuttavia, quando interagisce con un neutrone di bassa energia, con una grande probabilità lo assorbe e genera un atomo di U-239, che è un isotopo instabile e decade in Pu-239, che è anch'esso un isotopo fissile.



L' ^{anni}U-238 è detto **isotopo fertile** perché, se irradiato da neutroni produce atomi fissili di Pu-239

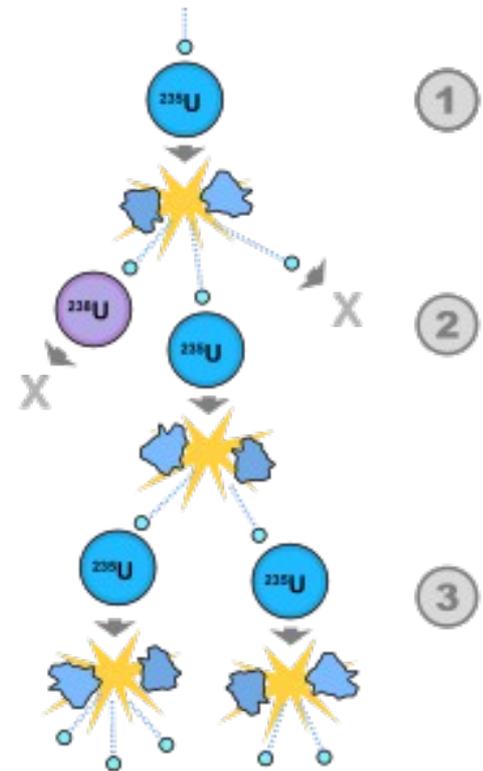


Reazione a catena

Una **reazione a catena** e' una sequenza di fenomeni di fissione successivi, prodotti da successive generazioni di neutroni.

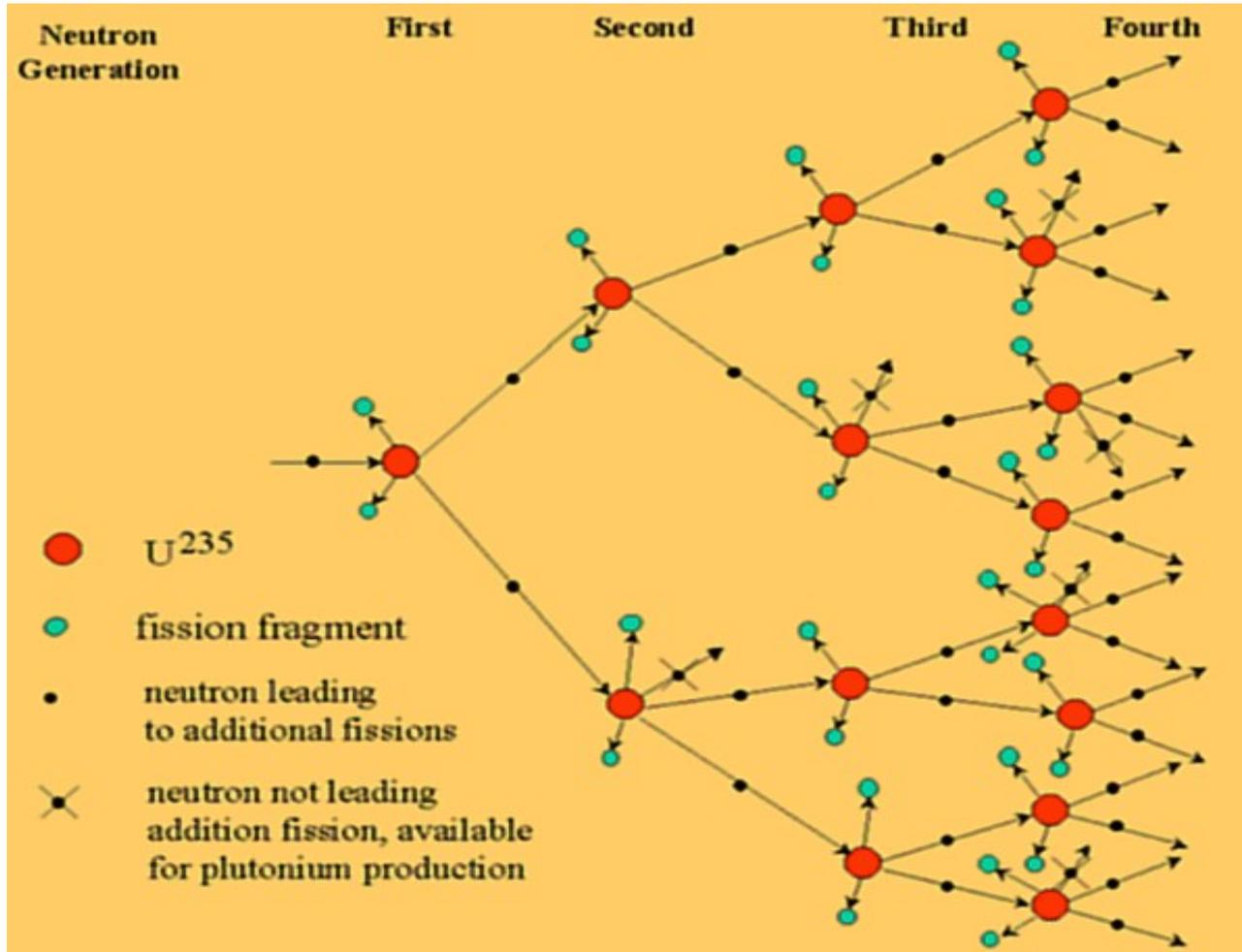
Diversi fattori influiscono sulla **velocita' della reazione**

- Il combustibile deve essere sufficientemente "fertile" ossia la quantità contenuta di isotopi fissionabili deve essere sufficientemente elevata
- Per soddisfare questa condizione, la percentuale di U - 235 del combustibile utilizzato in centrali nucleari viene aumentata artificialmente (**arricchimento**) dal valore naturale (0.7%) a 2-3.5%.
- E' possibile definire una "**massa critica**" di materiale fissile al di sotto della quale la reazione a catena non puo' avvenire



Reazione a catena in un reattore

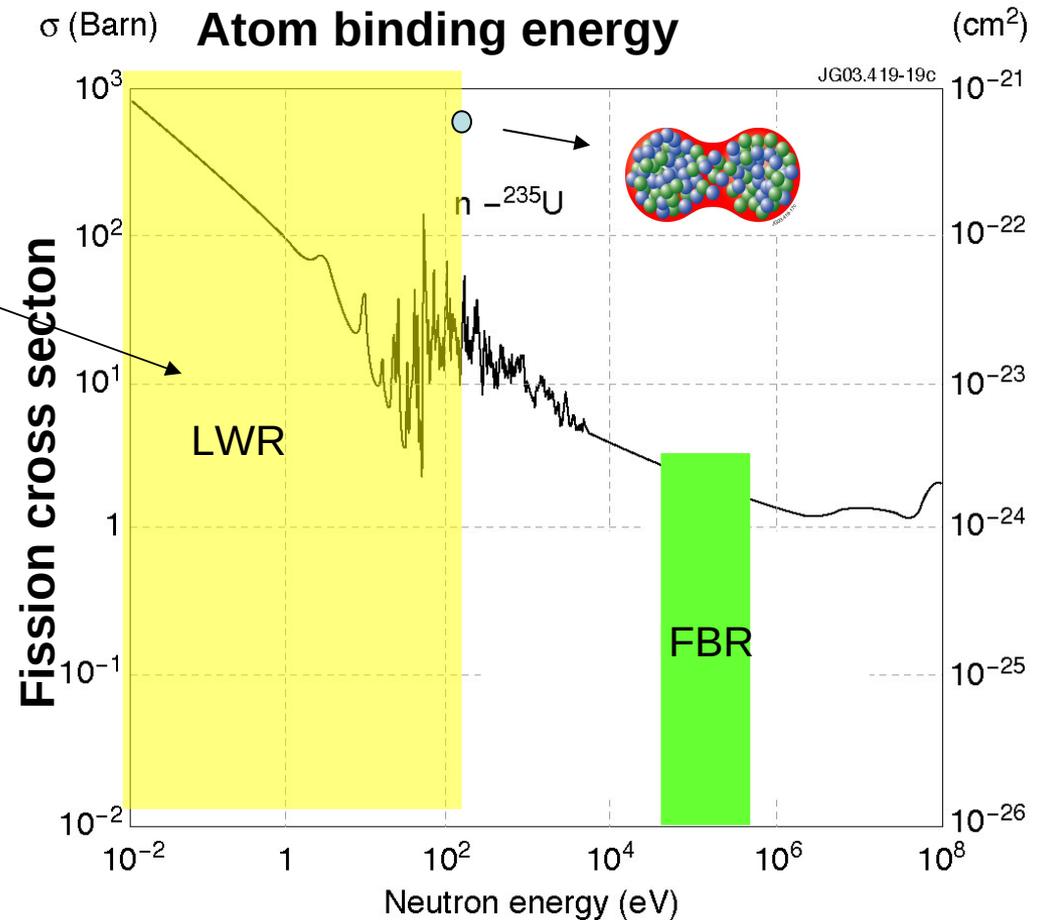
Coefficiente di moltiplicazione neutronica: numero medio di neutroni prodotti in regime stazionario



Controllo della reazione a catena

Un processo di fissione e' un evento stocastico la cui probabilità e' massima quando l' energia del neutrone e' minima (**neutroni termici**).

Per mantenere la reazione a catena è necessario rallentarli facendoli interagire con materiali che contengano nuclei leggeri come H₂O o C (Grafite) detti **moderatori**.



Controllo della reazione a catena

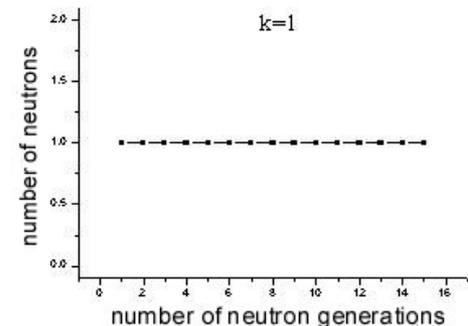
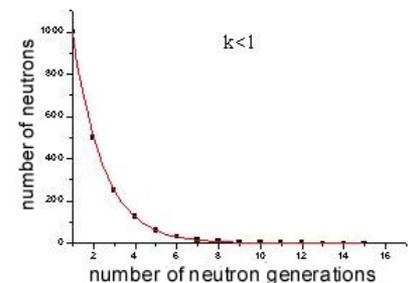
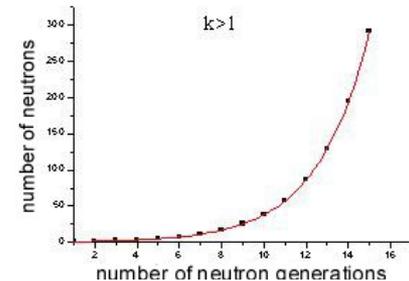
In condizioni di massa critica, utilizzando mezzi di controllo della velocità di reazione è possibile variare *il coefficiente di moltiplicazione neutronica* K ed ottenere:

$K > 1$ - Una crescita esponenziale della potenza del reattore (accensione)

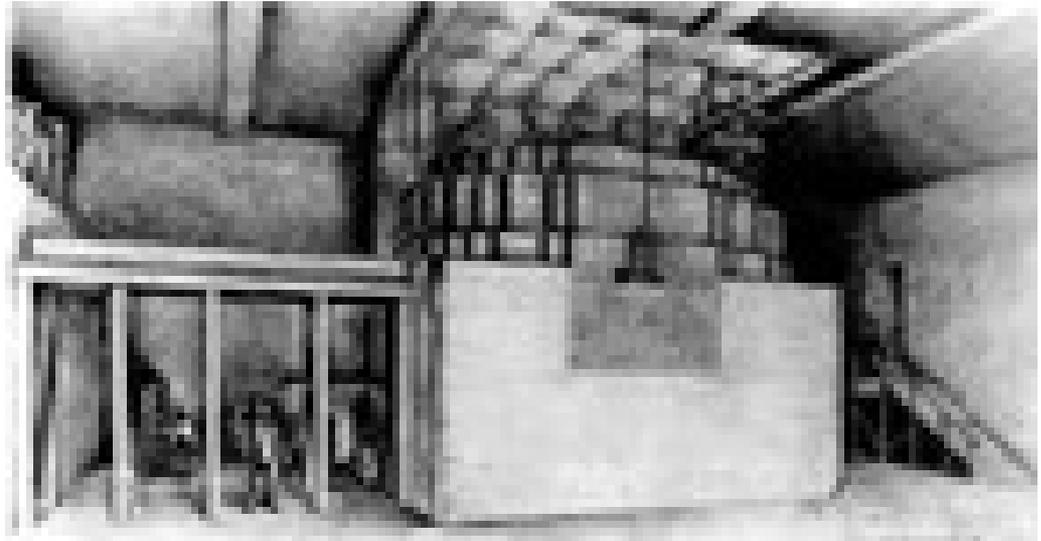
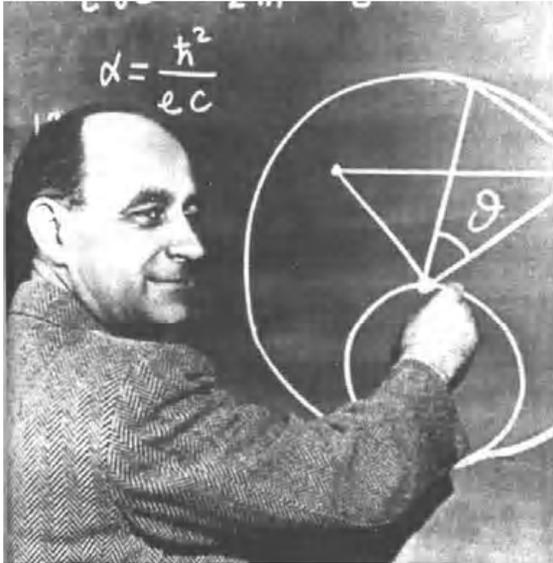
$K < 1$ - Una riduzione esponenziale della potenza prodotta (spegnimento)

$K = 1$ - Il mantenimento di una potenza costante (condizione di normale funzionamento)

Una massa critica richiede che una grande quantità di combustibile nucleare sia immagazzinata nel nocciolo del reattore. Questo fatto costituisce una fonte di rischio .

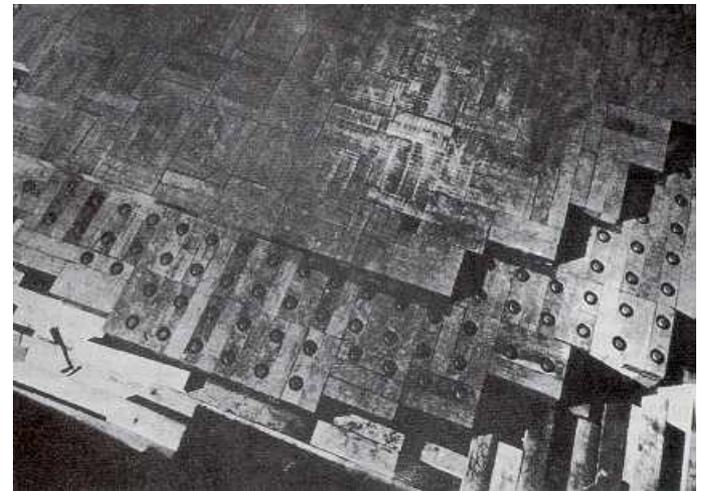


Prima reazione a catena (Stagg Field, Chicago - 1942)



Enrico Fermi (1954)

“Si ritiene che i depositi di uranio ora conosciuti ci potranno fornire energia sufficiente per parecchie migliaia di anni, energia che sarà a disposizione di tutti i popoli della terra perché l’atomo è internazionale, nessuna nazione detiene il monopolio dell’uranio, il monopolio della scienza atomica o il monopolio degli impianti atomici”

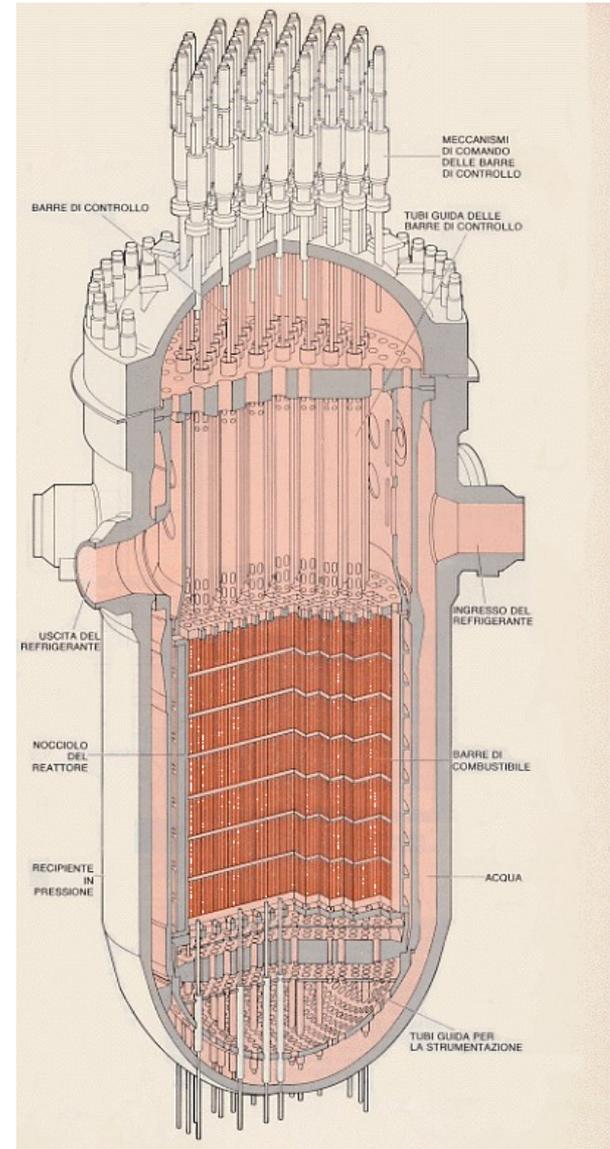


Nocciolo di un reattore a fissione



Nocciolo in fase di montaggio in una centrale PWR da 1300 MW
(una taglia tipica di centrale nucleare)

Università di Torino - Sc
2011-2012



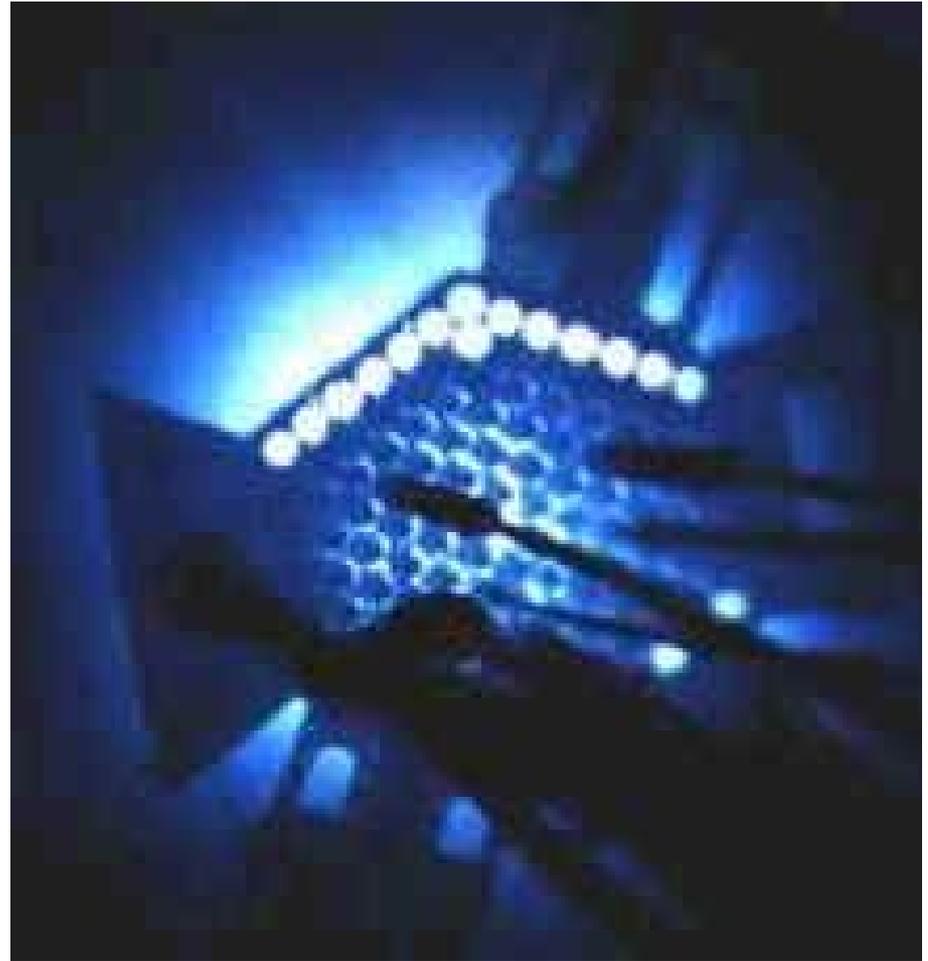
I Superiori AA

Interno del nocciolo di una centrale nucleare a regime

Le dimensioni standard di un nocciolo sono di circa

- circa 5 metri di diametro
- circa 15 metri di altezza

con uno spessore del contenitore di acciaio che varia dai 150 ai 300 mm.



Reazioni a catena autofertilizzanti

Un **reattore autofertilizzante** (*Fast Breeder Reactor* **FBR**) è progettato per ottenere un **rapporto di conversione** $R_c > 1$, cioè per *produrre più materiale fissile* di quanto ne consumi.

Gli R_c tipici dei FBR sono circa 1,2 mentre quelli dei reattori LWR di 1°, 2° e 3° generazione sono di circa 0,6

Il termine **veloce**, associato a questi reattori, indica che i neutroni prodotti da fissione non sono moderati ma interagiscono con i nuclei di materiale fissile con un'energia prossima a quella di generazione (~ 500 keV), mentre nei reattori a neutroni "termici", moderati l'energia cinetica media dei neutroni è inferiore a 1 eV.

Il nocciolo di questo tipo di reattori (detti anche **FBR**, *Fast Breeder Reactor*) è diviso in una parte centrale detta (*seed*), in cui sono contenuti elementi di combustibile U-Pu *fortemente arricchiti*, e una periferia (*blanket*) che circonda il seme e contiene elementi di combustibile di U-238 che si arricchisce lentamente di Pu, attraverso la fertilizzazione dei nuclei di uranio.

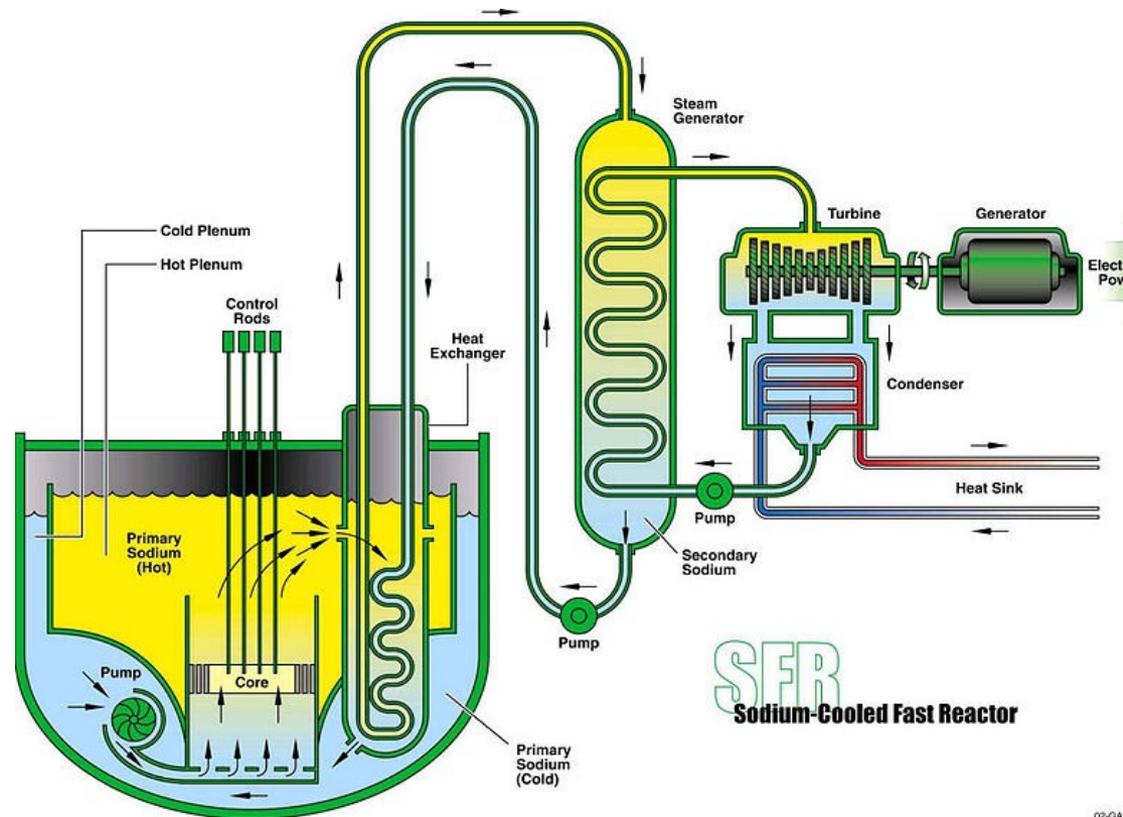
Entrambe le zone del nocciolo generano energia, ma mentre nel *blanket* la concentrazione di Pu aumenta, nel *seed* diminuisce, per la maggiore probabilità di avere un evento di fissione rispetto a una cattura che originerà la fertilizzazione.

Complessivamente, la densità di potenza di un nocciolo di un reattore veloce è più grande di quella in un reattore termico; per questo il refrigerante deve avere un'alta capacità di asportare calore.

Esclusa l'acqua, che modera i neutroni, storicamente ci si è rivolti verso l'impiego di metalli fusi: il più comunemente usato finora è il Sodio, che viene mantenuto allo stato fuso sia dal calore prodotto nel nocciolo che da appositi riscaldatori elettrici in fase di fermata dell'impianto.

I reattori veloci hanno bisogno, per il seme, di una frazione fissile molto elevata: per usare uranio come combustibile è necessario arricchirlo fino al 20% di ^{235}U . Si usa come alternativa più economica come combustibile del seme una miscela di 80% uranio naturale e 20% di plutonio.

Nel mantello invece si può usare sia uranio arricchito sia uranio naturale. Periodicamente, gli elementi del seme e del mantello devono essere estratti e riprocessati.



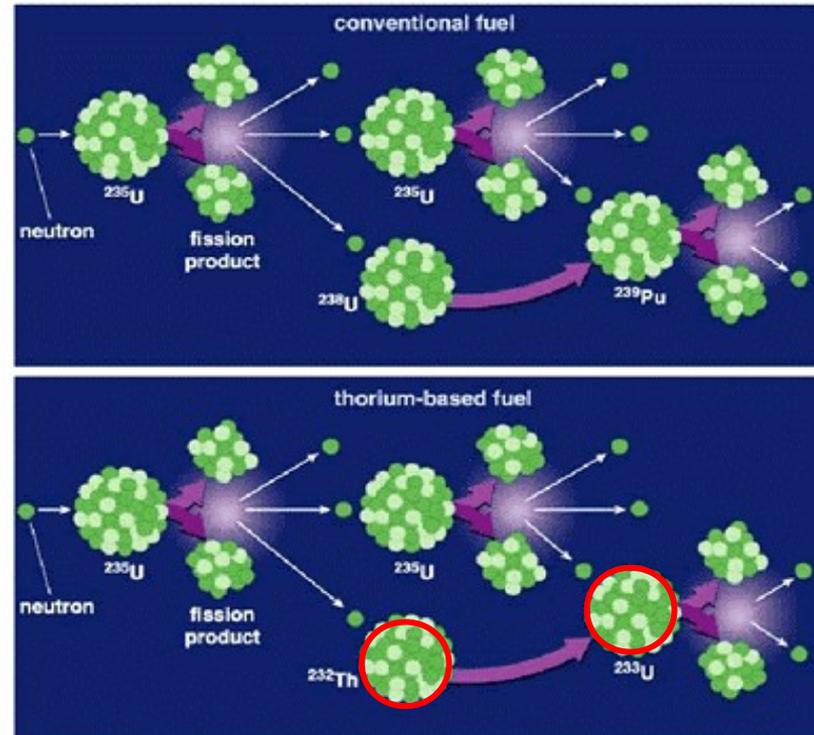
Ciclo del Torio

Il fenomeno della "autofertilizzazione" può essere ottenuto anche in reattori a neutroni termici. Deve tuttavia essere utilizzato un "combustibile" differente, a base di **Torio** anziché di Uranio.

Il Torio (Th) si trova in natura quasi al 100% come Th-232 che, al contrario dell'U-235, non è *fissile*, ma è un isotopo *fertile* come l'U-238: assorbendo un neutrone si trasforma in U-233 fissile (*breeding reaction*).

Rispetto all'U-238, il Th-232 presenta due vantaggi:

- è tre volte più abbondante in natura dell'U-238;
- può dar luogo a fertilizzazione *con neutroni termici*, per cui il suo utilizzo non necessita della costruzione di reattori veloci



Questa capacità di *breeder* termico ha destato, sin dagli albori dell'era nucleare, un grande interesse verso l'utilizzo del **Torio** come combustibile in reattori nucleari termici: la centrale nucleare di Shippingport, operativa dal 1977 al 1982 è stato un esempio di *Light Breeder Reactor*.

L'uso di neutroni "lenti" comporta diversi vantaggi,

- minore sollecitazione termica e minore attivazione dei materiali di contenimento
- ridotti rischi di proliferazione dell'uranio (produzione di plutonio) poiché i combustibili a base di torio producono plutonio in quantità molto minore.
- Inoltre il Pu ottenuto riprocessando il combustibile dei LWR è costituito da un 25% di Pu-240, molto instabile ed estremamente difficile da separare. Può essere facilmente usato come ulteriore combustibile nucleare ma non è adatto alla produzione di ordigni nucleari.
- Un reattore autofertilizzante produce direttamente Pu - 239 "weapon grade", (cioè con meno del 10% di Pu- 240 che fornisce pertanto materiale per ordigni nucleari .

Output energetico per evento di produzione di energia

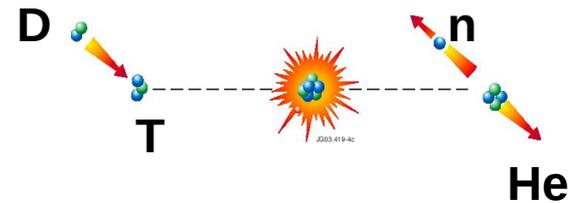
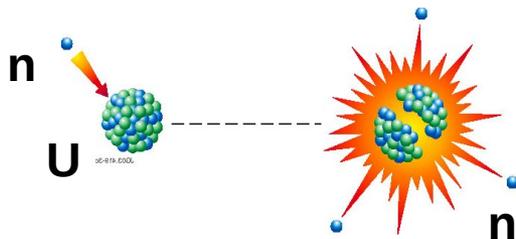
Processi di ossidazione



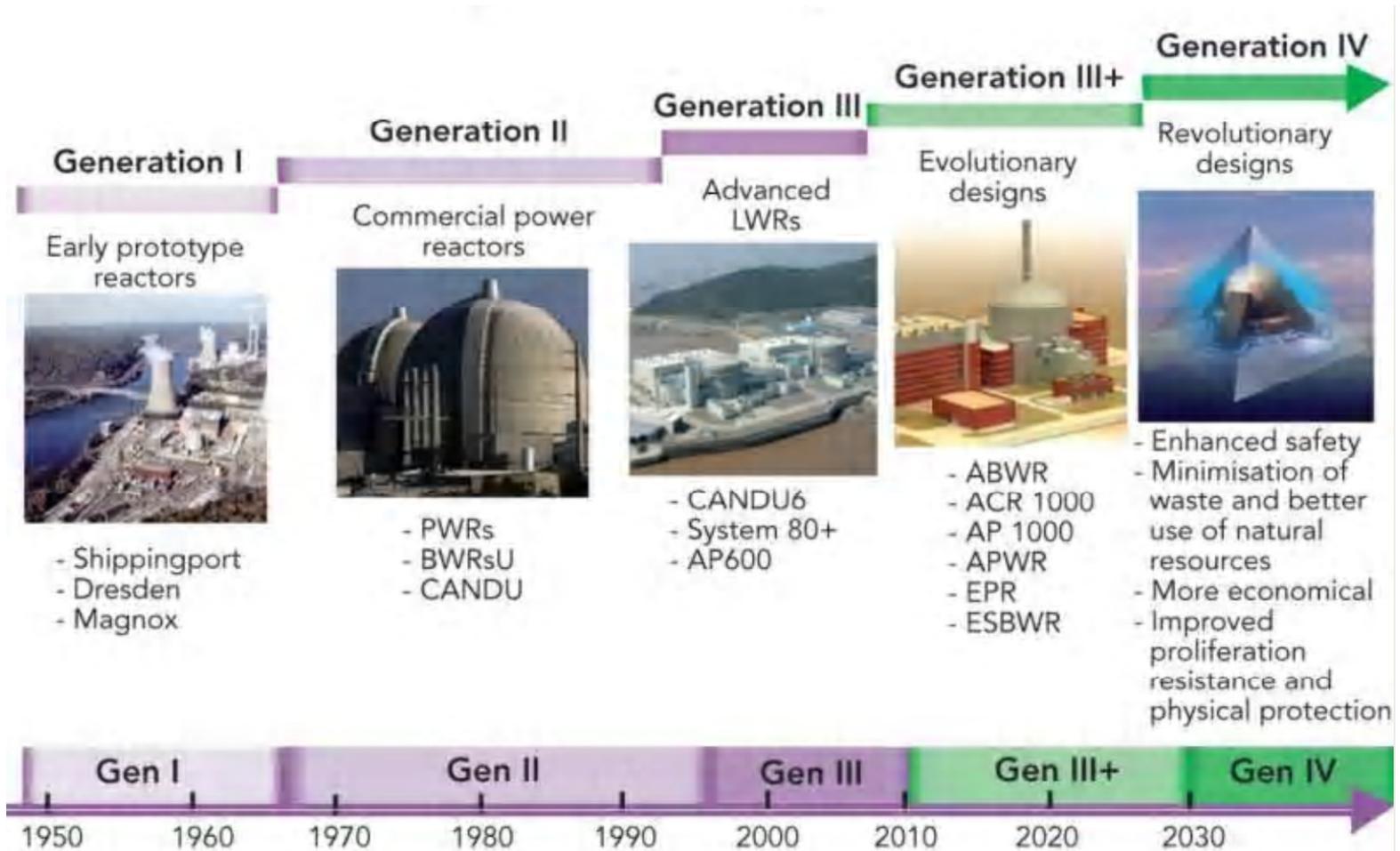
~ 1 eV /processo

Processi nucleari

~ 10⁶ eV /processo

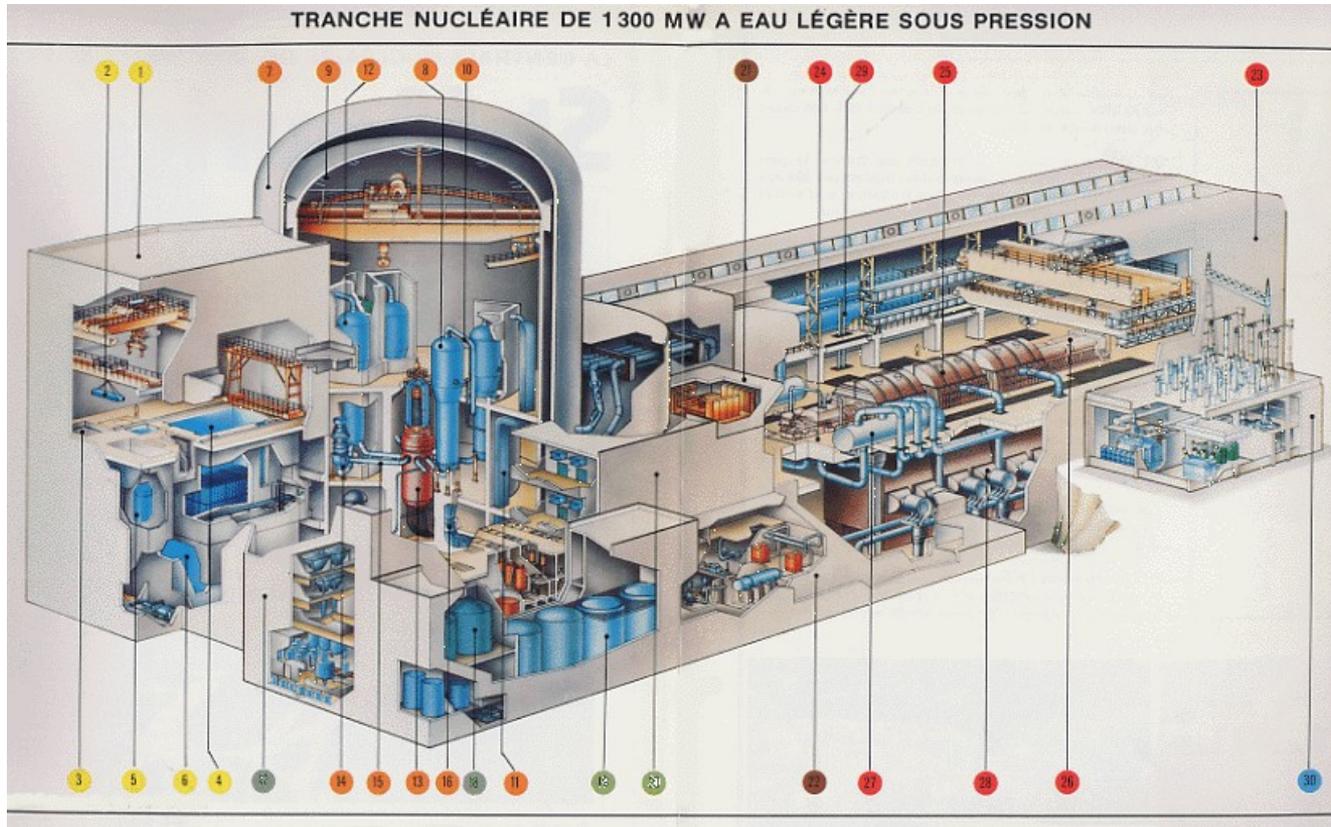


Generazioni di reattori a fissione



Source: adapted from NEA (2008).

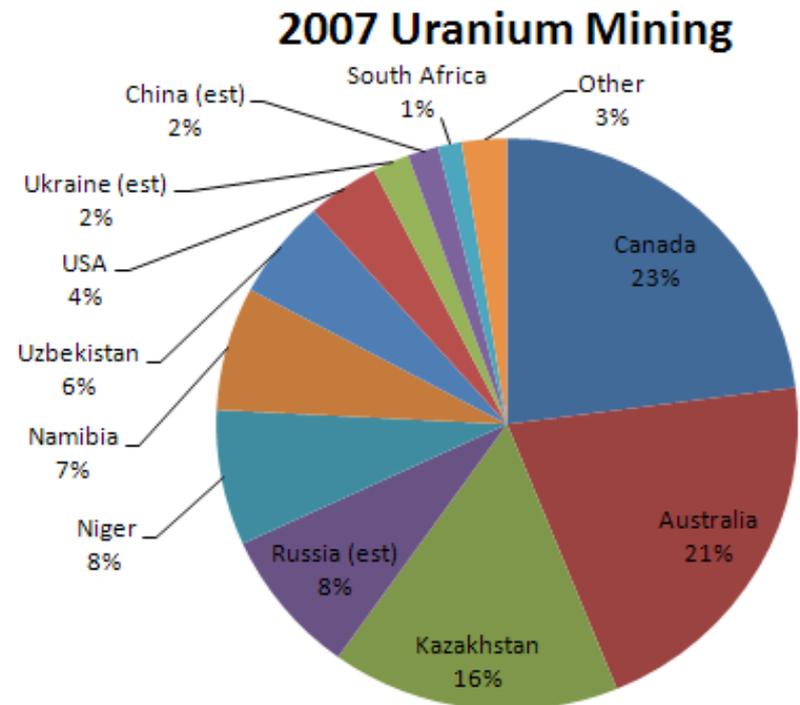
Centrale nucleare per produzione elettrica



Risorse naturali di U₂₃₈

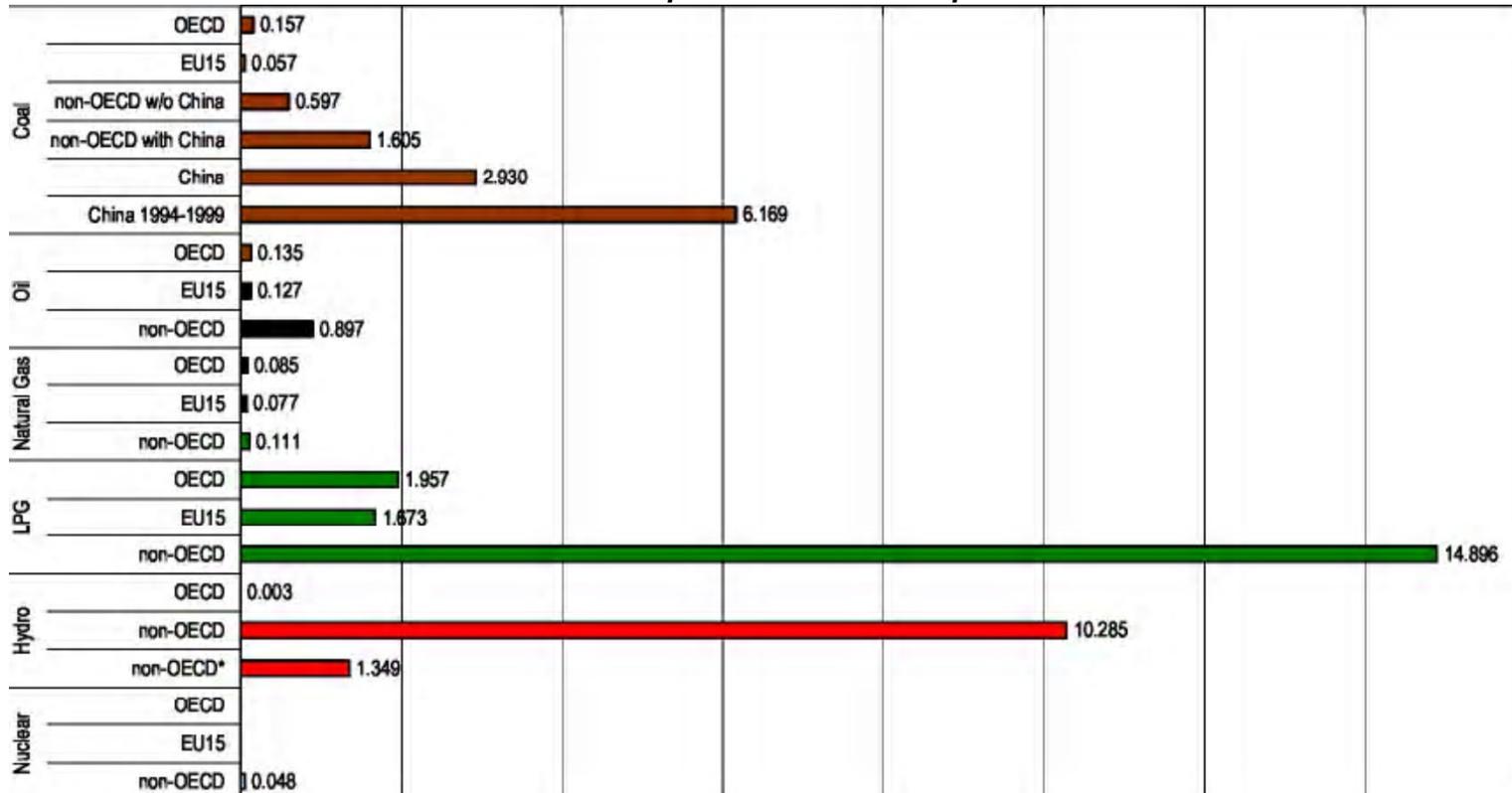
- 5.5 Milioni di tonnellate di risorse identificate
- 16 milioni di tonnellate di risorse convenzionali
- 22 milioni di tonnellate di risorse non convenzionali (per esempio come sottoprodotto dell'industria dei fosfati)
- 4 Miliardi di tonnellate nell'acqua del mare
- Consumo attuale annuale: 0,068 milioni di tonnellate di Uranio

Risorse di Torio: 3 volte più abbondante dell' Uranio



Prericolosità di funzionamento

Fatalities per GWanno prodotti



* Idroelettrico con e senza incidenti di Banqiao and Shimantan (1975) 160,000 deaths

Scorie radioattive

La quantità di scorie prodotte da un reattore a fissione è modesta, in peso, se paragonata a quella generata in proporzione dagli impianti di sfruttamento dei combustibili fossili:

Un tipico reattore a fissione da 1000 MW produce ogni giorno

- circa 3,2 kg di scorie
- circa 30 tonnellate di scorie radioattive in 30 anni

A parità di energia erogata, le scorie solide generate da un impianto di combustione del carbone producono circa 8 milioni di tonnellate, vale a dire a una quantità in peso *200.000 volte superiore*.

Le tecniche di riprocessamento delle scorie prevedono un primo trattamento chimico o meccanico di riduzione del volume e un successivo stoccaggio in contenitori di acciaio inox, con diluizione del materiale fissile in materiali inerti. Per alcuni tipi di scorie si procede preventivamente alla “vetrificazione”.

I siti geologici più adatti ad accogliere materiali radioattivi sono le formazioni granitiche compatte o formazioni argillose a permeabilità molto bassa.



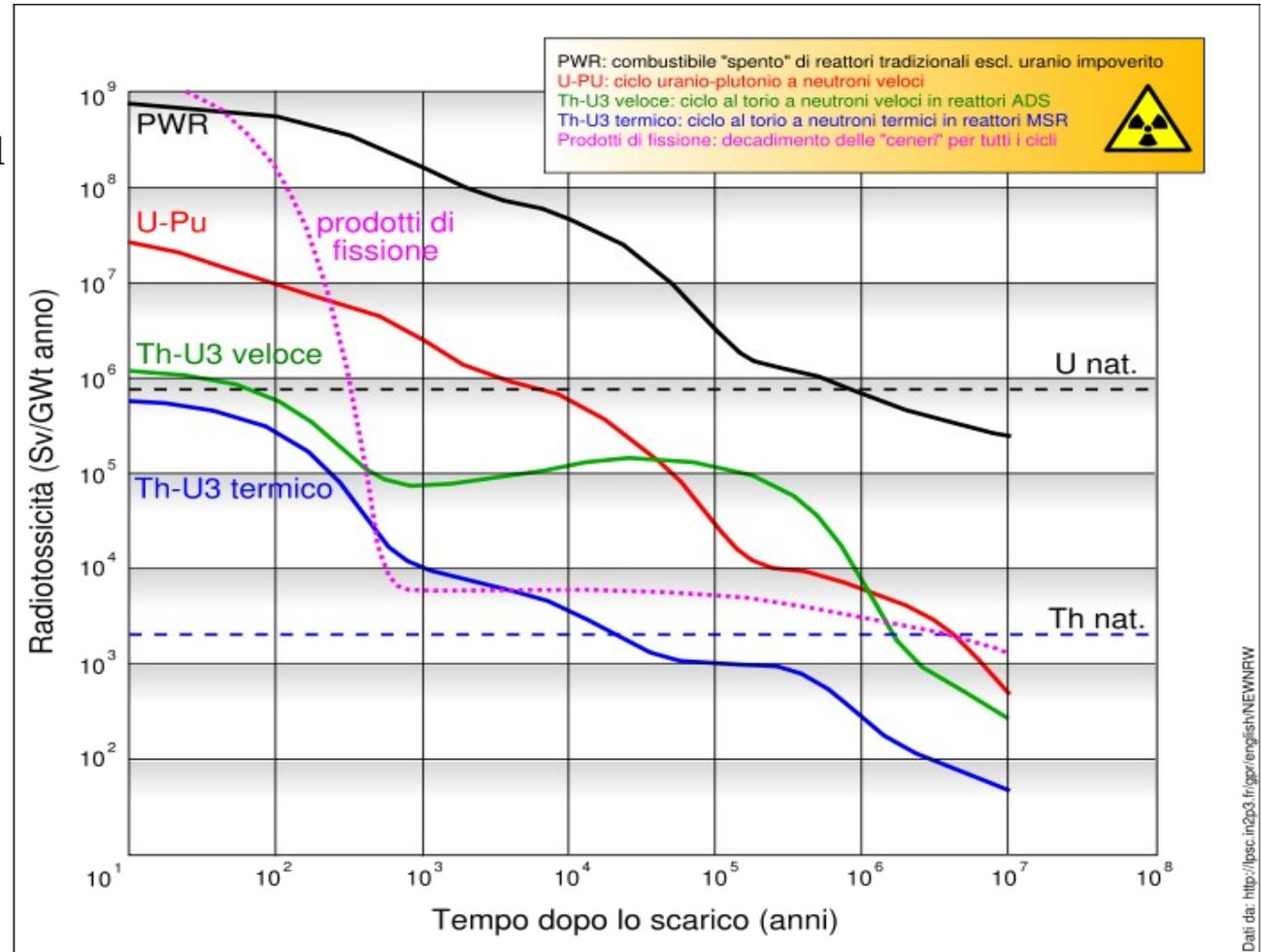
Una immagine significativa delle quantità in gioco mostra la quantità di rifiuto ad alta attività derivante dal combustibile che ha prodotto l'energia elettrica di cui ha bisogno una persona di un paese avanzato per tutta la vita (600 cm³ di scorie totali, 20 cm³ di scorie ad alta attività)

Decadimento radiattivo di materiale fissile

Radiotossicità (in Sv per GW termico all'anno) del combustibile esausto scaricato dai reattori

Curva rossa:
reattori veloci U-PU

Curva verde: reattori veloci al Th



Incidenti nucleari con emissioni radiattive



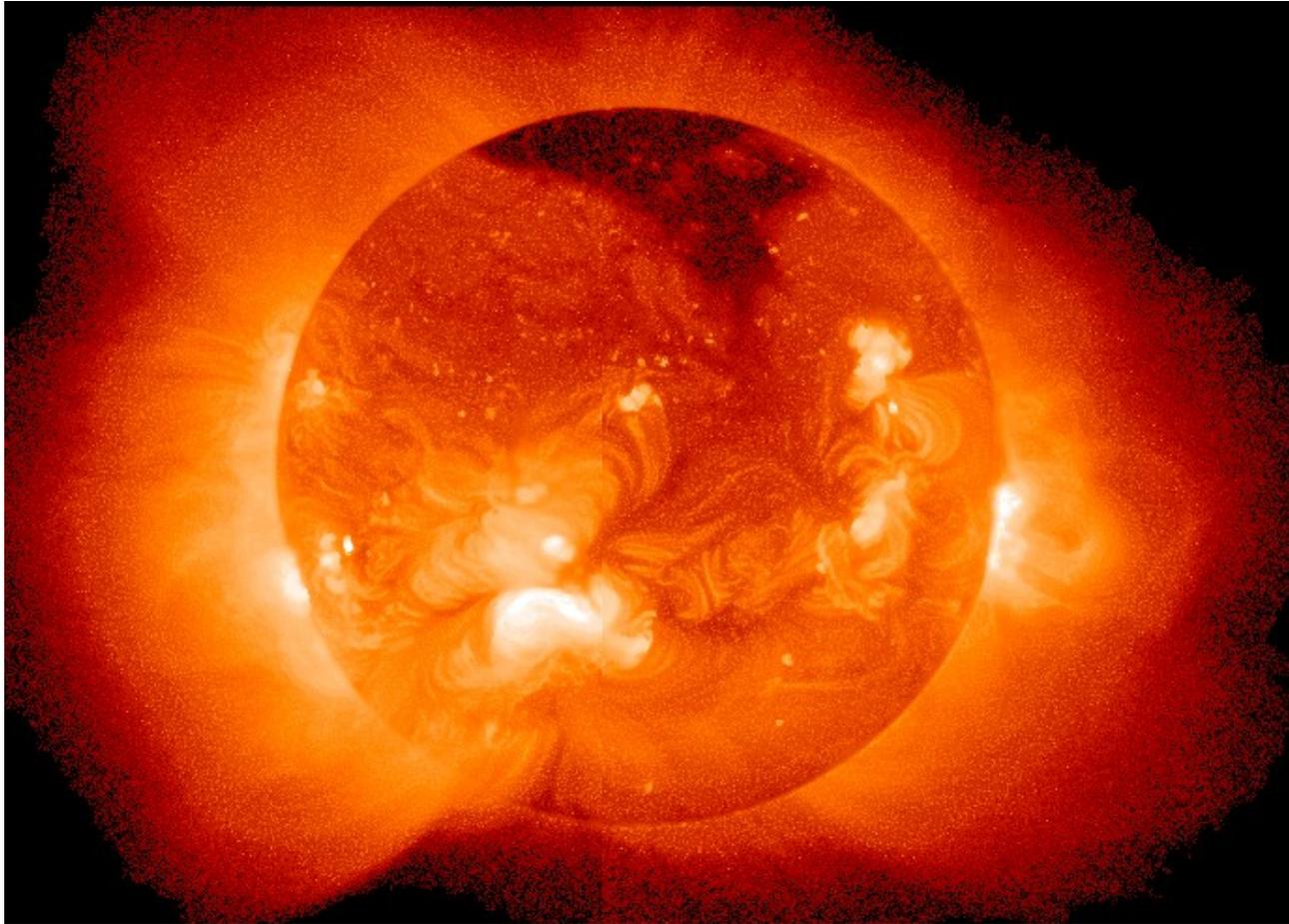
Fukushima.(2011) La centrale nucleare si trova in Giappone



Chernobyl.(1986) La centrale nucleare si trova tra l'Ucraina e la Bielorussia.

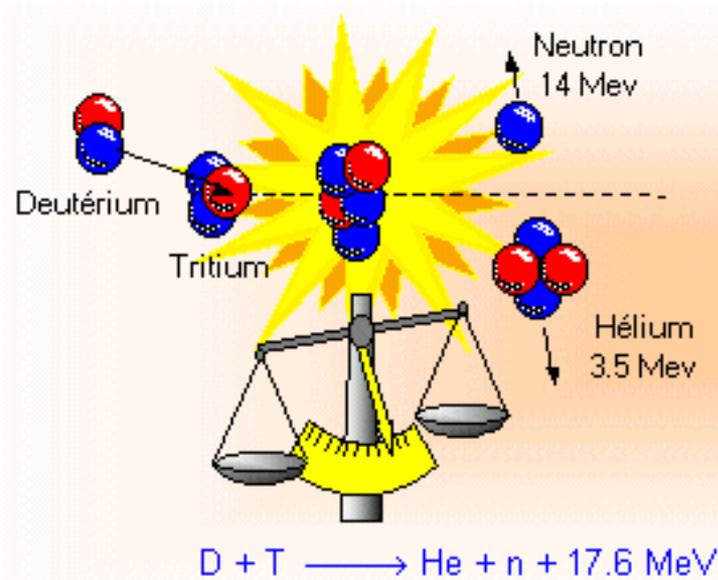
Fusione Nucleare

La fusione nucleare è la fonte primaria di energia della terra. Sono infatti i processi di fusione nucleare generati nel Sole che hanno alimentato per milioni di anni l'irraggiamento solare che è alla base i processi biologici di fotosintesi vegetali e la catena alimentare animale .

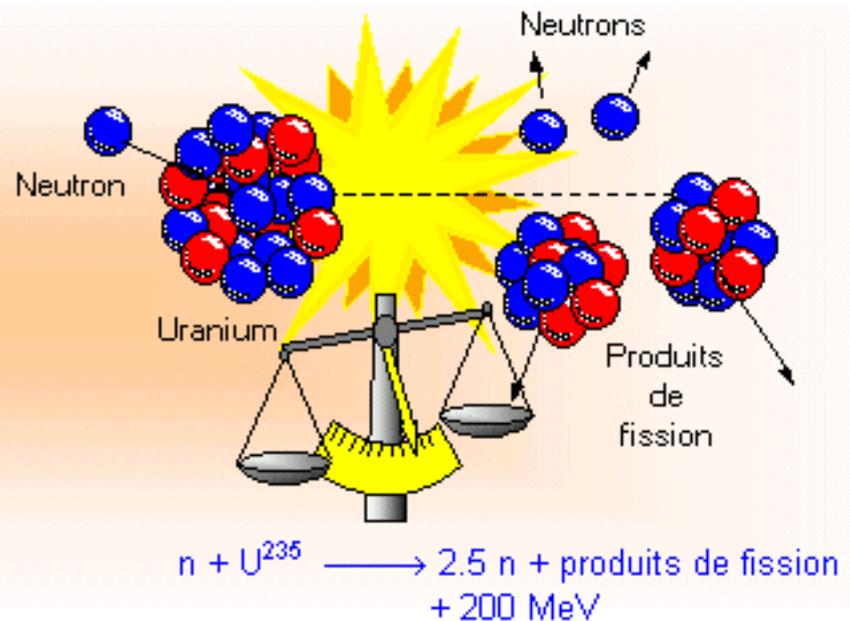


Principio fisico della Fusione nucleare

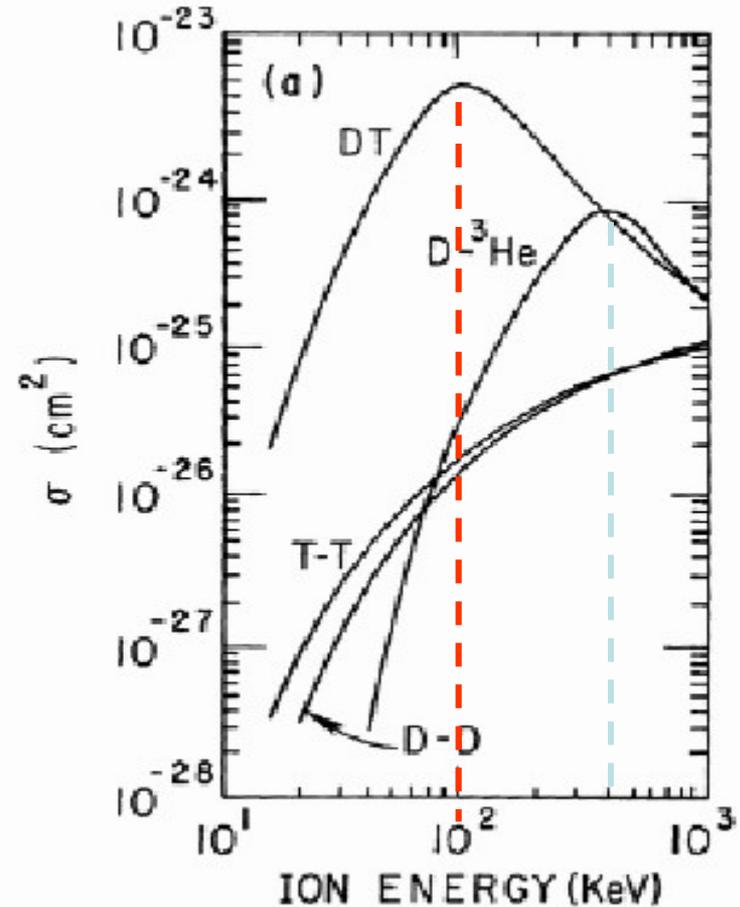
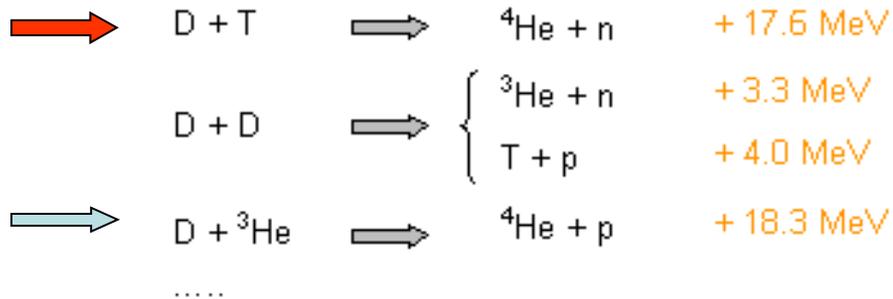
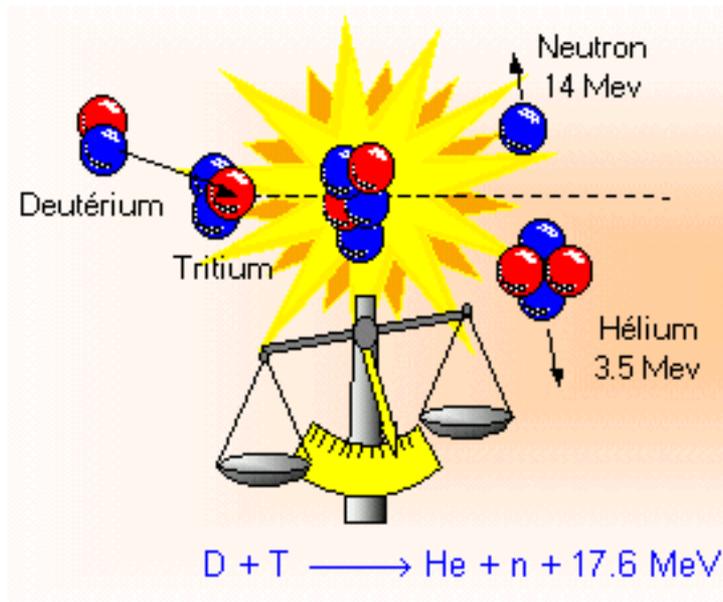
Reazione di fusione



Reazione di fissione



Reazioni di Fusione

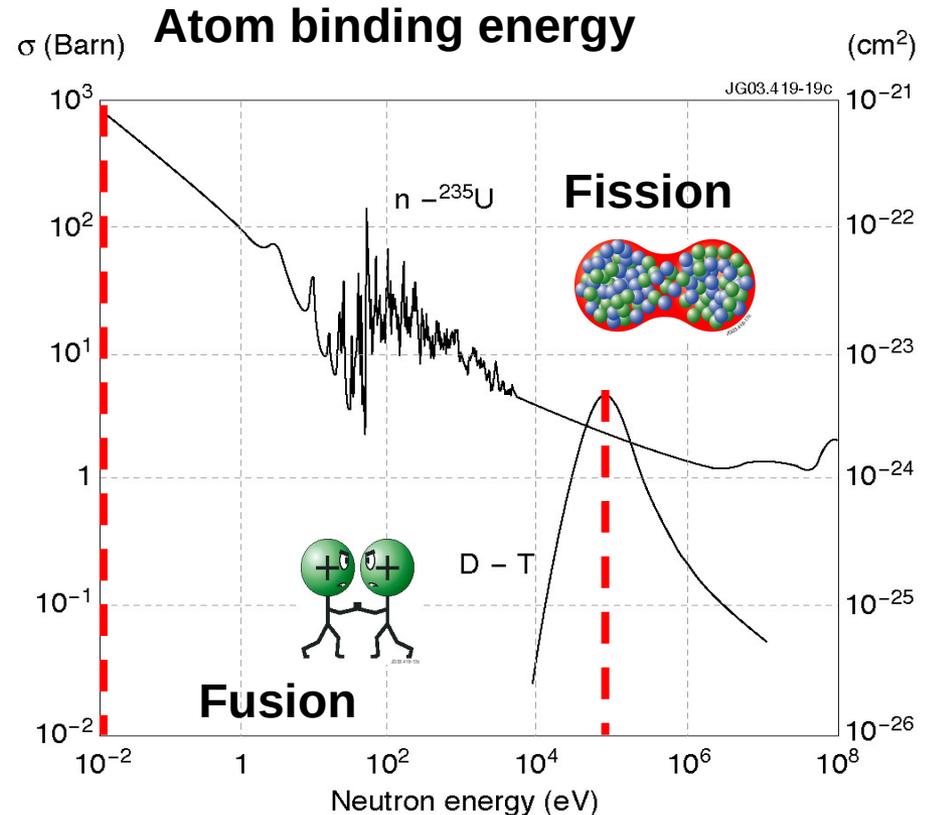


Fissione e fusione

La fissione è una reazione nucleare il cui portatore è un neutrone di bassa energia, che quindi può penetrare nei nuclei della materia a distanze di interazione nucleare

La fusione è una reazione che avviene tra nuclei che contengono cariche elettriche dello stesso segno (protoni) che si respingono e impediscono l'avvicinamento a distanze di interazione nucleare

È pertanto necessario conferire dall'esterno alle particelle un'energia sufficiente a superare questa barriera elettrostatica per produrre eventi di interazione di fusione

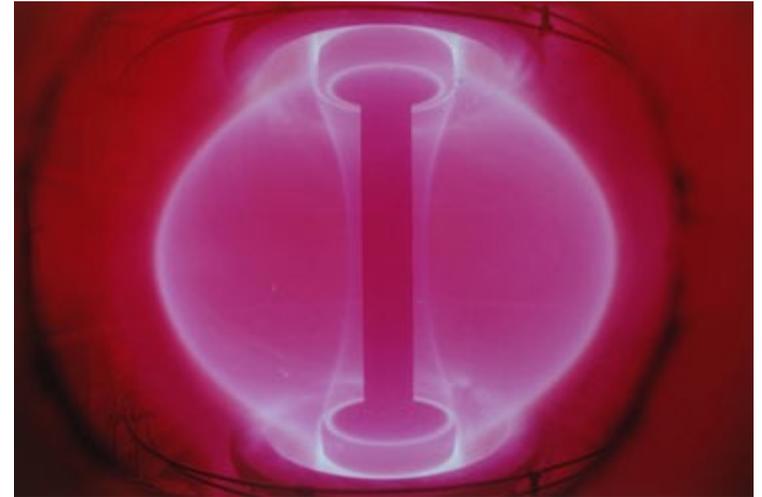


Confinamento del plasma

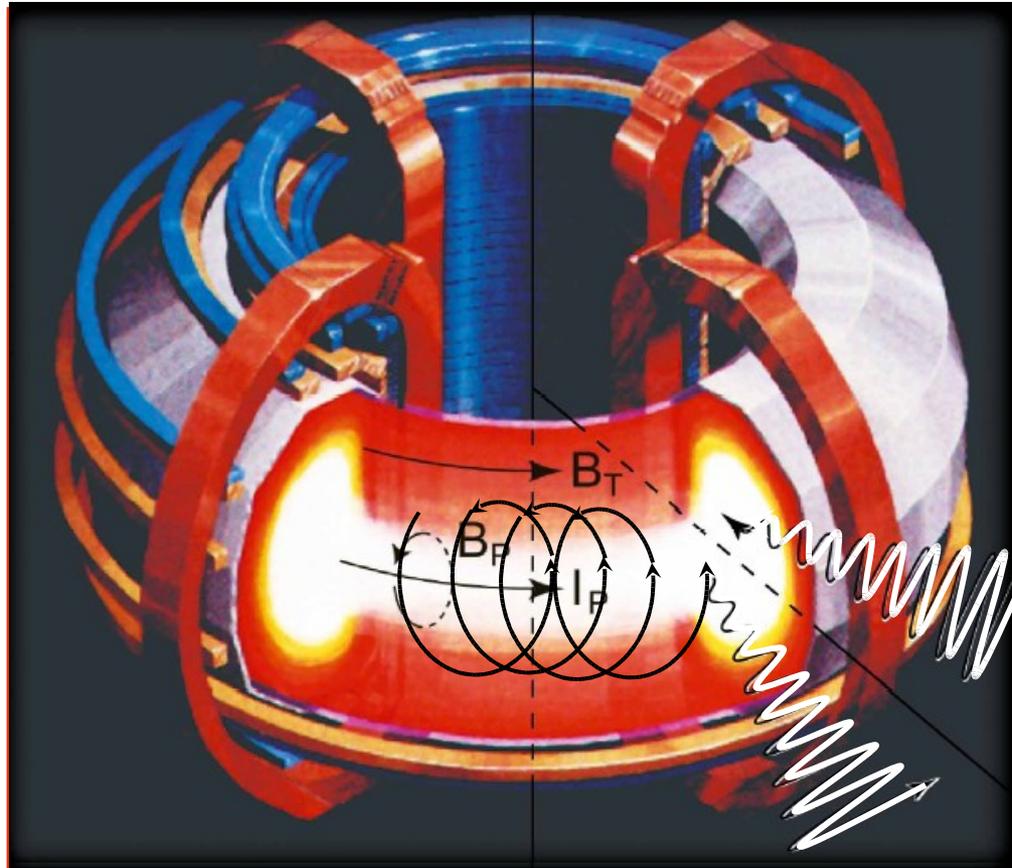
Ad un' energia di 100 keV lo stato della materia e' quello di un gas molto caldo e completamente ionizzato detto plasma.

La temperatura tipica di un plasma di interesse fusionistico è di *100 milioni di gradi*

Un plasma termonucleare non può pertanto essere a contatto con le pareti di un contenitore meccanico, ma deve essere confinato nel vuoto ad una certa distanza dal contenitore per minimizzare gli scambi termici



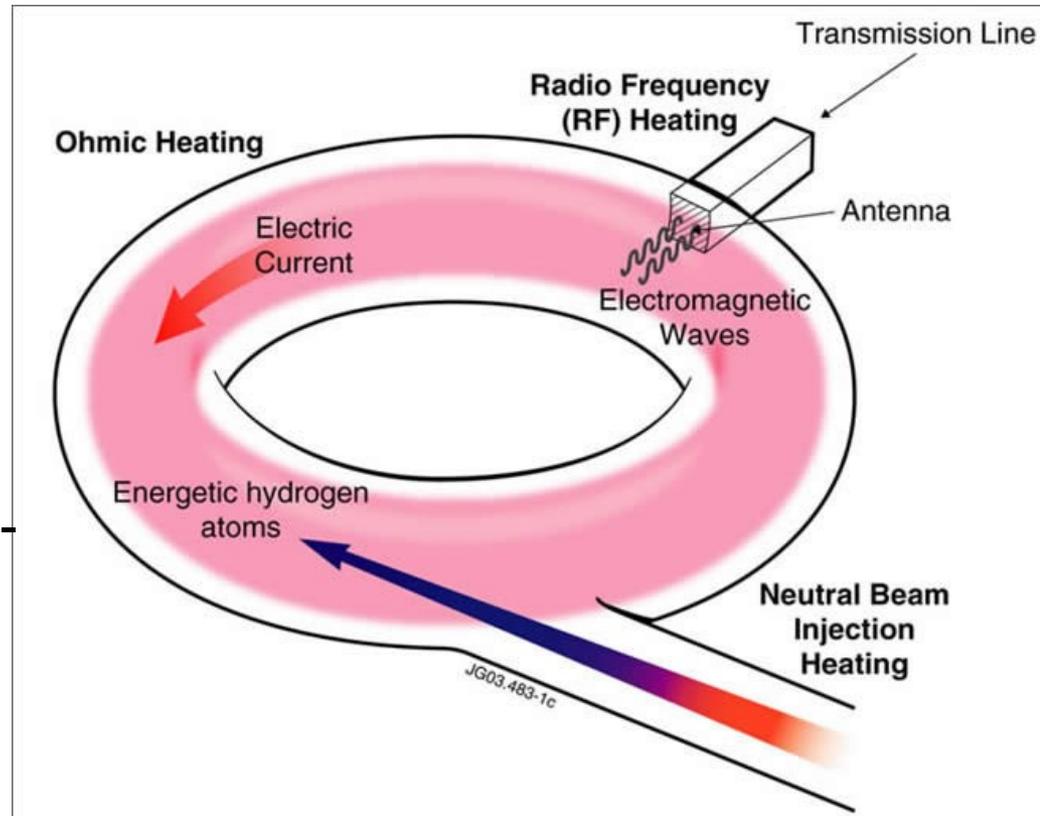
Principio di confinamento magnetico



Riscaldamento
ausiliario

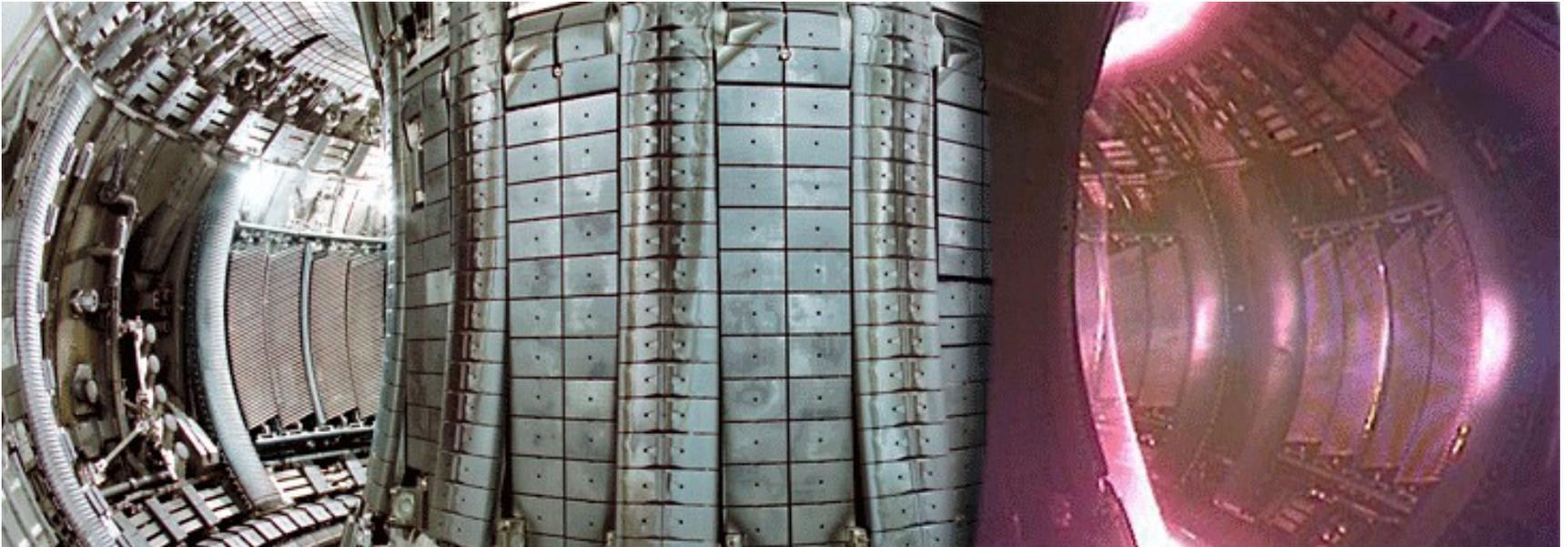
Metodi di riscaldamento del plasma

- Riscaldamento ohmico
- Iniezione di fasci di particelle neutre di alta energia
- Iniezione di onde elettromagnetiche
- In un plasma *ignito* il riscaldamento è fornito dalle particelle α (He) risultanti dai processi di fusione.



Interno del JET

Il JET /Joint European Torus (Culham, Oxfordshire, UK) e' il tokamak più performante finora costruito. Ha prodotto potenze di fusione fino ad un massimo di 15 MWatt.



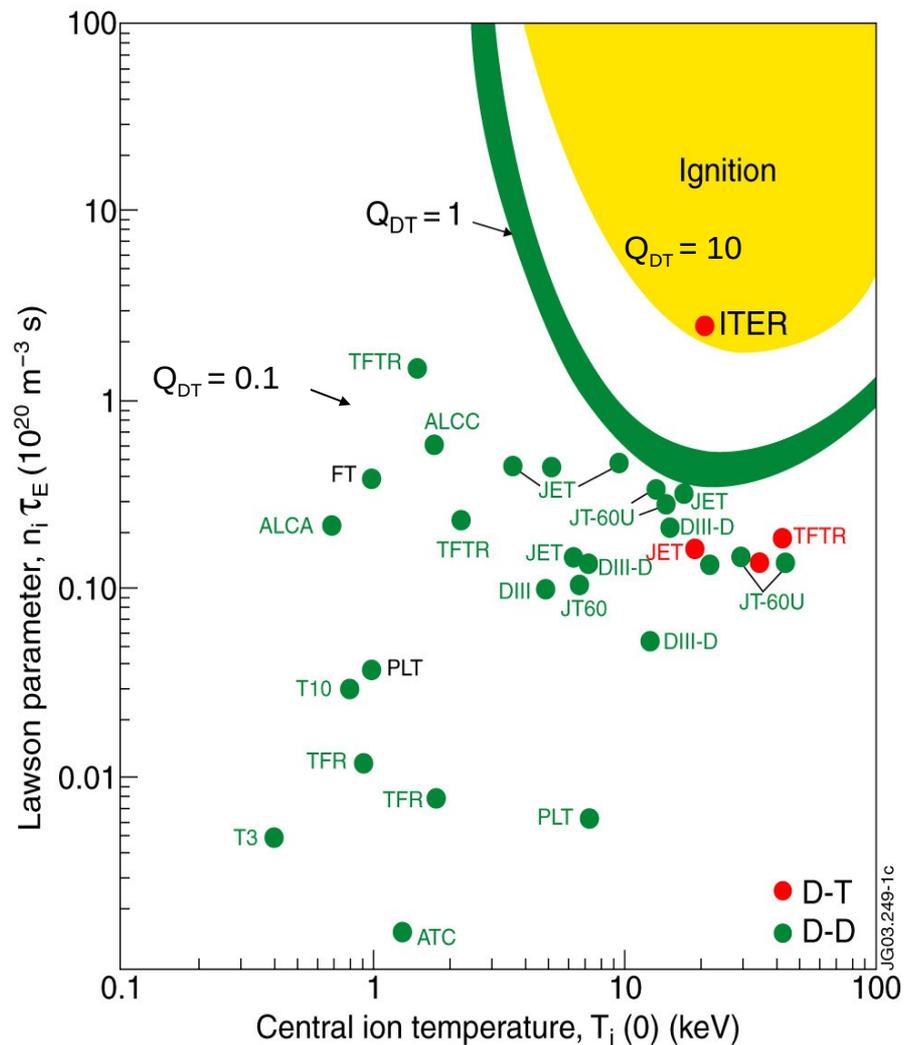
Quanto è lontano un reattore a fusione?

$$Q_{DT} = \frac{\text{Potenza in uscita}}{\text{Potenza in ingresso}}$$

Nota

La *potenza in ingresso* e' quella necessaria a riscaldare il plasma a temperature termonucleari

Se $Q_{DT} > 30$ i prodotti di fusione (particelle α) sono in grado di fornire il riscaldamento ausiliario (funzionamento auto-sostenuto)

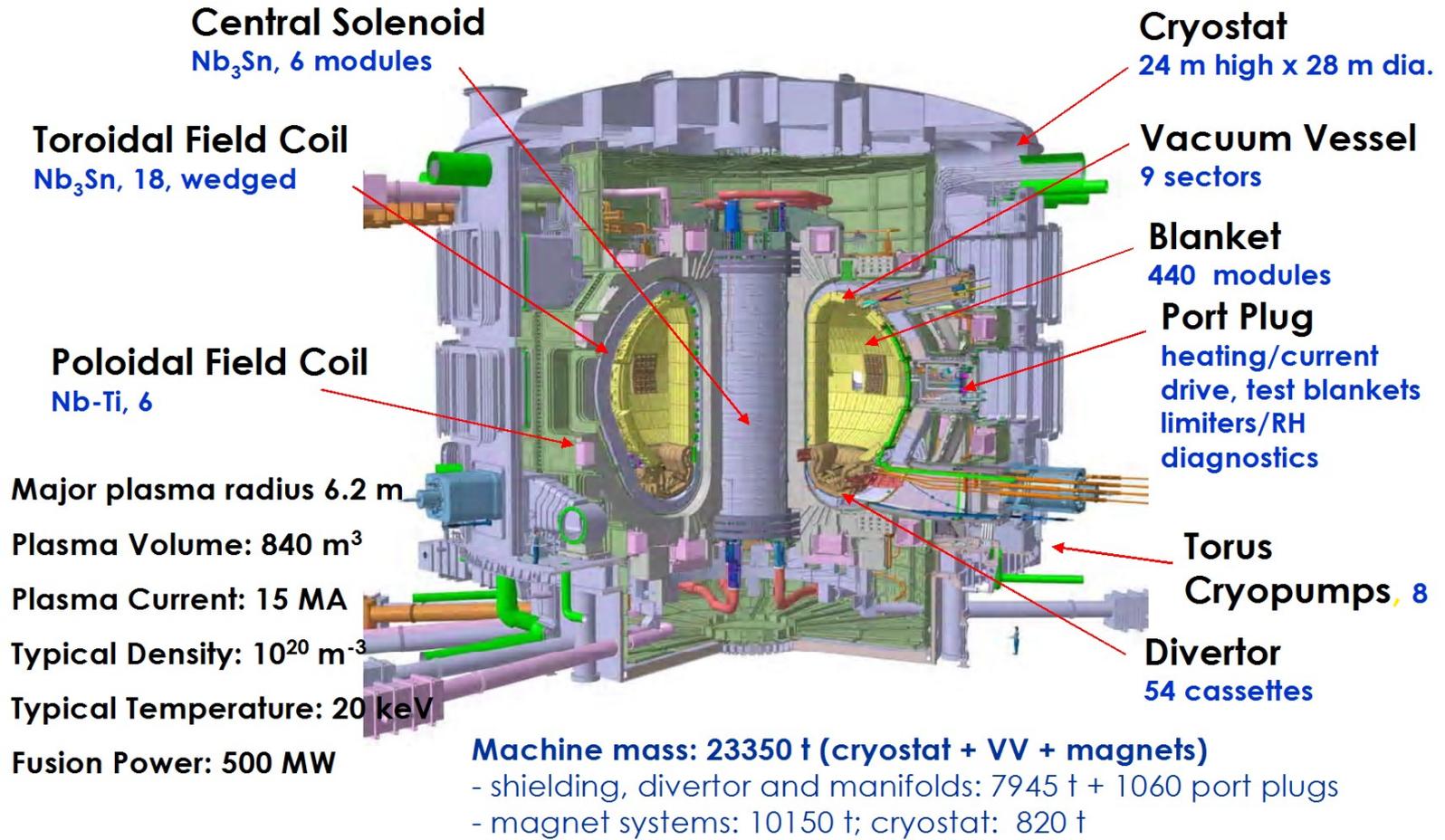


Il progetto ITER

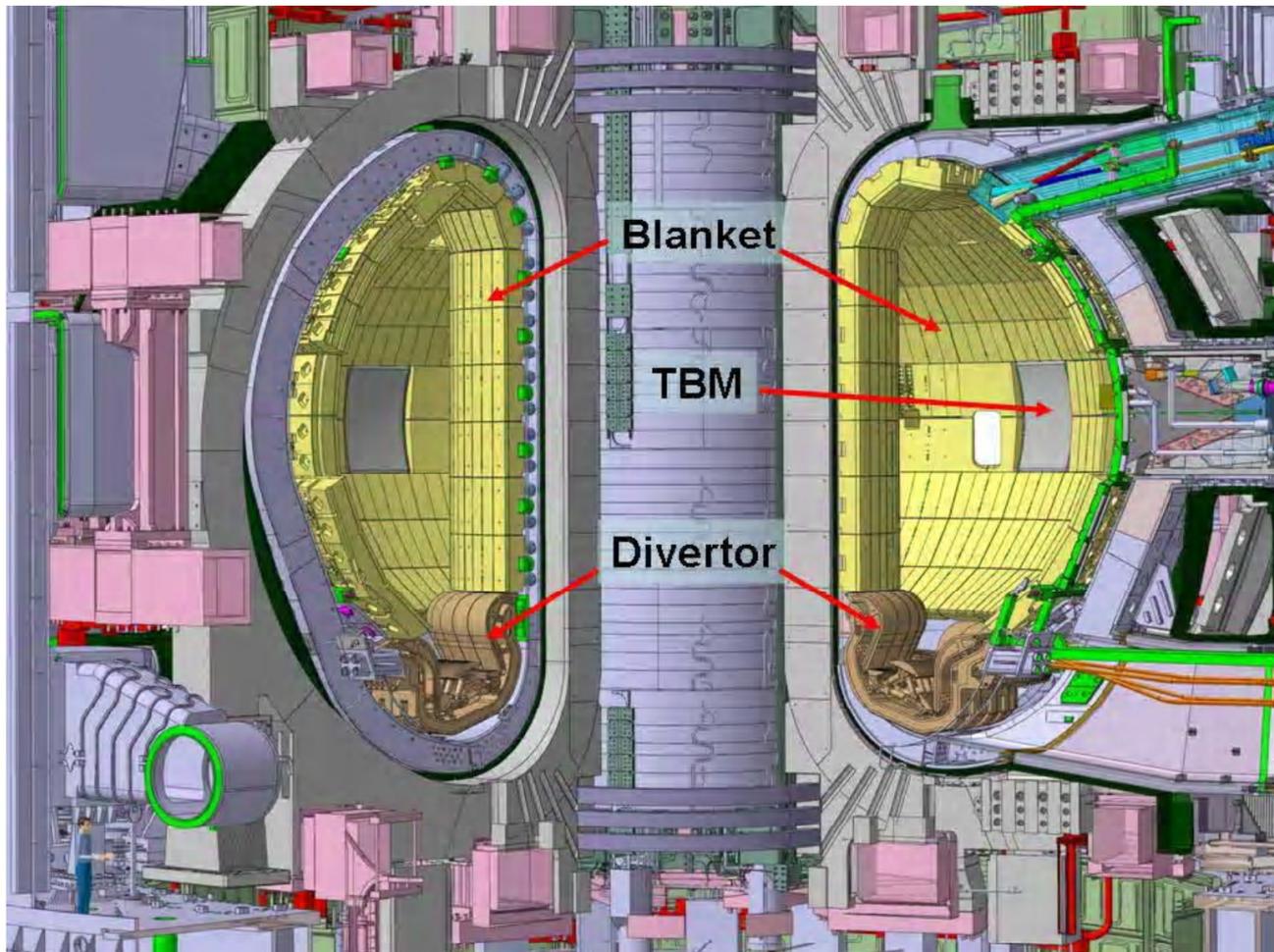
- Il progetto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) e' un progetto di collaborazione internazionale che sta iniziando in Francia presso il centro del CEA di Cadarache, in Provenza
- Il progetto ha lo scopo di dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica di un reattore a fusione termonucleare quale credibile mezzo di produzione di energia per usi pacifici
- Al progetto partecipano EU, JA, US, RF, Cina, Corea, India
- L' Unione Europea ha una partecipazione di maggioranza nel progetto (circa il 50% del costo).che è di gran lunga il piu' importante progetto mondiale di ricerca sulla fusione nucleare



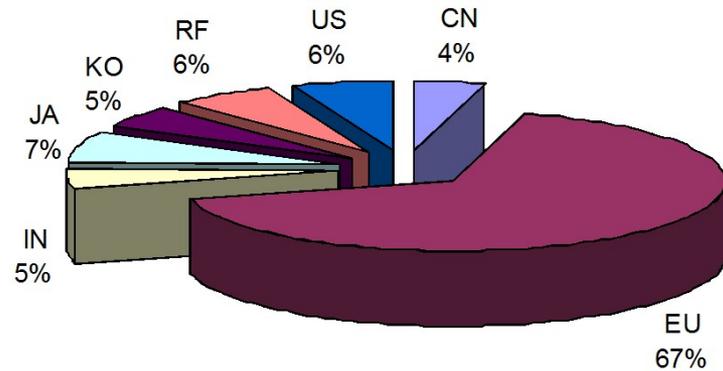
La macchina ITER



ITER – Interno macchina



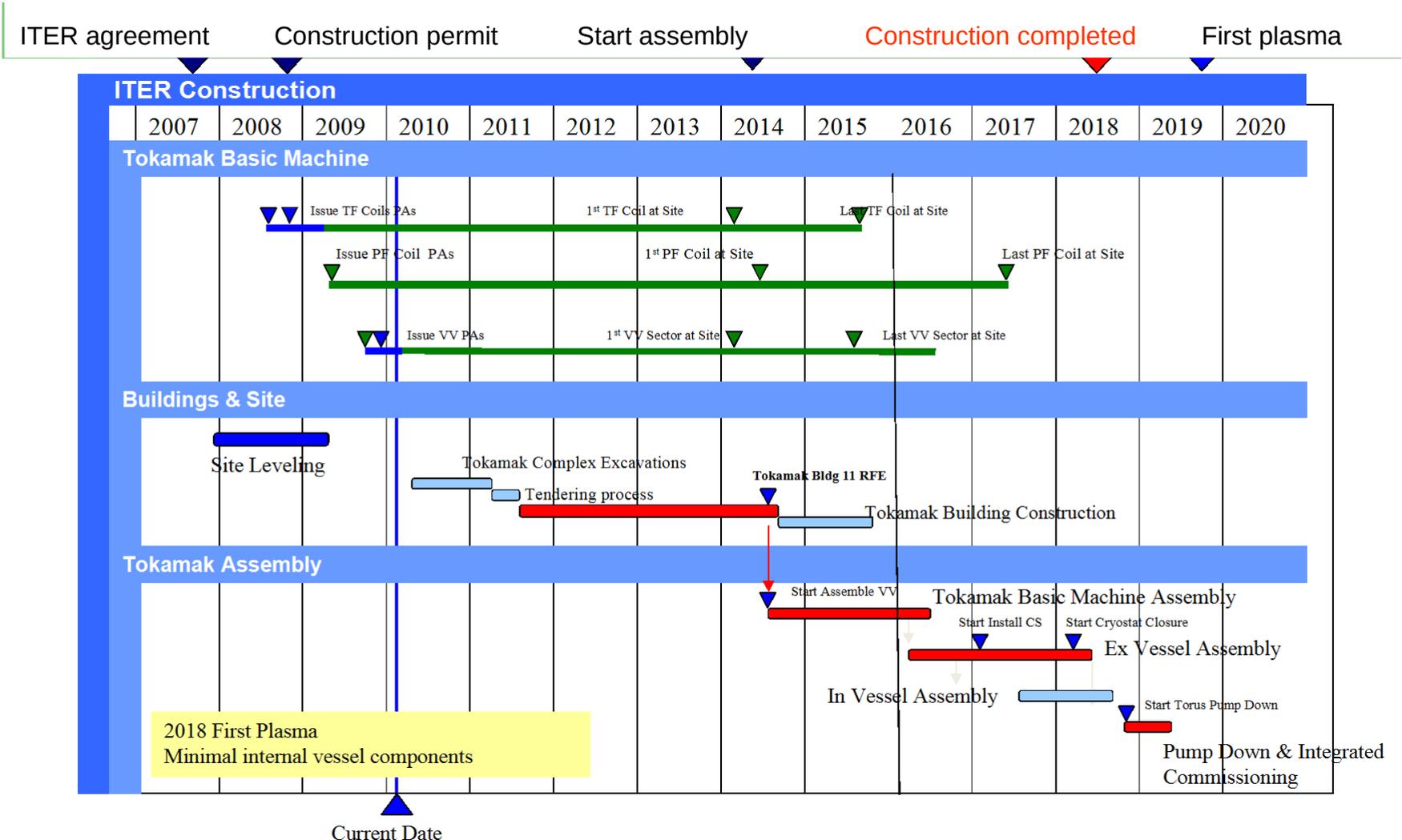
ITER Team at Cadarache



L' ITER Organization è composta da 430 professionisti e tecnici di 22 nazionalità differenti

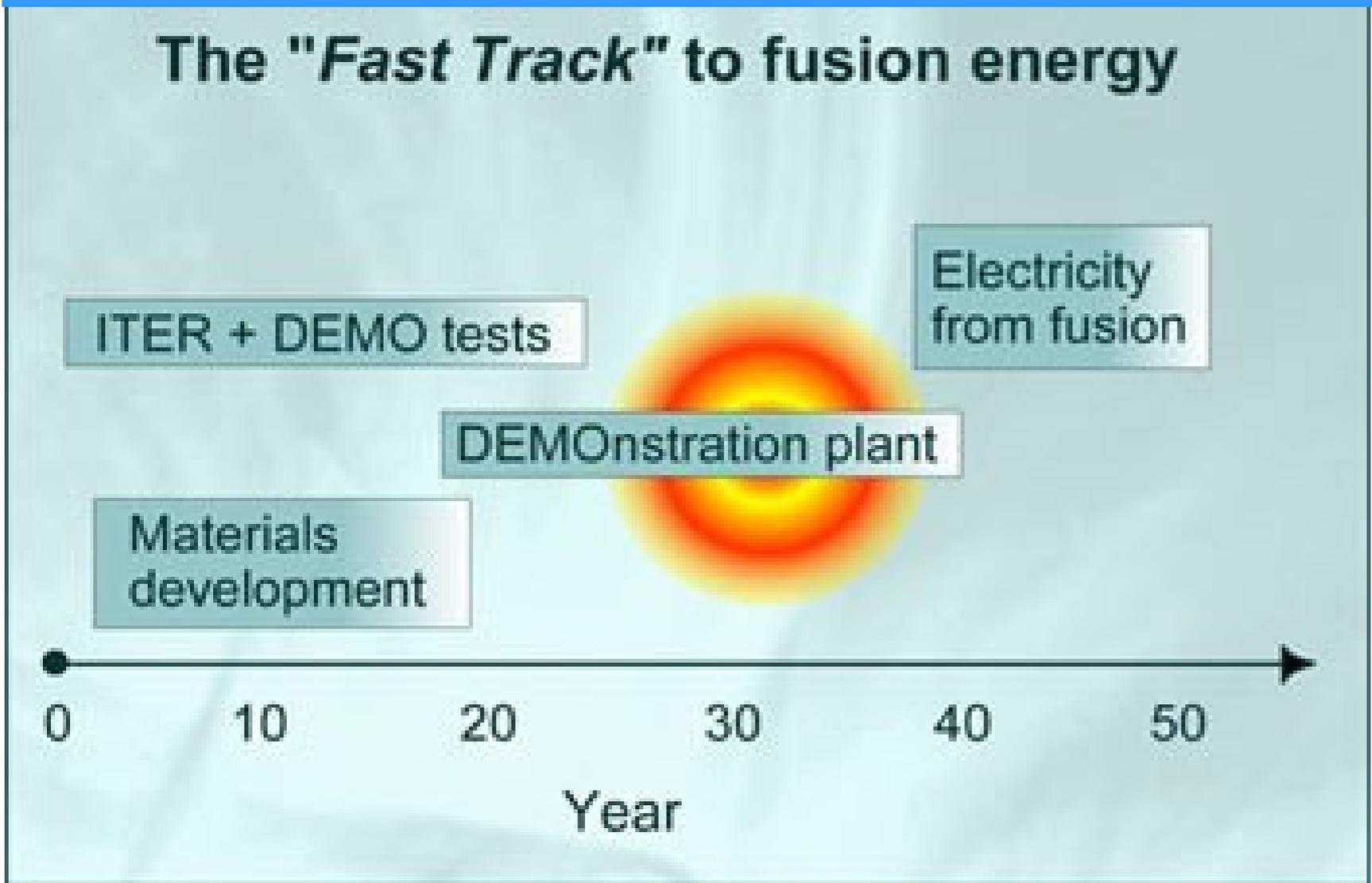


ITER Construction schedule



Il programma europeo "Fast Track"

The "*Fast Track*" to fusion energy



Utilizzo e impatto ambientale

Un reattore a fusione a confinamento magnetico può essere utilizzato solo per la produzione di energia elettrica.

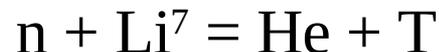
Il funzionamento è continuo. Non è necessario accumulo di energia.

Il suo funzionamento non ha alcun impatto ambientale

Il suo sviluppo non comporta applicazioni di carattere militare

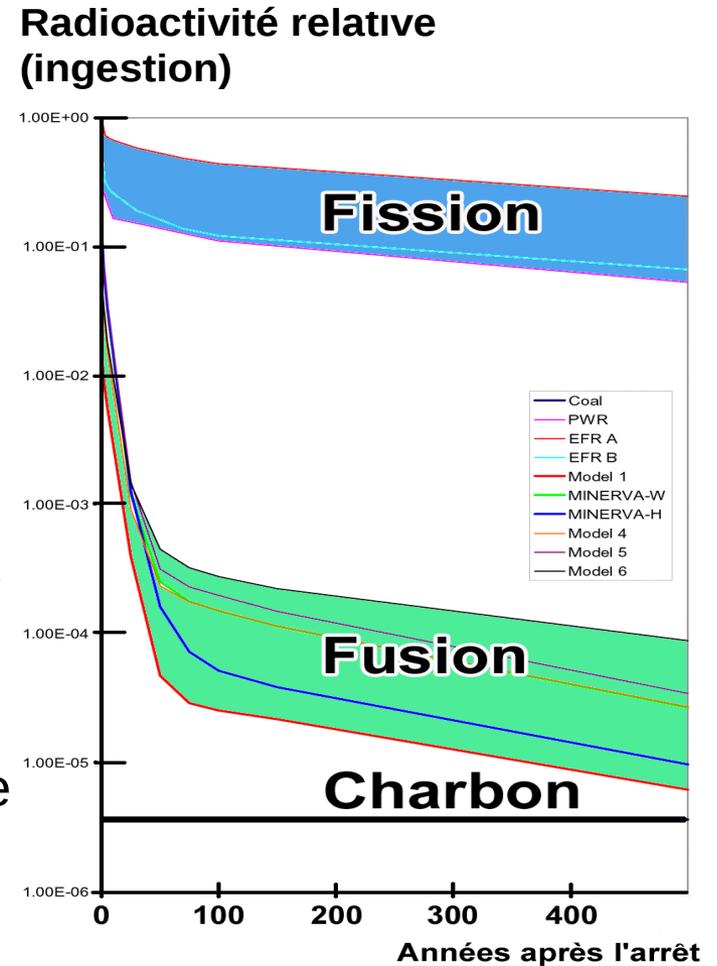
Disponibilità di risorse “combustibili” per la fusione

- Un reattore a fusione richiede una miscela di combustibile 50/50% di due isotopi dell'idrogeno : deuterio (D) e trizio (T)
- 100 mg di miscela D-T producono un output energetico equivalente a 1 tonnellata di carbone
- Il Deuterio esiste in natura in quantità praticamente illimitata: è contenuto nell'acqua del mare ed è accessibile a tutti. Non esiste pertanto la distinzione tra paesi produttori e consumatori (sicurezza dell'approvvigionamento energetico)
- Il Trizio non esiste in natura perché decade con una vita media di circa 12 anni. Si può tuttavia generare dal D con una reazione con il Litio, metallo comune e poco usato. Nel reattore a fusione, Il Trizio sarà prodotto a ciclo chiuso, come parte del funzionamento del reattore utilizzando la reazione :



Produzione di scorie primarie e secondarie

- Un reattore a fusione non produce scorie radioattive *primarie*. Il prodotto di reazione primario è costituito da nuclei di He, un gas poco reattivo, non tossico, esistente nell'atmosfera)
- Scorie secondarie radioattive provengono dalla attivazione neutronica delle strutture del reattore durante il periodo di funzionamento
- I tempi di decadimento radioattivo delle scorie secondarie sono mostrati in figura



Sicurezza

La sicurezza è una caratteristica essenziale del funzionamento di un impianto di produzione di energia, in cui il verificarsi di incidenti è spesso legato ad un utilizzo incontrollato dell' energia disponibile nel combustibile accumulato nell' impianto.

In un **reattore a fissione** una grande quantità di energia è immagazzinata nell' impianto di produzione ed è potenzialmente in grado di provocare un danneggiamento del sistema di contenimento del materiale radioattivo e in casi estremi materiale fissile può disperdersi nell' atmosfera.

In un **reattore a fusione** il combustibile consumato in regime stazionario per unità di tempo è circa un grammo di miscela D -T . Questa quantità è di insufficiente a causare danni al contenitore dell' impianto e, se totalmente dispersa nell' atmosfera non è in grado di causare danni radiologici alla popolazione.

Un reattore a fusione è pertanto *intrinsecamente* sicuro.