

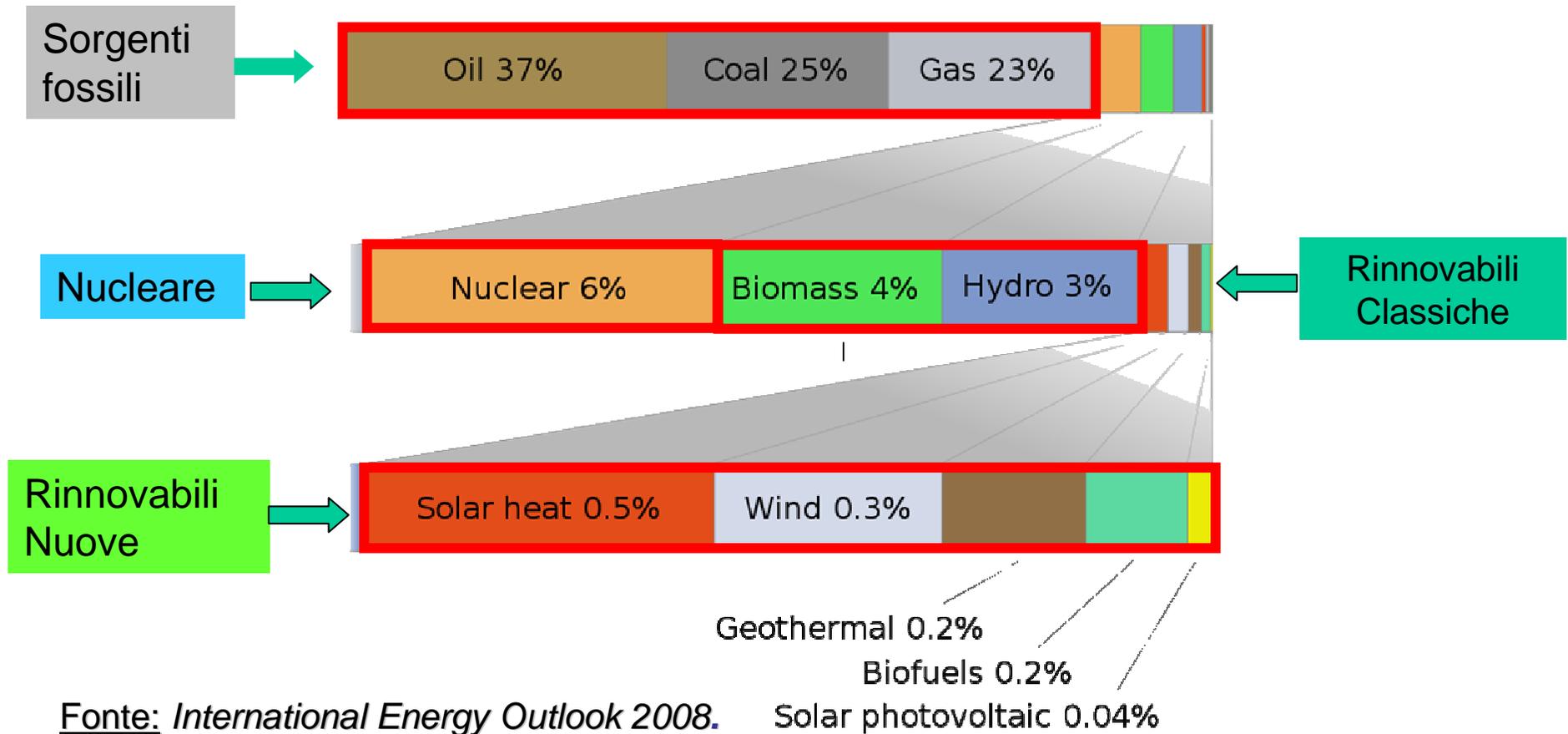
Energia da Fissione e Fusione Nucleare

G. Bosia
Dipartimento di Fisica
Università di Torino

Consumi mondiali di energia

$W = 471 \cdot 10^{18} \text{ J (2008)}$

$P = 15 \cdot 10^{12} \text{ W}$



Fonte: *International Energy Outlook 2008*.

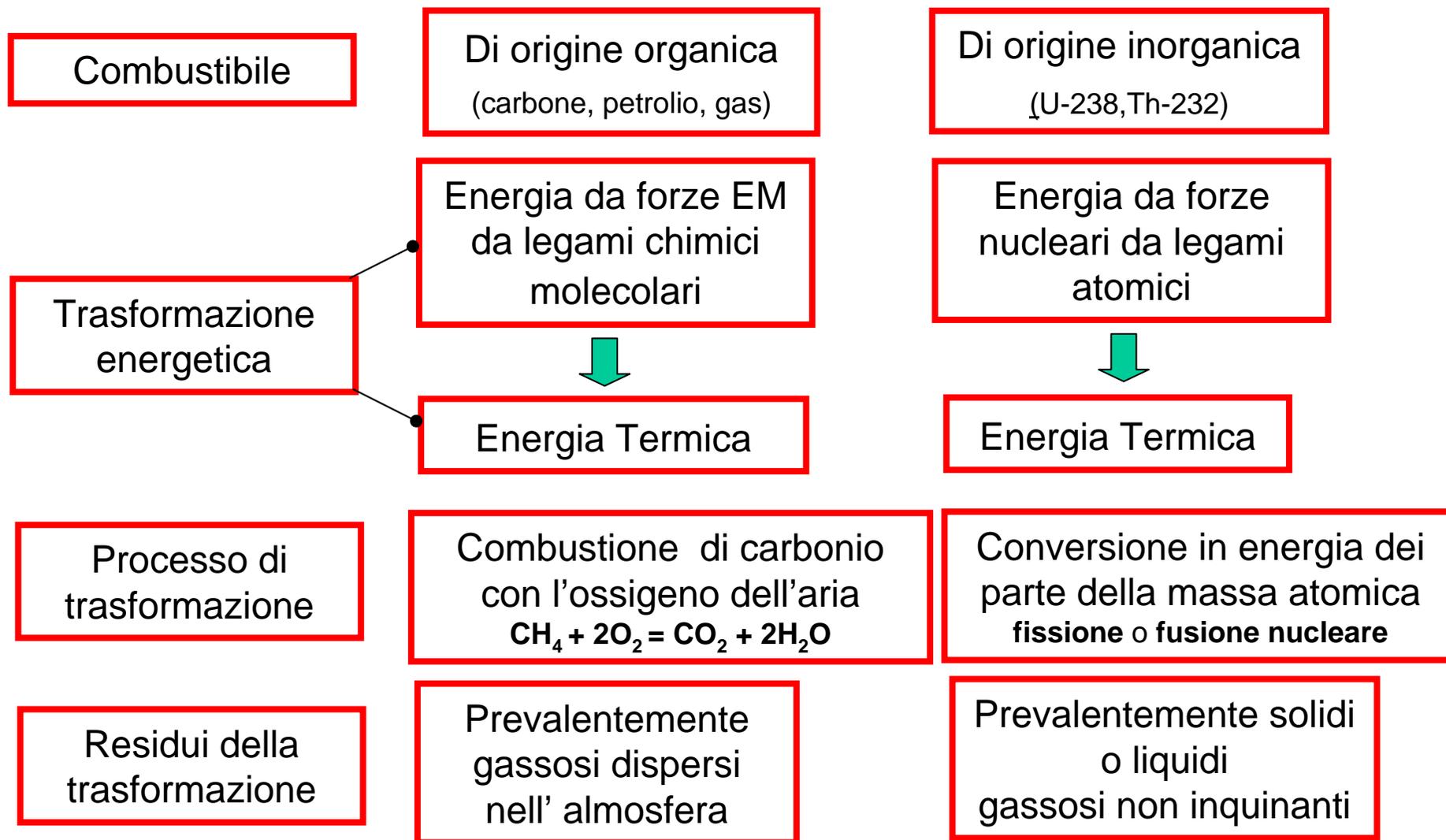
G. Bosia – *Energia da Fissione e Fusione nucleare*

Scuola di Studi Superiori- *Università di Torino*

Processi di conversione

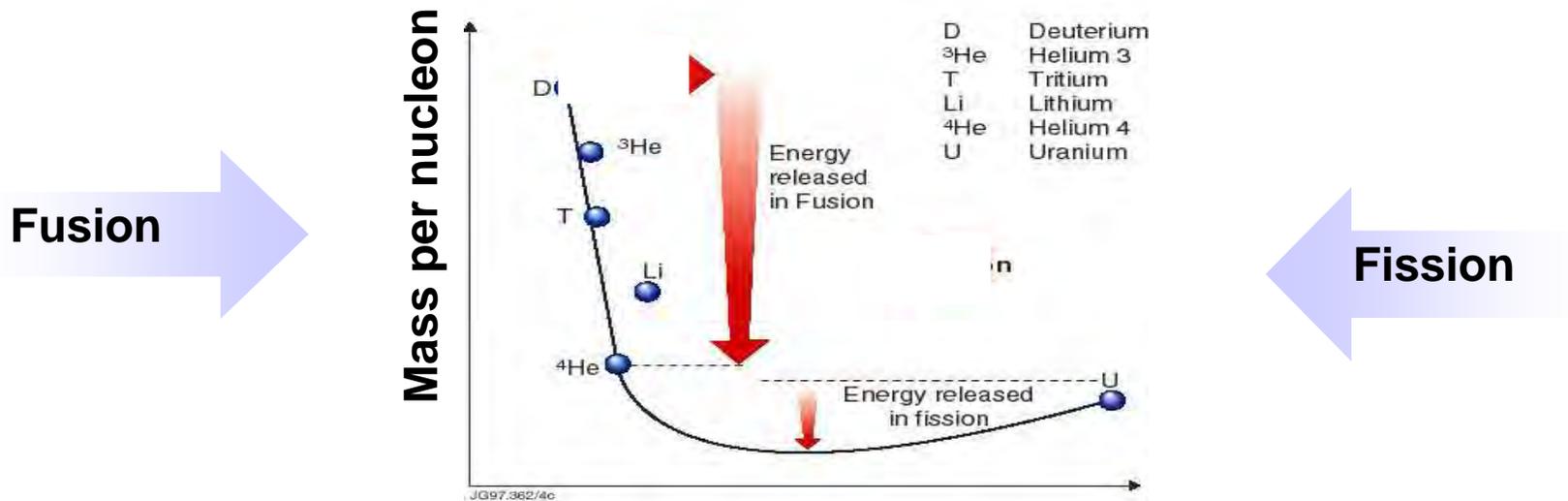
Fossile

Nucleare



Produzione di energia da combustibile nucleare

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



E' possibile produrre energia da due trasformazioni nucleari :

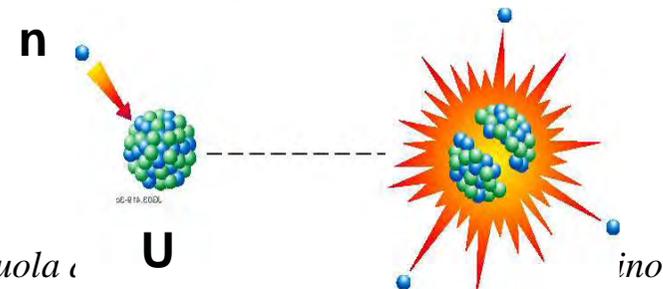
1) **fusione nucleare**

2) **fissione nucleare**

Nessuno di questi processi produce scorie dissipate nell' atmosfera



G. Bosia – Energia da Fissione e Fusione nucleare



Scuola c

Output energetico per evento di produzione di energia

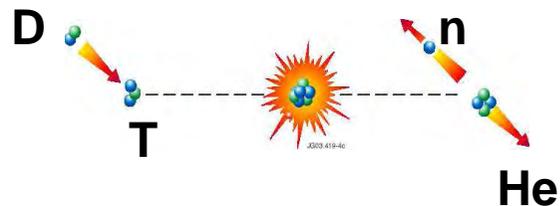
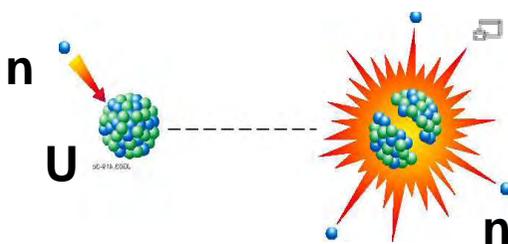
Processi di ossidazione



~ 0.11 eV/processo

Processi nucleari

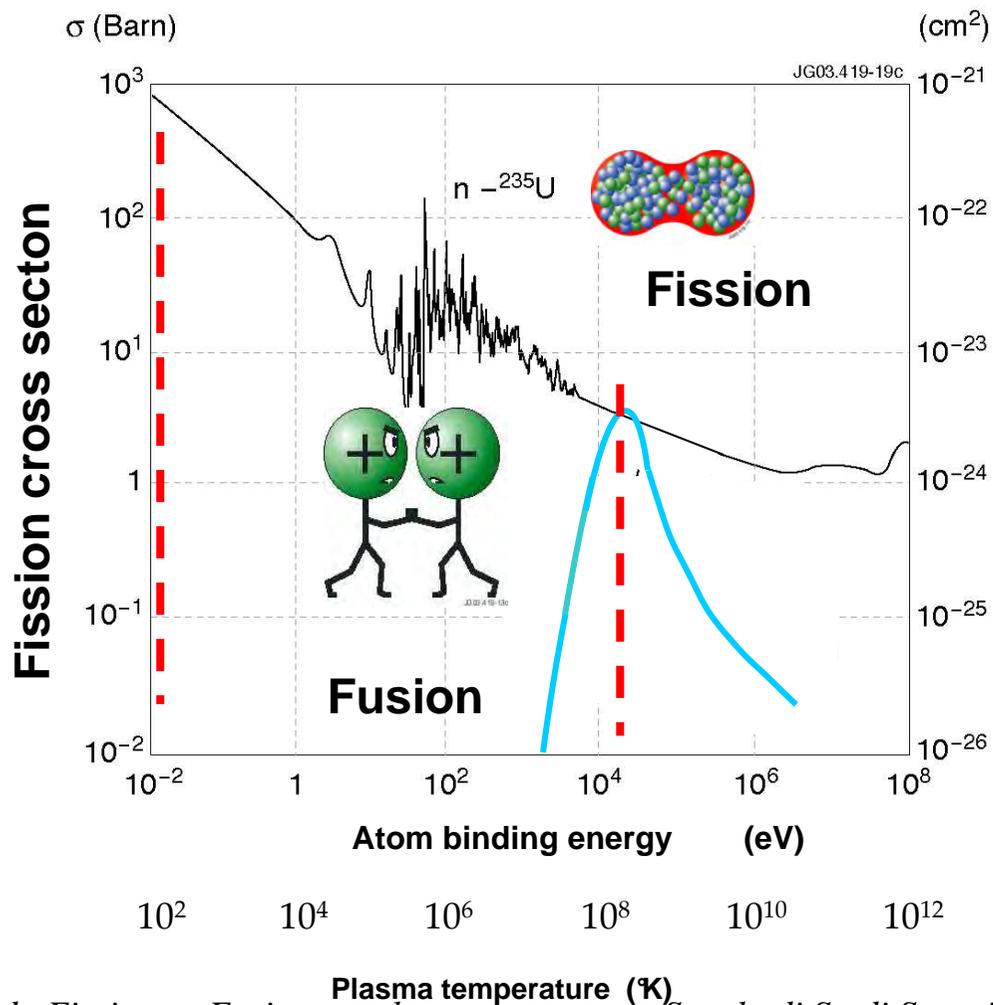
$\sim 10^6$ eV/processo



A parita' di energia prodotta, la massa di combustibile nucleare è tipicamente 10 Milioni di volte inferiore a quella di un combustibile fossile.

Fissione e Fusione

La produzione di energia da fissione è disponibile da circa 50 anni. Quella da fusione è ancora allo stadio di sperimentazione.



G. Bosia – Energia da Fissione e Fusione nucleare Scuola di Studi Superiori- Università di Torino

Fissione e fusione

La **fissione** e' una reazione nucleare **spontanea tra particelle senza carica elettrica** il cui portatore è un neutrone di bassa energia, che può penetrare nei nuclei della materia distanze di interazione nucleare.

La **fusione** e' 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.

E' pertanto necessario *conferire dall' esterno* alle particelle un' energia di almeno 10 keV, per superare questa barriera elettrostatica e produrre eventi nucleari di interazione di fusione.

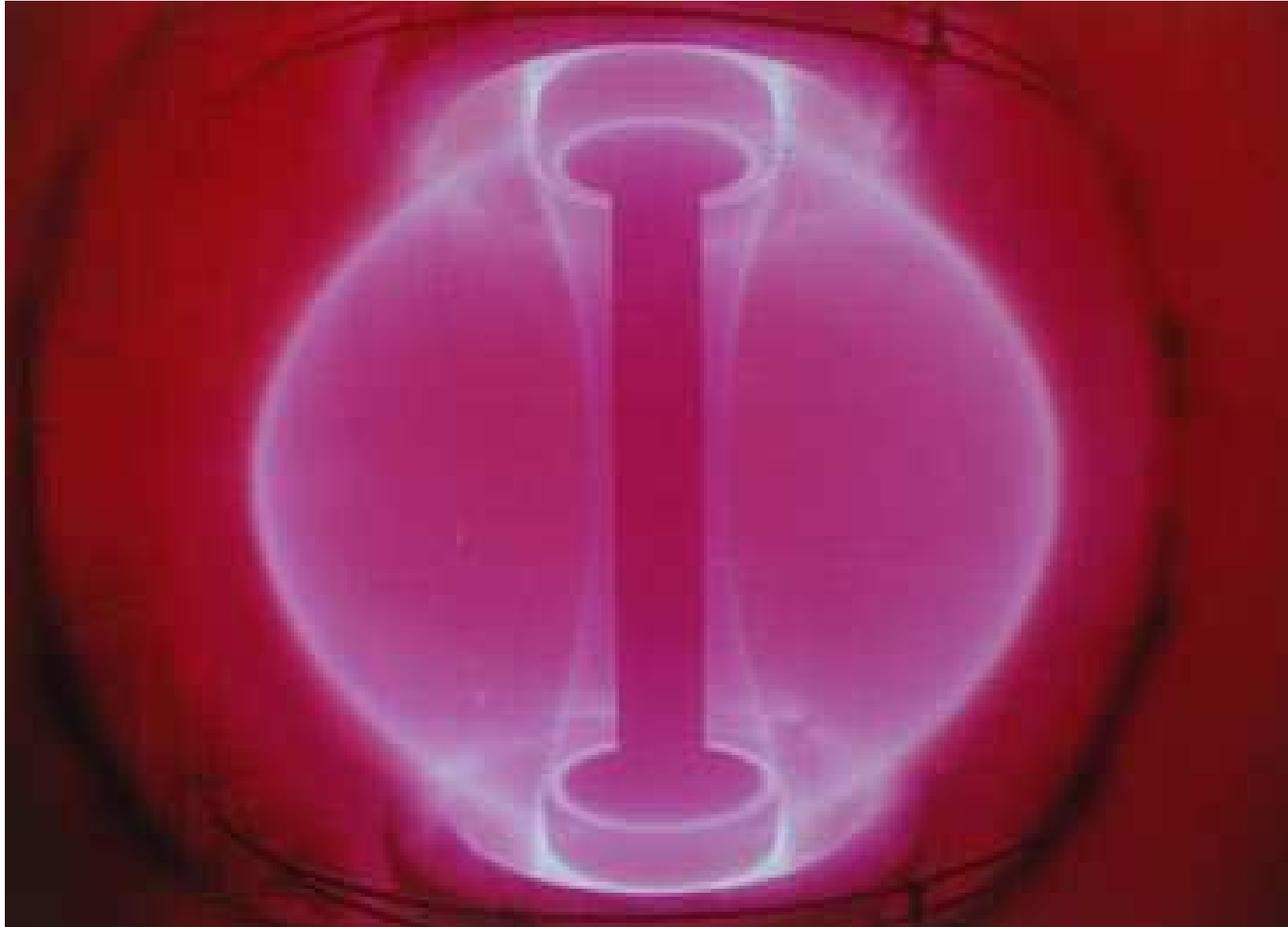
L' eV e' una misura di energia usata in fisica nucleare che vale :

$$1\text{eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 11600 k_B T (\text{K})$$

Ad un' energia di 10 keV (10^8 K) lo stato della materia è quello di un gas completamente ionizzato detto *plasma*.

Un plasma termonucleare non può pertanto essere a contatto con le pareti di un contenitore meccanico, ma deve essere confinato nel vuoto ad una distanza dal contenitore tale da rendere accettabili.gli scambi termici.

Plasma



Energia nucleare da fissione

La produzione di energia elettrica da combustibile nucleare ha avuto un rapido sviluppo in Europa, US e USSR negli anni 50-60 e successivamente anche in JA (anni 70), utilizzando le tecnologie di produzione e di controllo sviluppate a scopi militari durante e subito dopo l'ultimo conflitto mondiale, 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 (U238) a basso costo

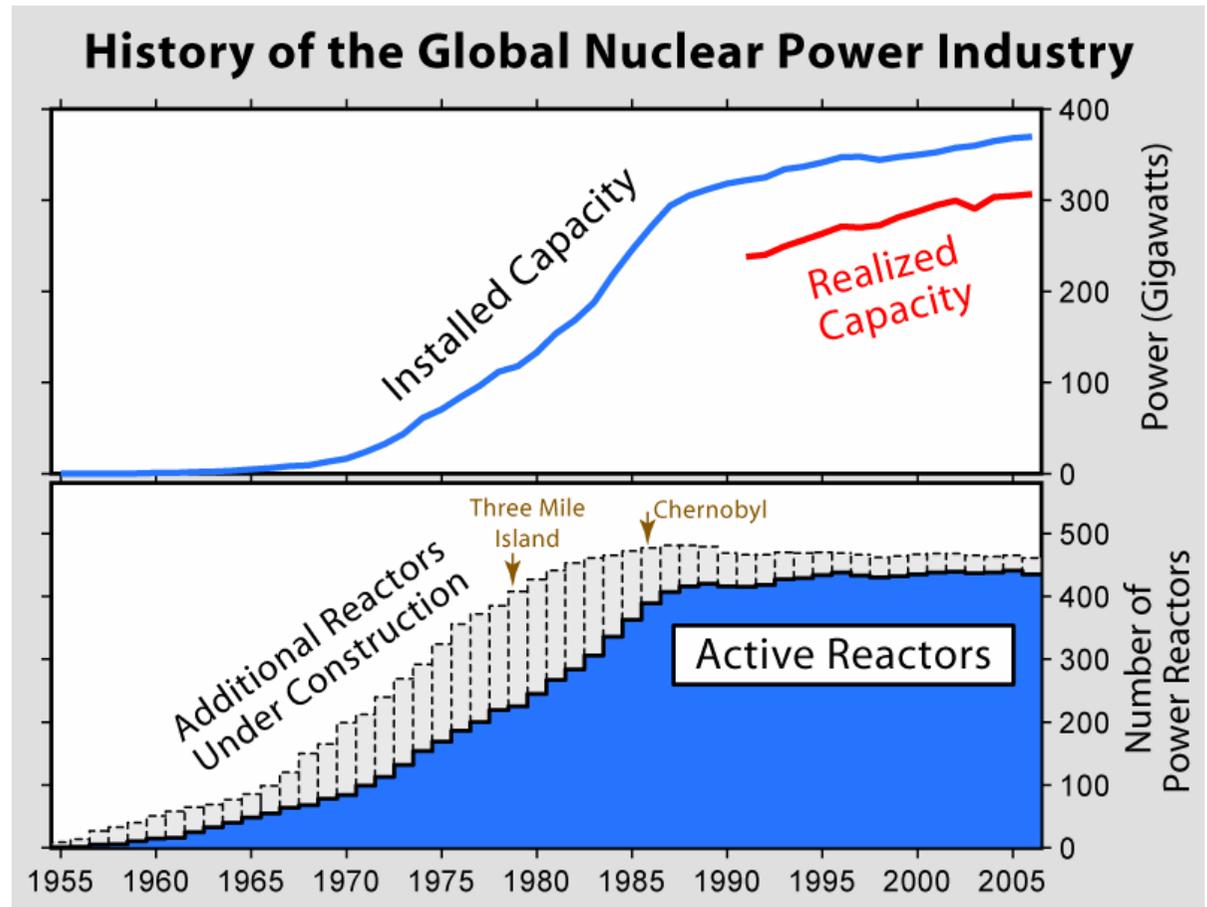


Evoluzione del nucleare

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

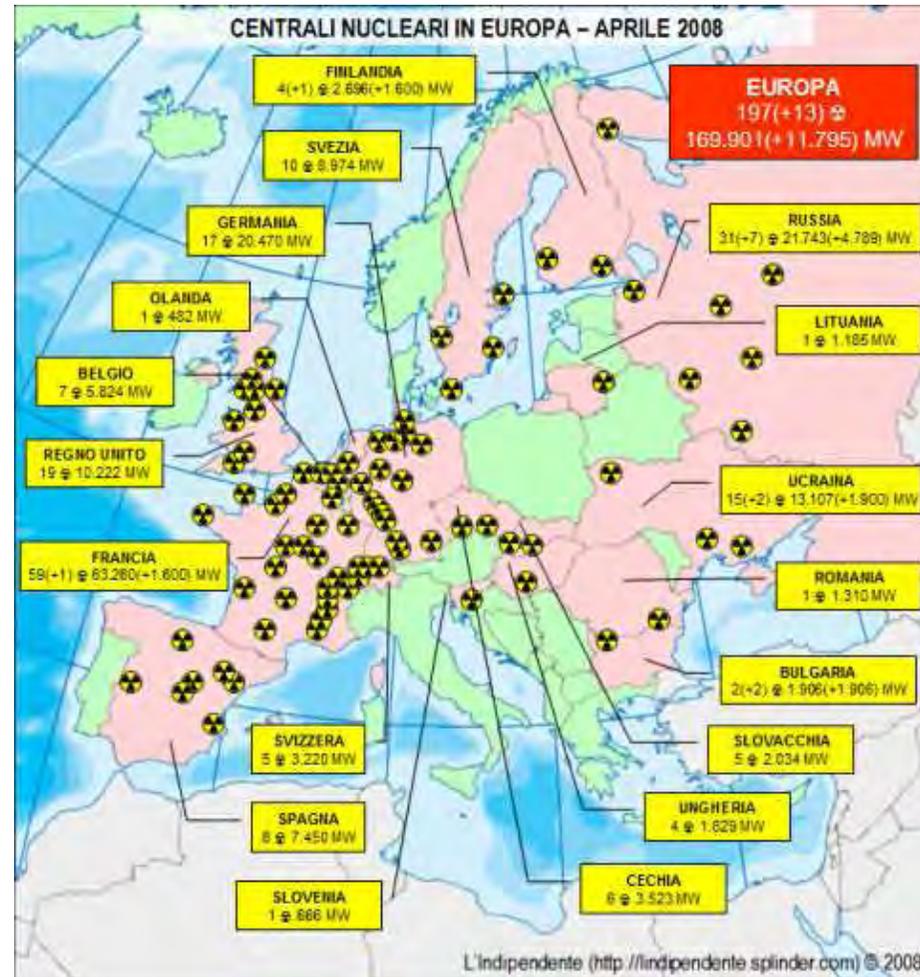


Impianti in operazione in Europa

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%
<hr/>	
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

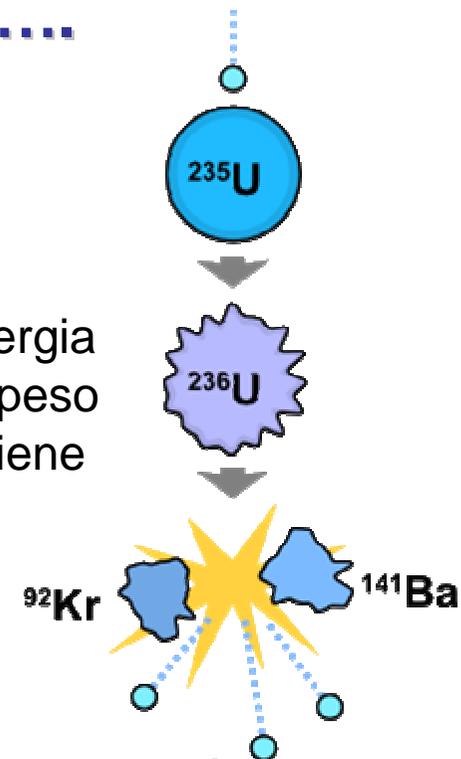
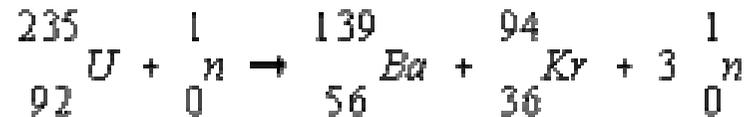


Combustibili nucleari : U-238, U-235....

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 e' anch'esso **un isotopo fissile**.



Vita media: β 23.5 min; β 2.36 g ; 24,100 anni

L' U-238 e' detto **isotopo fertile** perché, se irradiato da neutroni produce atomi **fissili di Pu-239** utilizzabile sia per scopi pacifici che militari.

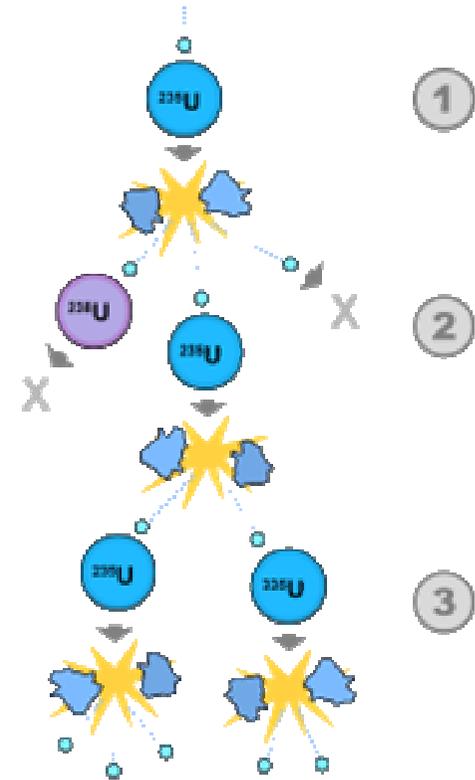
Reazione a catena

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**

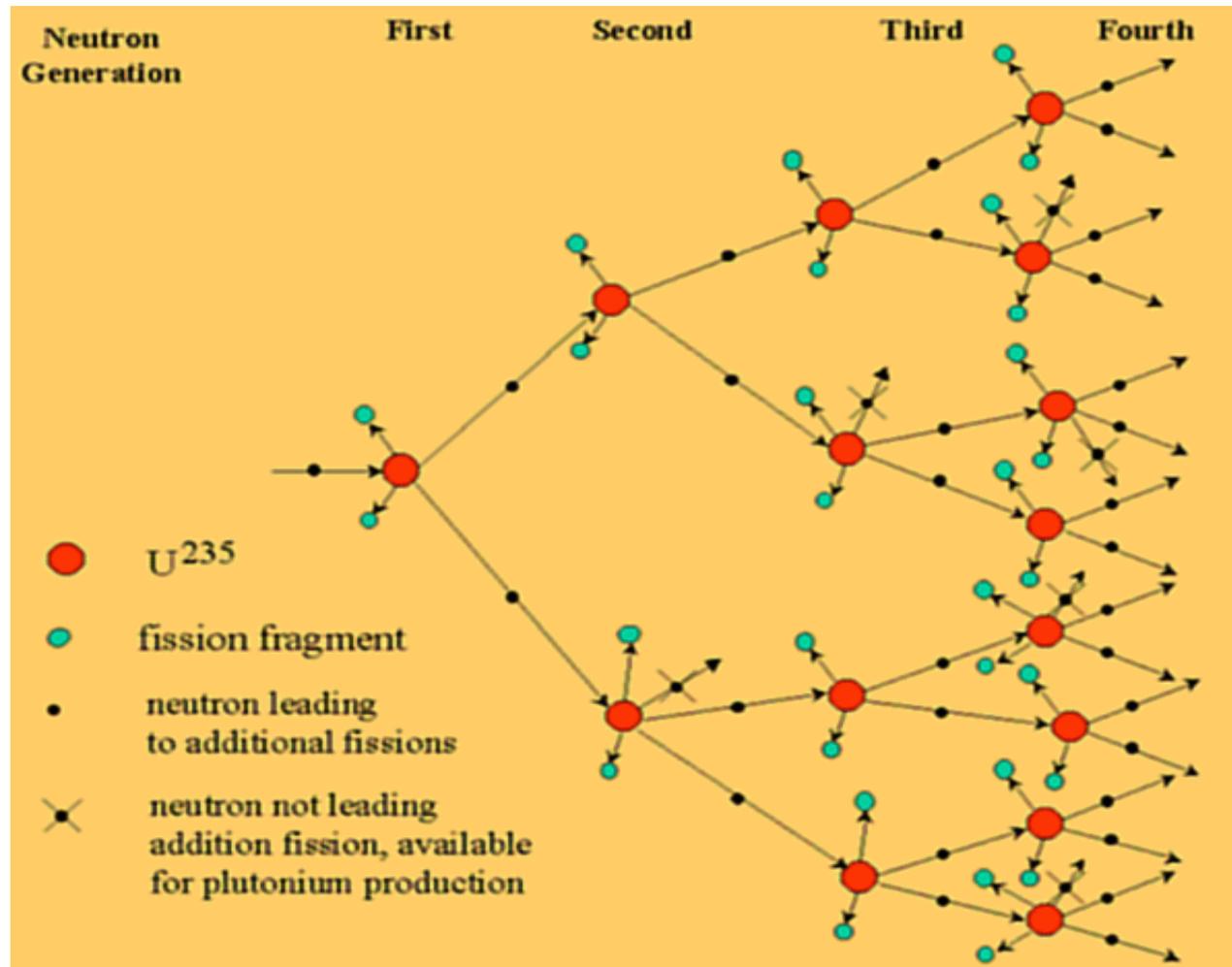
:

- 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

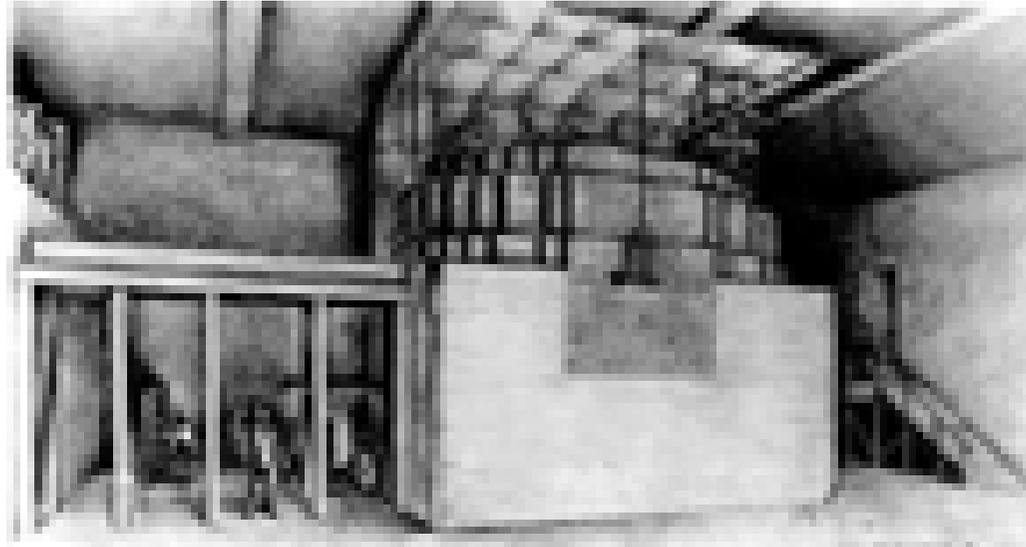
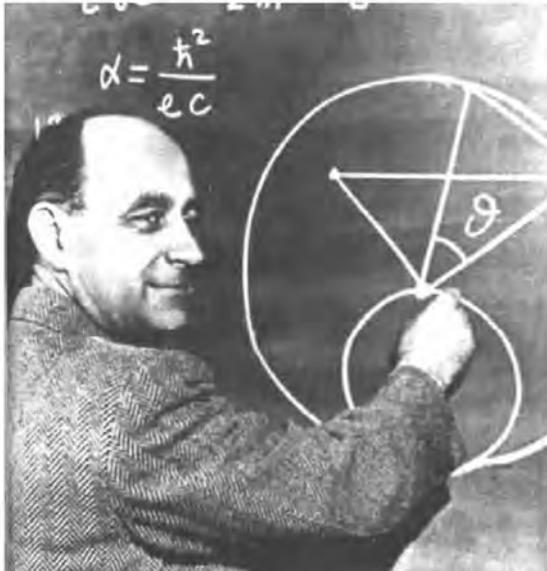


Reazione a catena in un reattore

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



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"

G. Bosia – Energia da Fissione e Fusione nucleare



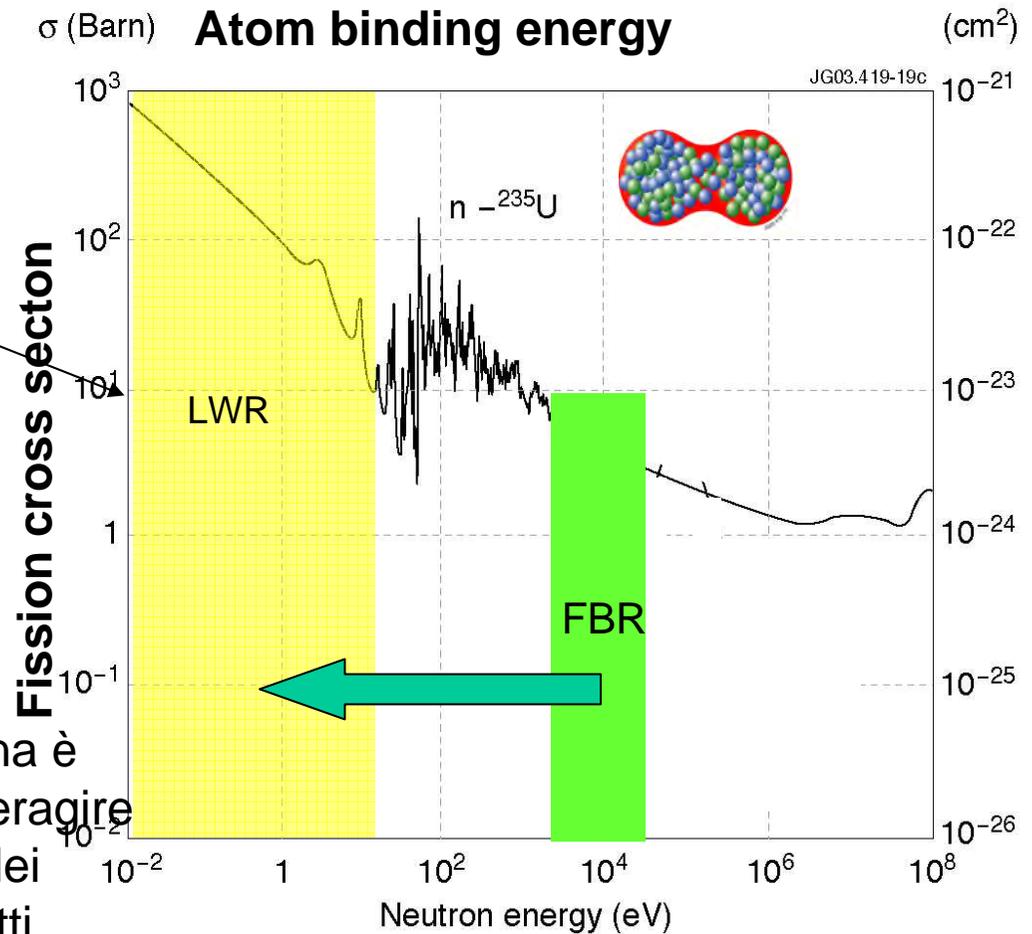
Scuola di Studi Superiori - Università di Torino

Controllo della reazione a catena

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

I neutroni prodotti nelle reazioni di fusione hanno energia superiore a quella ottimale ($\approx 500 \text{ keV}$)

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

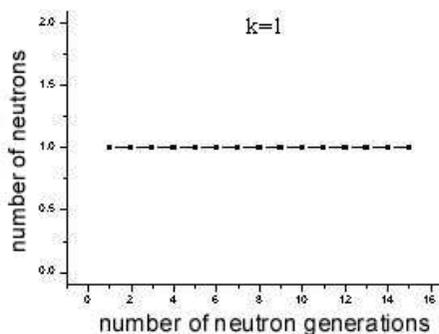
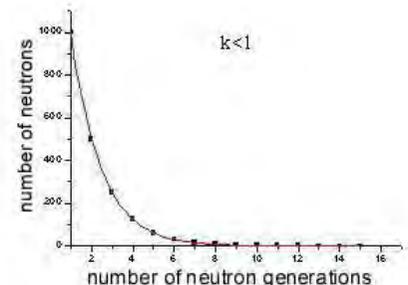
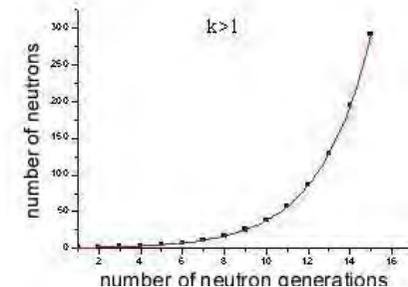
In condizioni di massa critica, utilizzando mezzi di controllo della velocità di reazione è possibile variare *il coefficiente di moltiplicazione neutronica* K ed ottenere:

$K > 1$ - 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 costituisce una fonte di rischio nel caso di perdita di controllo .

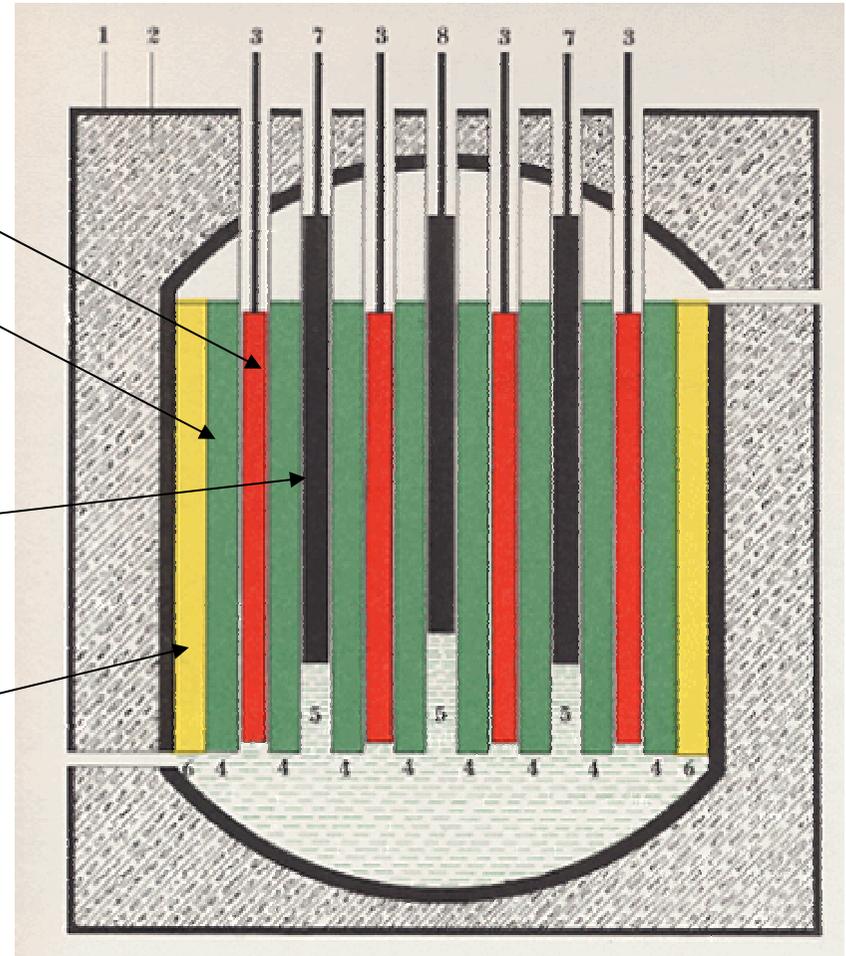


Composizione del nocciolo di un reattore a fissione

Nel nocciolo il combustibile nucleare e' frammentato in **barre di combustibile** intervallate da **materiale moderatore**.
Nei reattori moderati ad acqua questa ha la doppia funzione di moderatore e di liquido raffreddante

E' possibile inoltre controllare la velocita' di reazione (e pertanto l' output di potenza del reattore) utilizzando barre mobili di materiali (B, Cd) che **assorbono** i neutroni senza contribuire alla reazione a catena.

L' intensa radiazione del nucleo e' schermata (schermo biologico) dal contenitore del nucleo (in cemento armato) con l' ausilio di materiali riflettori di neutroni (Be).

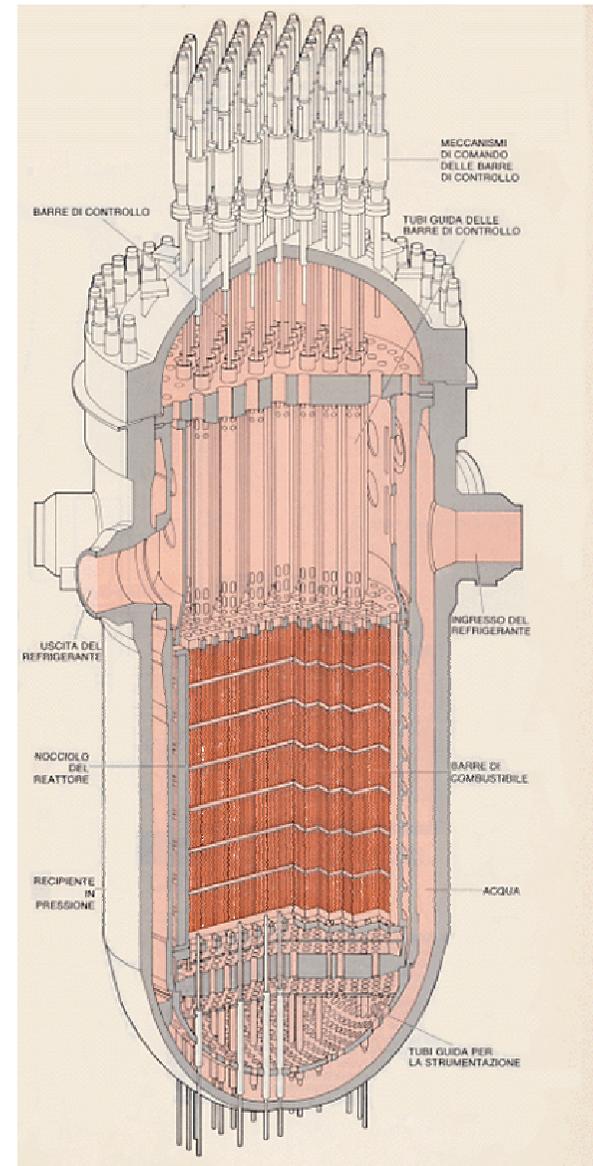


Nocciolo di un reattore a fissione



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

G. Bosia – Energia da Fissione e Fusione nucleare

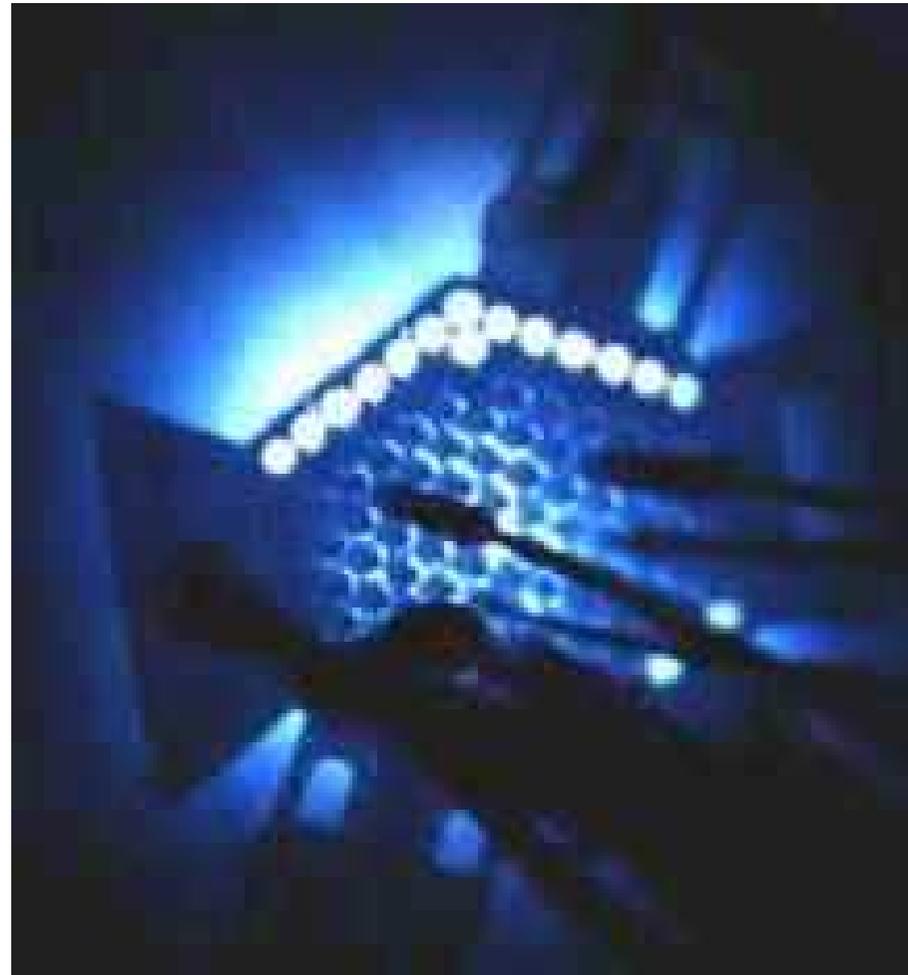


Interno del nocciolo di una centrale nucleare a regime

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.

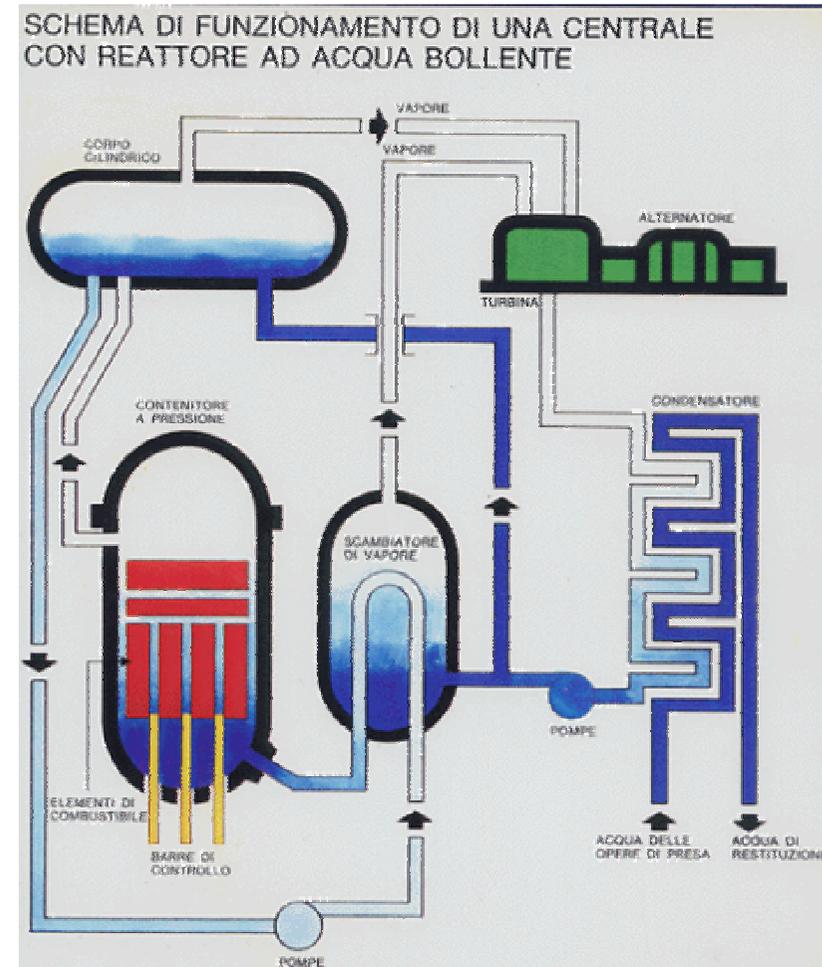


Centrale BWR (General Electric)

In un reattore Boiling Water (BWR) l'acqua a diretto contatto con il combustibile nucleare, è quella che, bollendo, fornisce il vapore che fa muovere le turbine.

Altro vapore viene fornito dallo scambiatore.

In questo tipo di centrale, come nella PWR, l'acqua svolge due ruoli: quella di raffreddamento del sistema e quella di moderatore dei neutroni generati nella reazione nucleare.

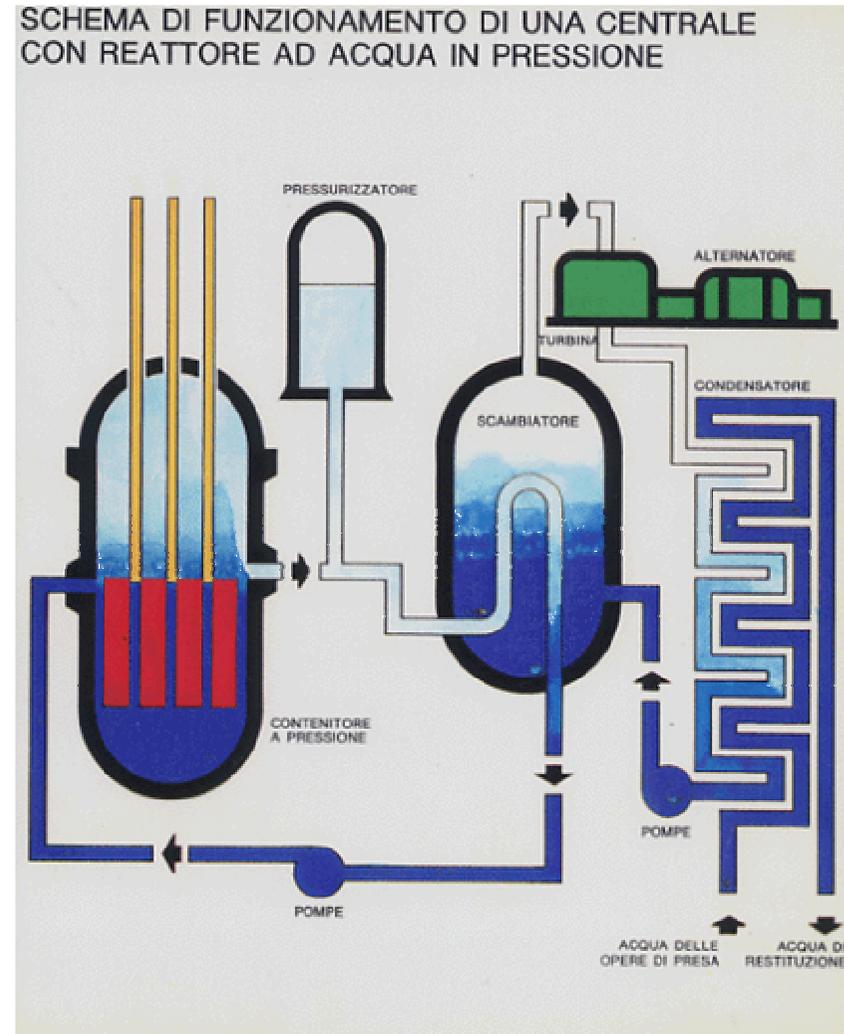


Centrale PWR (Westinghouse)

In questo tipo di reattore c'è il circuito chiuso dell'acqua che dal nocciolo va allo scambiatore.

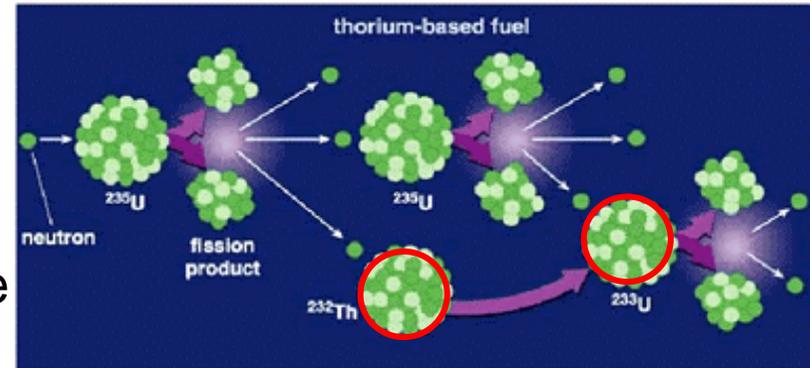
Un altro circuito d'acqua, completamente separato, è quello che muove le turbine. L'acqua che si trova nel nocciolo, oltre ad essere ad alta temperatura è anche mantenuta ad alta pressione per evitarne l'evaporazione.

La carica di combustibile prevede circa 90 tonnellate che permettono il suo funzionamento per circa un anno. La pressione dell'acqua è intorno ai 150 Kg/cm² e la temperatura intorno ai 280 °C.



Ciclo del Torio

Reazioni a catena con neutroni di bassa energia si possono anche ottenere con un altro combustibile nucleare: il Torio (Th), che si trova in natura quasi al 100%, come Th-232 che è un isotopo *fertile* come l'U-238:



Assorbendo un neutrone termico Th-232 si trasforma in U-233 che è un materiale fissile. Il funzionamento d reattore genera pertanto nuovo combustibile fertile (*reazione auto fertilizzante o breeding reaction*).

- Il Torio è tre volte più abbondante in natura del U-238 e il suo uso in reattori auto-fertilizzanti (breeders reactors) puo' in linea di principio più che raddoppiare la quantità disponibile di combustibile.

Reazioni a catena autofertilizzanti

Un **reattore autofertilizzante** è progettato per ottenere un **rapporto di conversione** $R_c > 1$,

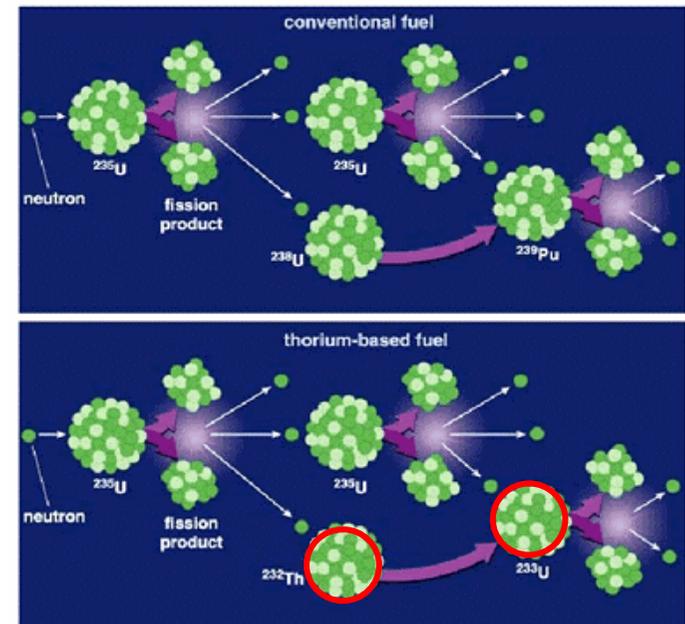
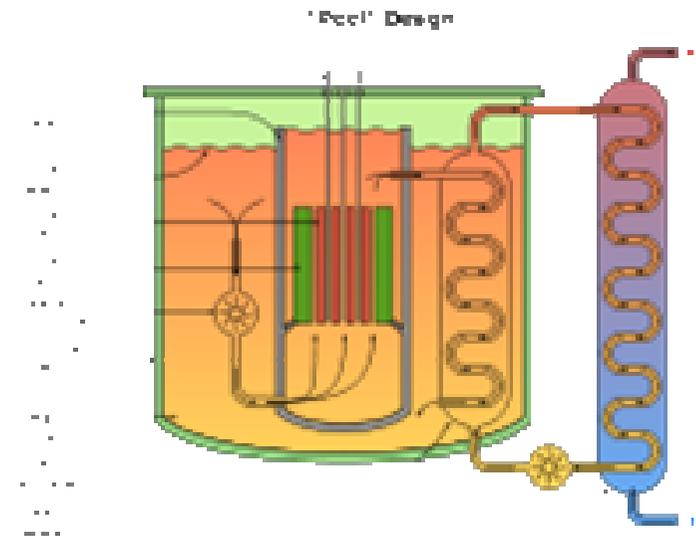
$R = (\text{Quantità di materiale fissile prodotta} / \text{Quantità di materiale fissile consumata})$

cioè per *produrre più materiale fissile* di quanto ne consumi.

Il fenomeno della "autofertilizzazione" può essere ottenuto anche in reattori **autofertilizzanti veloci (fast breeders reactors-FBR)** che utilizzano il ciclo U-235 - Pu 239 in cui il termine **veloce** 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

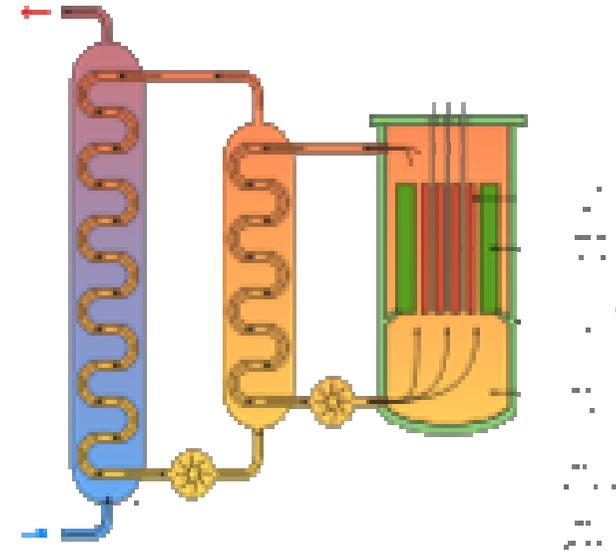
Il nocciolo di reattori breeders è diviso in una parte centrale detta (*seed*), in cui sono contenuti elementi di combustibile fissile *fortemente arricchito* in grado di produrre una reazione a catena, e una periferia (*blanket*) che circonda il seme e contiene elementi di combustibile che si arricchisce lentamente, attraverso la fertilizzazione dei nuclei di uranio

Entrambe le zone del nocciolo generano energia, ma mentre nel *seed* la concentrazione di materiale fertile nel *blanket* aumenta, diminuisce, perché è maggiore la probabilità che si verifichi un evento di fissione rispetto a quella di 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.

Nel FBR, l'acqua, che modera i neutroni, non è utilizzabile: si usa al suo posto un metallo liquido (Na) mantenuti 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.

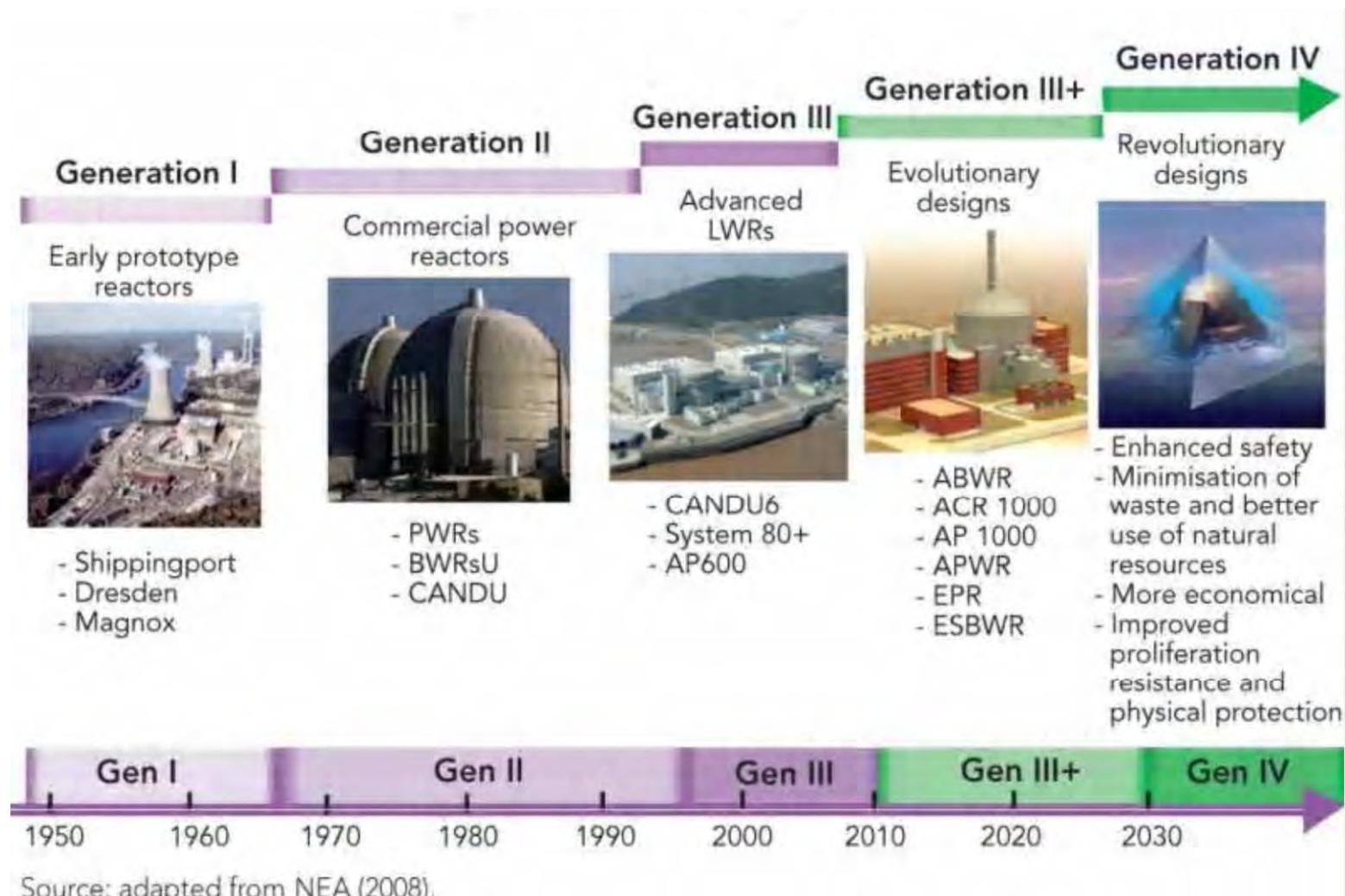
Nel mantello invece si può usare sia uranio arricchito sia uranio naturale. Periodicamente, gli elementi del seme e del mantello devono essere estratti e riprocessati.

La possibilità di un 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 (LBR)*.

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.
- 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.
- Viceversa, un reattore autofertilizzante FBR produce direttamente Pu - 239 "weapon grade", (cioè con meno del 10% di Pu- 240 e fornisce pertanto materiale per ordigni nucleari .

Generazioni di reattori a fissione



Reattori di I^a Generazione

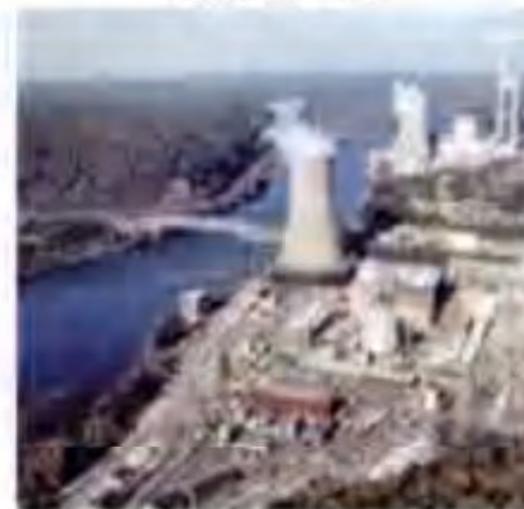
La prima centrale nucleare) da 5 MW (Obninsk) da è entrata in servizio in Russia nel 1954.

seguita nel 1956 dal reattore dal reattore da 60 MW di Calder Hall in Inghilterra

e nel 1957 dai 60 MW a Shippingport negli Stati Uniti.

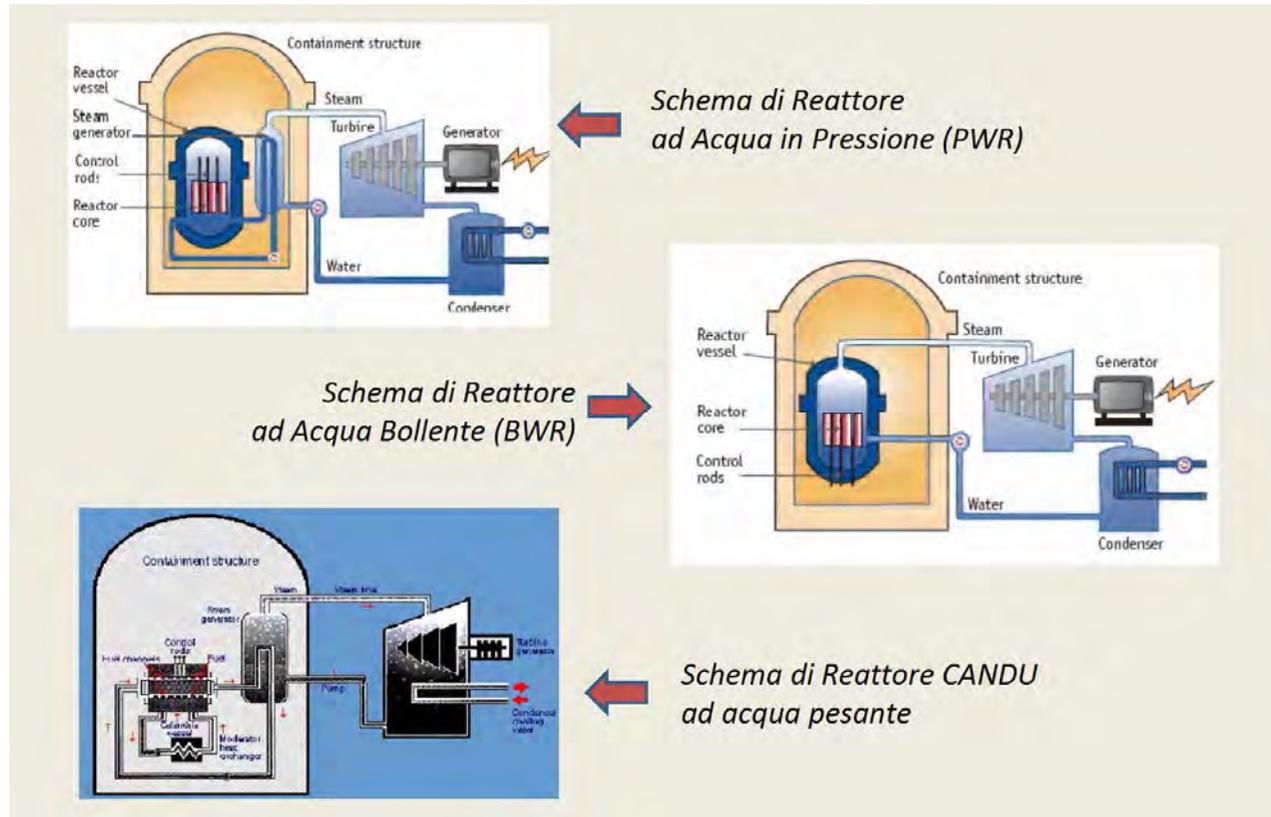
Generation I

Early prototype reactors



- Shippingport
- Dresden
- Magnox

Reattori di seconda generazione



Generation II

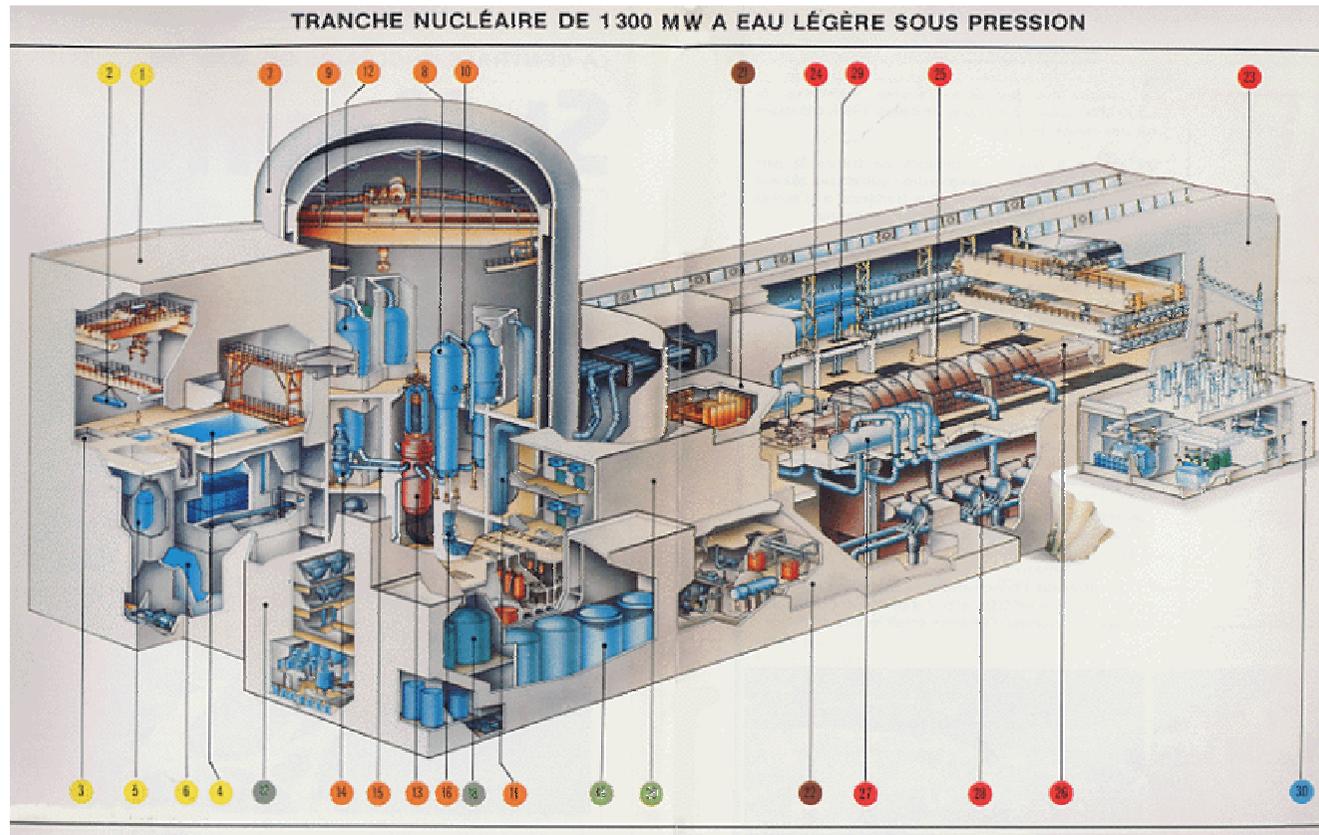
Commercial power reactors

- PWRs
- BWRsU
- CANDU

Gen II

1970 1980 1990

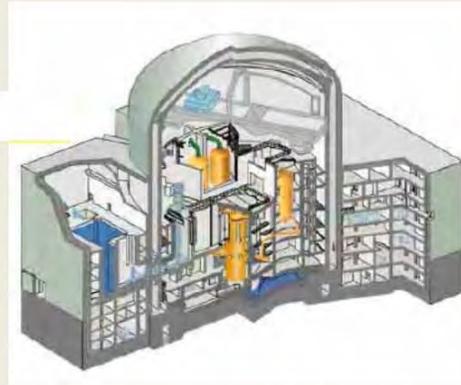
Centrale nucleare per produzione elettrica



Generazione III e III+



ABWR (Advanced Boiling Water Reactor)
GE-Hitachi (USA – Giappone)
1400 MWe
4 unità in operazione (Giappone)
3 unità in costruzione (Giappone e Taiwan)



EPR (European Pressurized Water Reactor)
AREVA (Francia – Germania)
1600 MWe
2 unità in costruzione (Finlandia e Francia)

Partecipazione italiana a costruzione



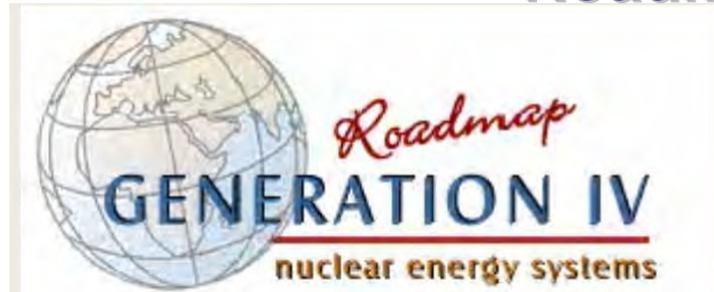
AP1000 (Advanced Passive PWR)
Westinghouse (USA)
1117 MWe
4 unità in costruzione (Cina)

Partecipazione italiana a
progettazione e costruzione

Motivazioni per Impianti di IV generazione

- La domanda di energia nucleare è potenzialmente in significativo aumento (molte stime parlano di oltre 1000 reattori nucleari di potenza nel 2050).
- L' esigenza per il nucleare di essere “durevole” : in particolare garantire il combustibile nucleare anche per migliaia di anni diventa un obiettivo maggiore
- La riduzione dei rifiuti radioattivi e del rischio di proliferazione diventano criteri altrettanto importanti quanto la sicurezza e l' economia
- Applicazioni diversificate del nucleare vengono proposte: la produzione di idrogeno, l' uso industriale del calore, la de-salinizzazione marina
- Lo sviluppo di nuovi sistemi rivoluzionari richiede tempo e l' introduzione dei reattori di IV generazione a ciclo chiuso su scala industriale e' prevedibile verso il 2040 2050

Roadmap "Generation IV"



Obiettivi del Programma "Generazione IV"

Sostenibilità soddisfare requisiti ambientali, efficace sfruttamento del combustibile, minimizzare rifiuti e ridurre tempi di stoccaggio per rifiuti a lunga vita

Economicità costi life-cycle e rischi finanziari competitivi con altre fonti energetiche

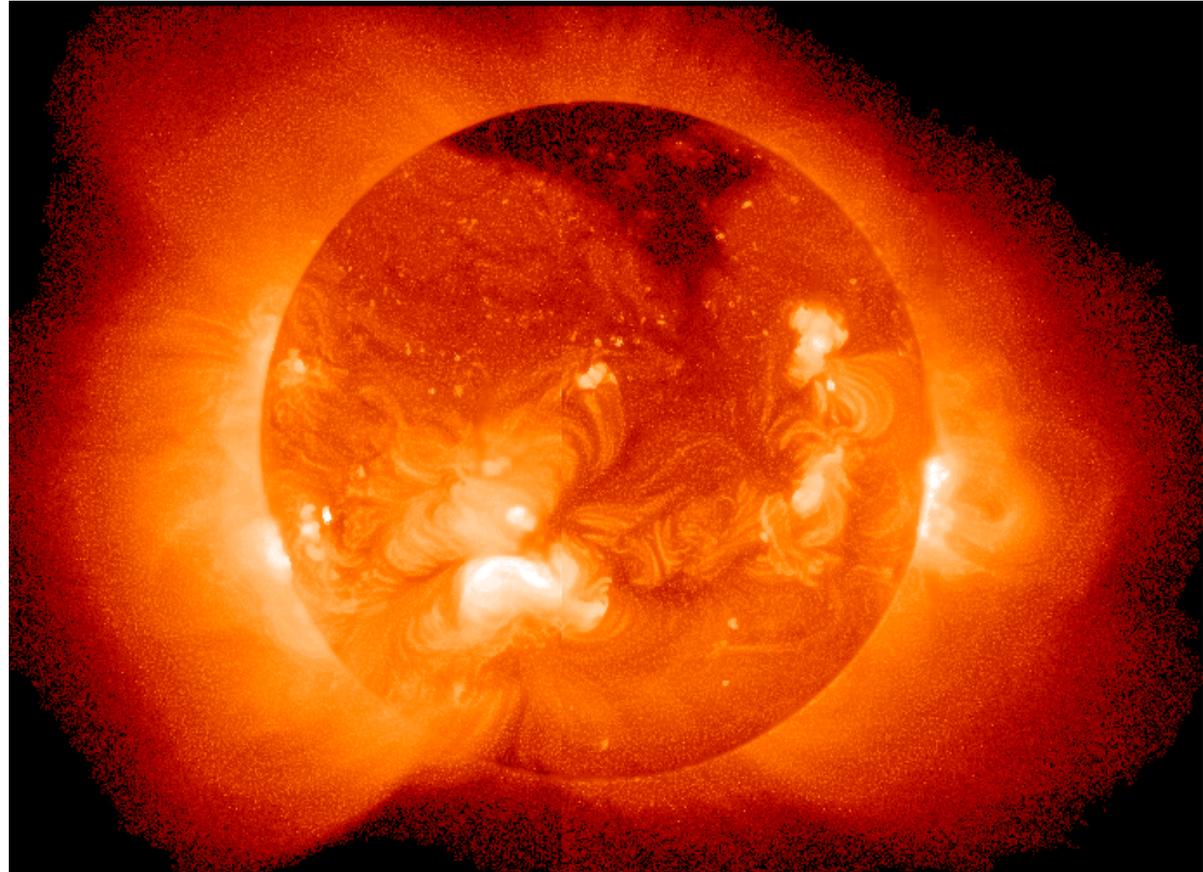
Sicurezza e affidabilità eccellere in sicurezza e bassissima probabilità di danneggiamento combustibile, eliminare piani evacuazione

Resistenza alla Proliferazione e Protezione Fisica: scarsa attività per diversione di materiale strategico, elevata protezione da attacchi terroristici

Fusione Nucleare

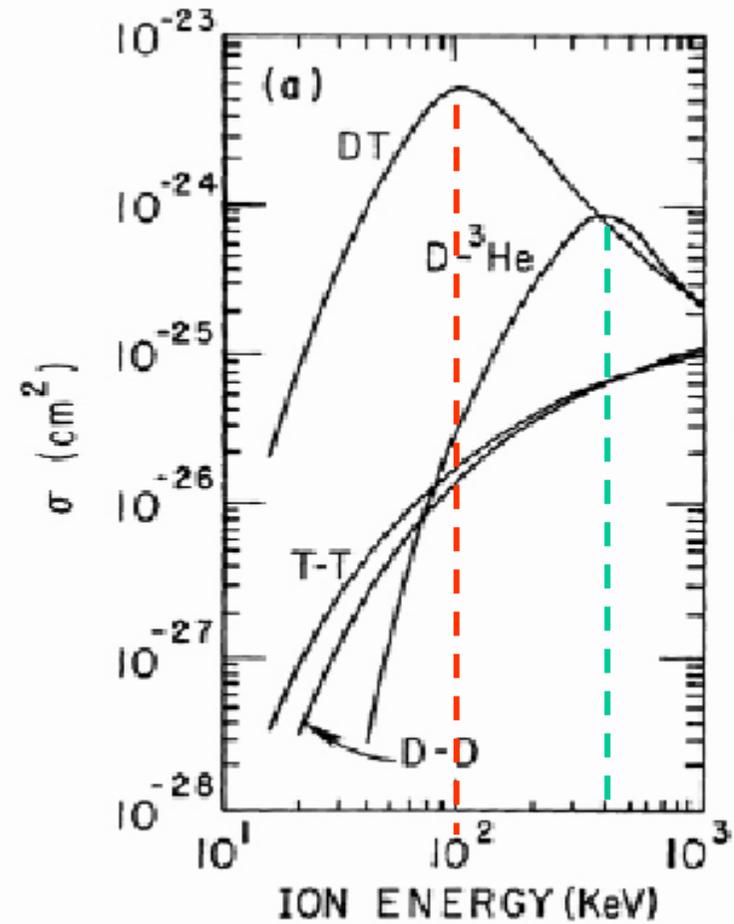
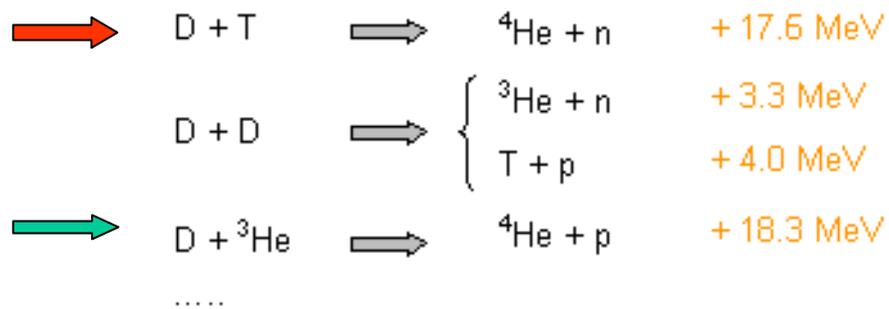
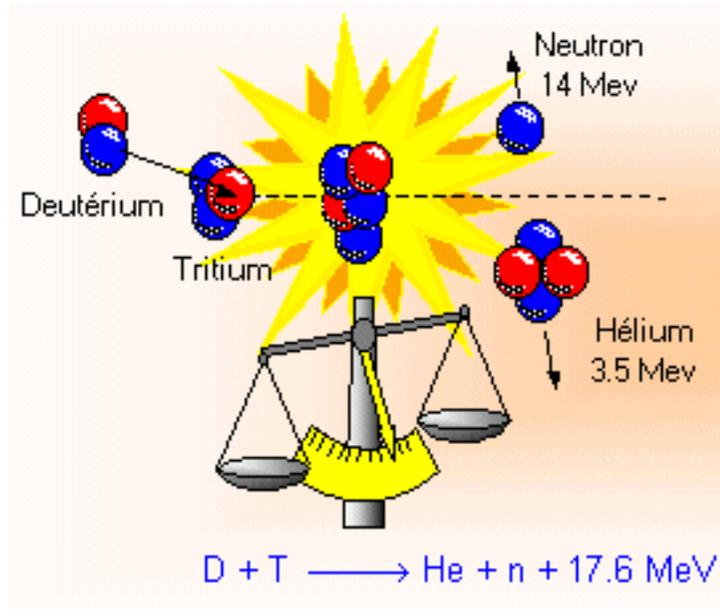
La fusione nucleare e' il processo elementare di produzione energetica nel sole, che è la sorgente primaria di energia utile della terra.

Nel sole e in altri oggetti astronomici si realizzano le condizioni per l' esistenza di **plasm**i **termonucleari** di temperatura sufficiente che emettono energia mediante radiazioni elettromagnetiche

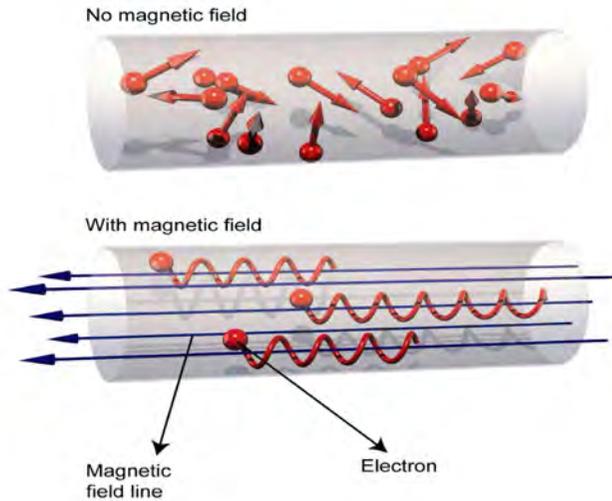


Il confinamento del plasma è dovuto alla forza gravitazionale che e' importante in oggetti di massa astronomica ma insufficiente sulla terra (e solo per questo compatibile con la vita biologica).

Reazioni di Fusione

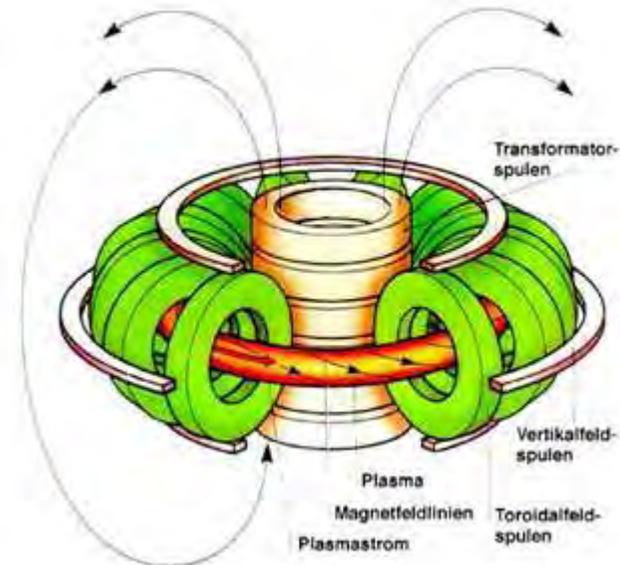


Confinamento magnetico

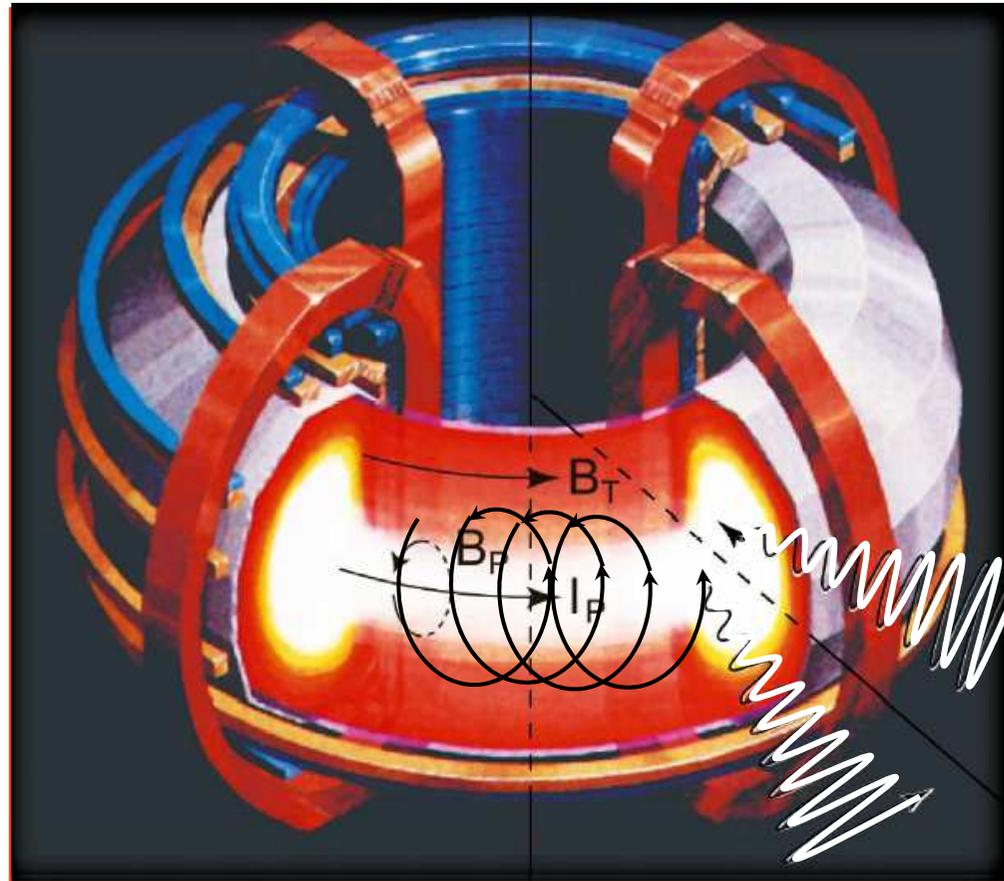


Il confinamento magnetico di un plasma si basa sul fatto che particelle cariche che si muovono in un campo magnetico percorrono delle traiettorie elicoidali lungo le linee

Si utilizzano trappole magnetiche aventi una topologia toroidale, in modo che le linee di forza si richiudano su se stesse



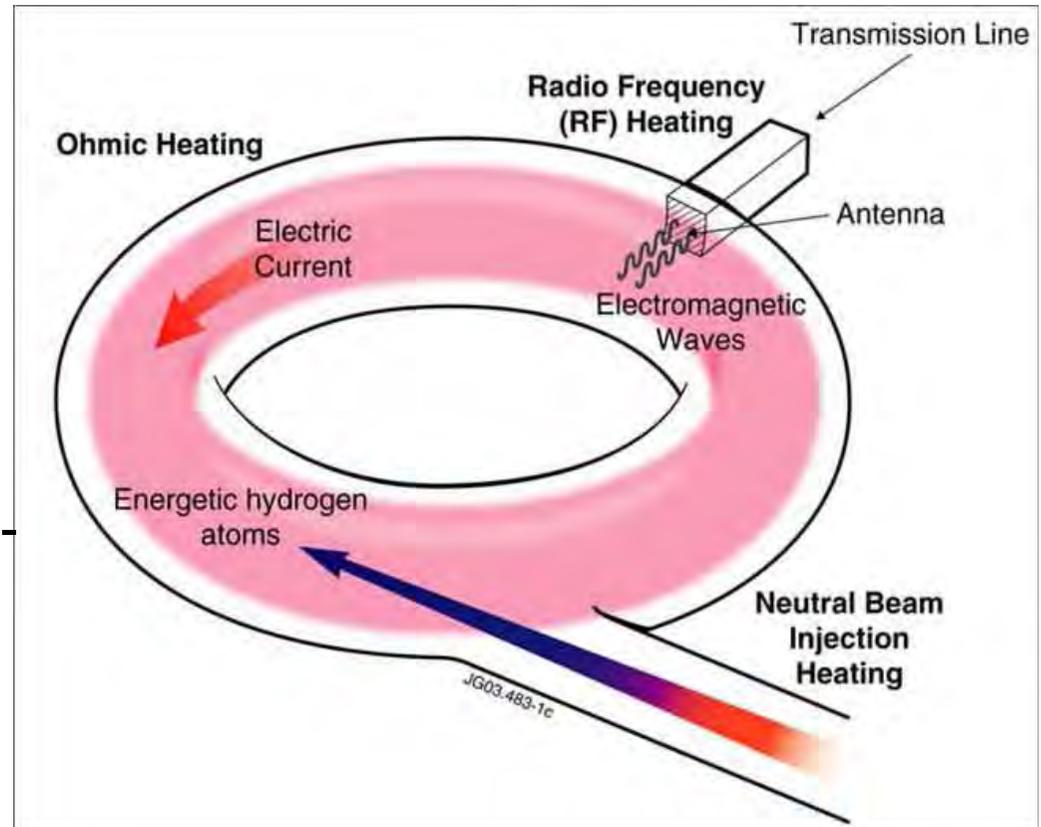
Confinamento magnetico Tokamak



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.



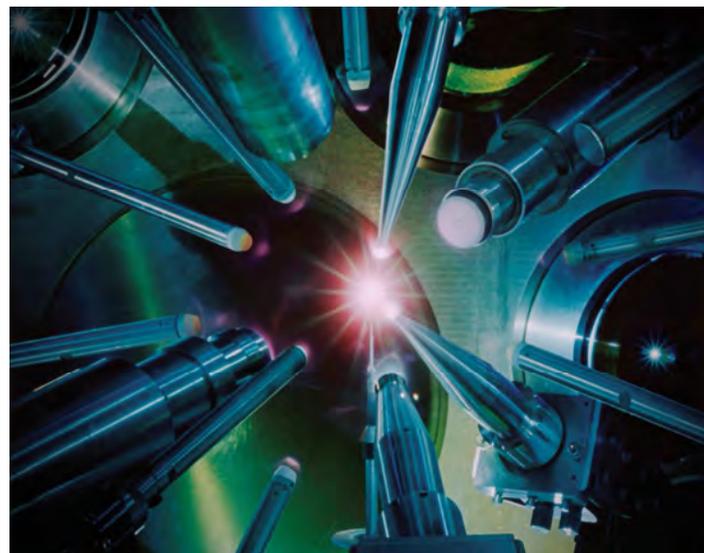
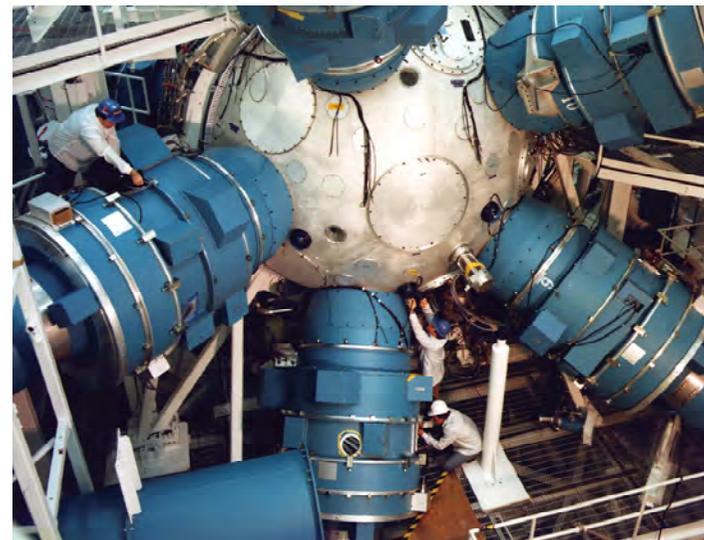
Interno del JET

Il JET /Joint European Torus (Culham, Oxfordshire, UK) e' il tokamak più avanzato finora costruito. Ha prodotto plasmi termonucleari e potenze di fusione fino ad un massimo di 15 MWatt per circa 10 s.

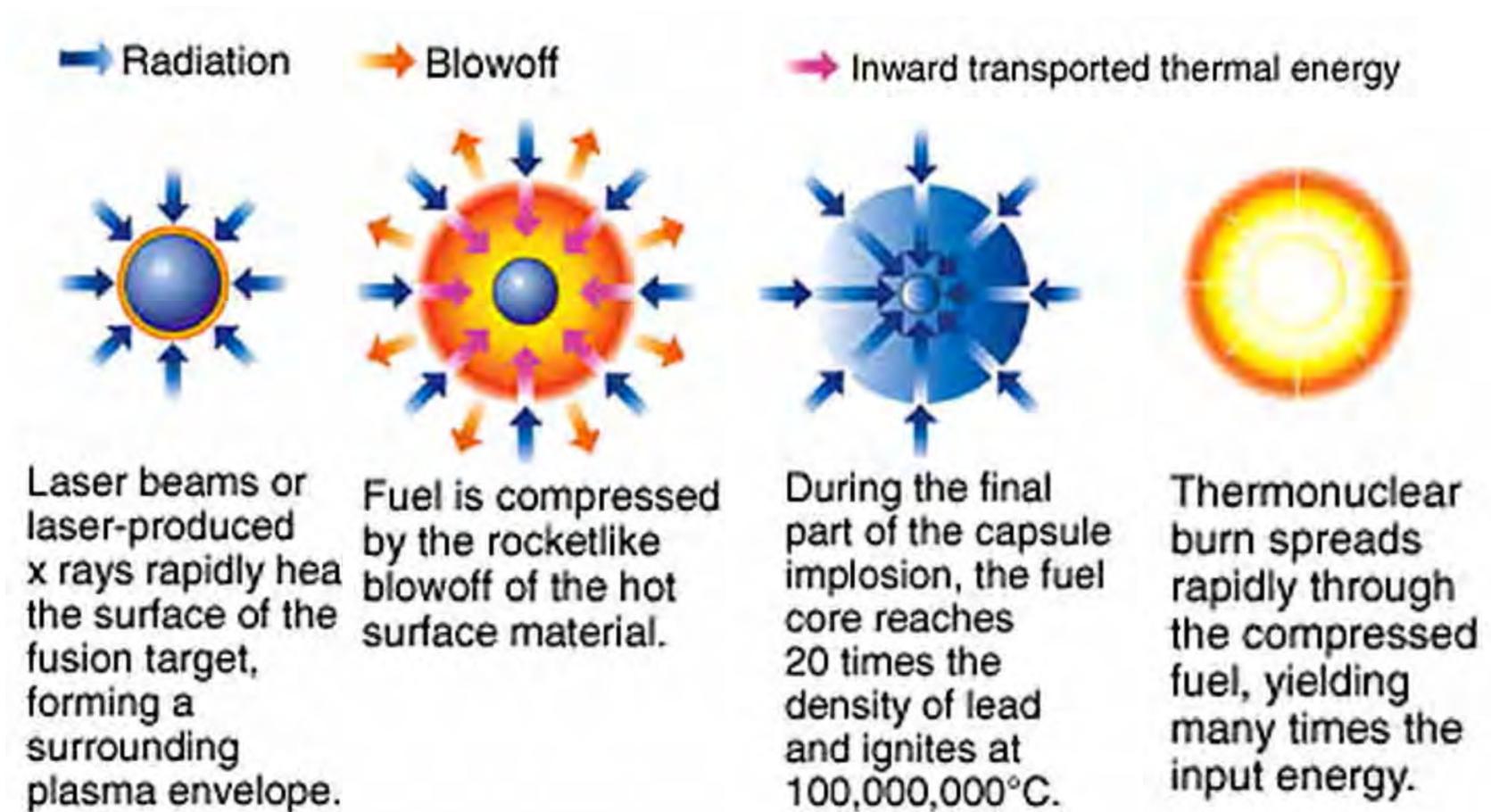


Fusione inerziale

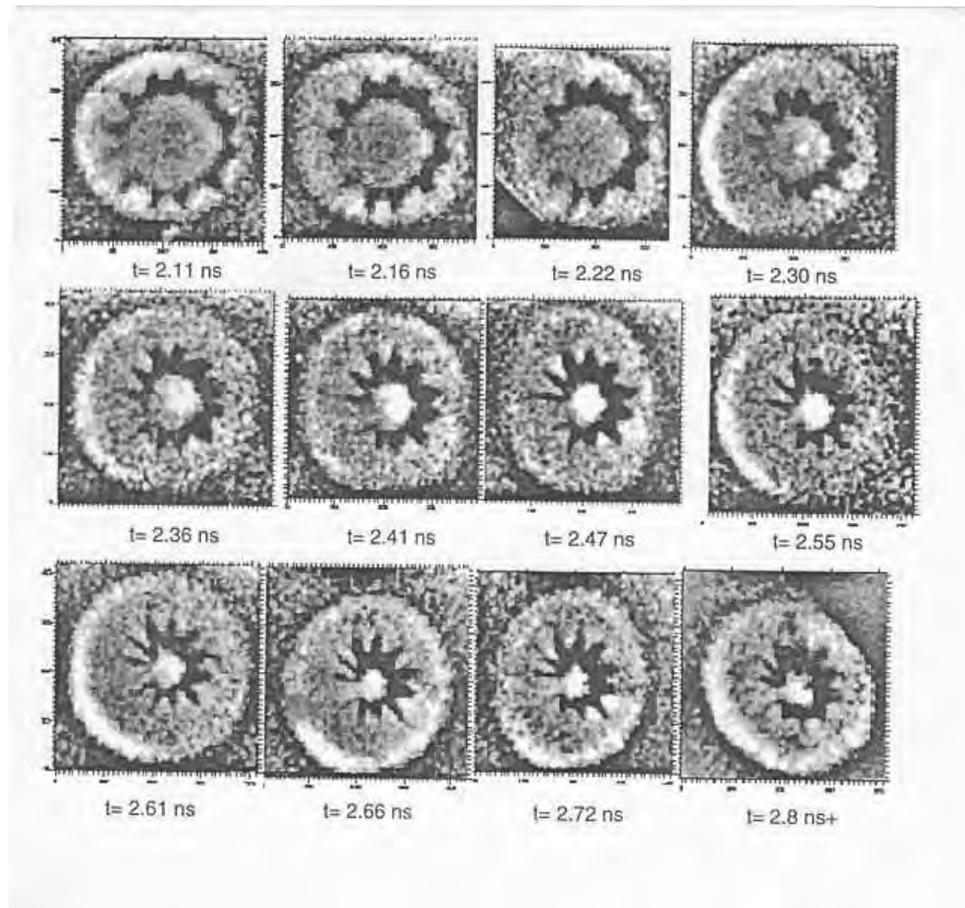
- La fusione inerziale utilizza un metodo di riscaldamento rapido di una pastiglia di D -T allo stato solido (raffreddata ad una temperatura di pochi K) e sottoposta alla radiazione di impulsi laser molto intensi e molto brevi in una camera a vuoto sferica.
- Gli impulsi laser di altissima potenza generano nella materia solida un' onda d' urto che la comprime a densità molto superiori a quella dello stato solido e la riscalda a temperature termonucleari



Fusione da confinamento inerziale



Implosione prodotta dal laser NOVA

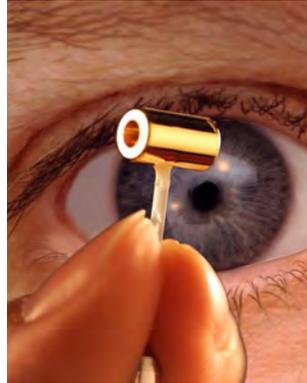


Sviluppo di laser di grande energia

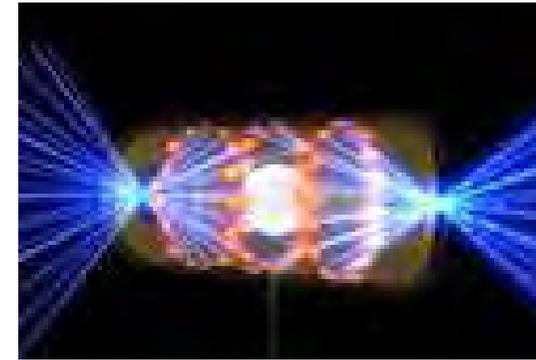
- Nel sistema NIF (National Ignition Facility - Lawrence Livermore Lab, US) i fasci laser sono 192, tutti sincronizzati allo stesso oscillatore
- Ciascun fascio è sottoposto a diversi stadi di amplificazione ottica per una energia finale di ~ 4 MJ
- In questa fase la lunghezza d'onda è spostata dall' infrarosso all' ultra-violetto
- Gli impulsi laser sono molto brevi ($50 \cdot 10^{-12}$ sec) e pertanto le potenze applicate sono enormi: ($\sim 8 \cdot 10^{16}$ Watt).



Immagini dal NIF



Pellets



Indirect Drive



Omega Laser Lay Out

G. Bosia – Energia da Fissione e Fusione nucleare



Inner Vacuum Vessel

Scuola di Studi Superiori- Università di Torino

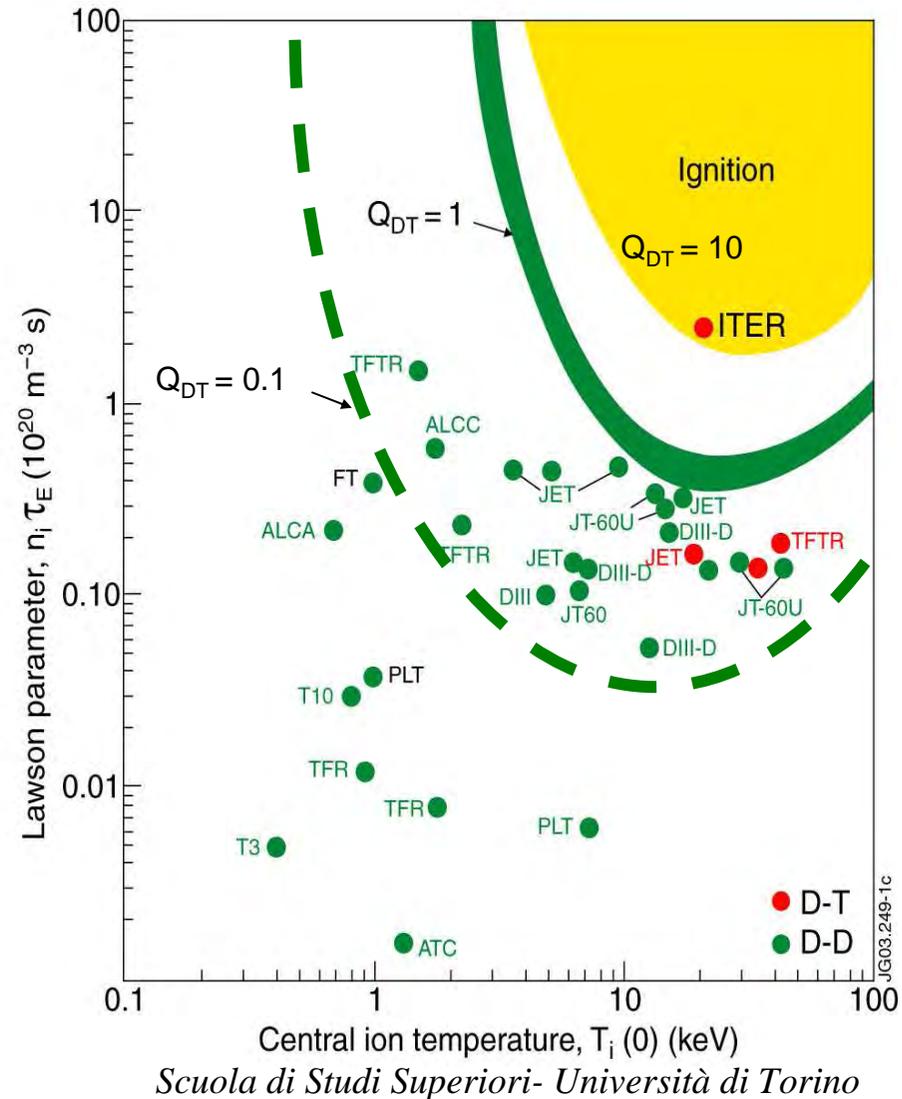
Quanto è lontano un reattore a fusione?

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

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)



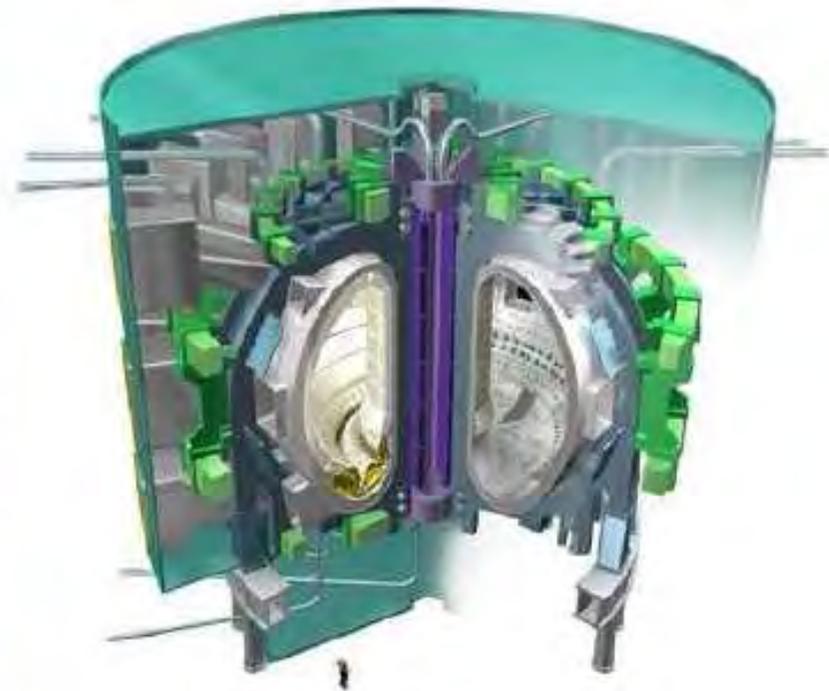
Il progetto ITER

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) è un progetto di collaborazione internazionale iniziato da due anni a Cadarache (F).

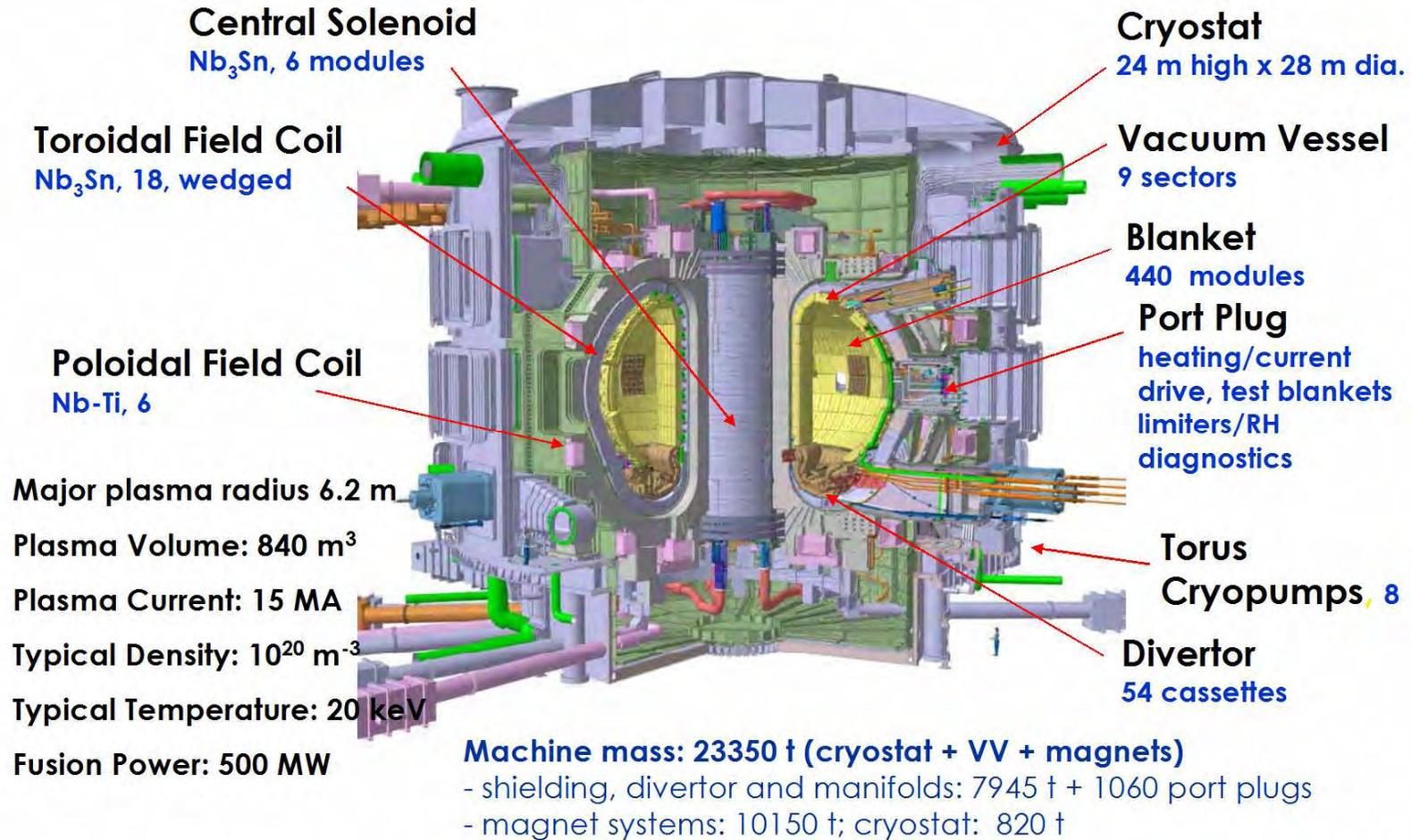
- Il progetto ha lo scopo di dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica di un reattore a fusione termonucleare quale credibile mezzo di produzione di energia per usi pacifici
- Al progetto partecipano EU, JA, US, RF, Cina, Corea, India
- L'Unione Europea ha una partecipazione di maggioranza nel progetto (circa il 50% del costo).che è di gran lunga il più importante progetto mondiale di ricerca sulla fusione nucleare



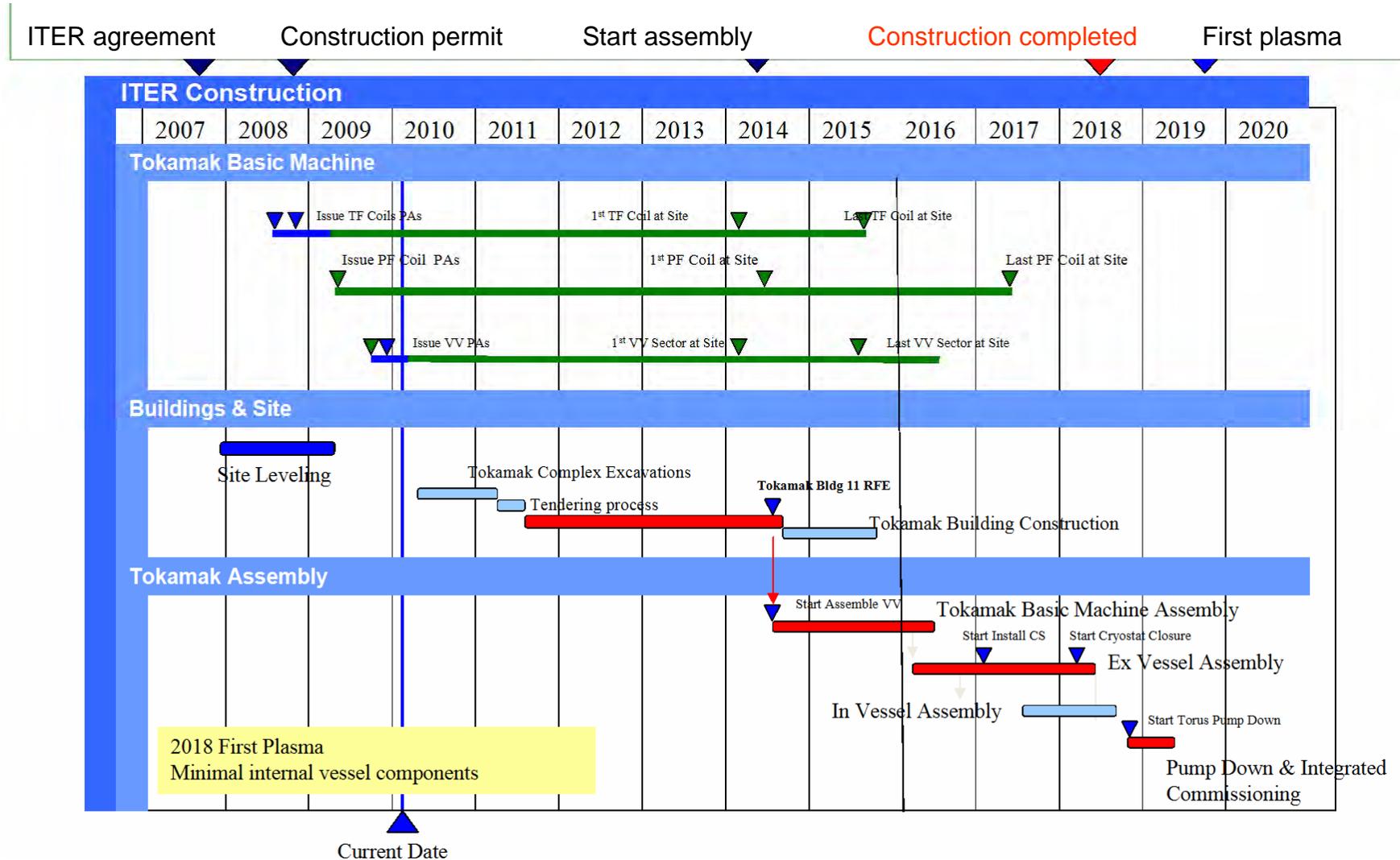
Sito del reattore sperimentale ITER



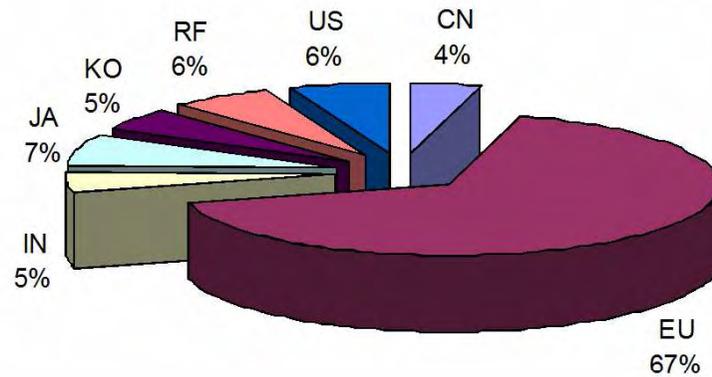
La macchina ITER



ITER Construction schedule



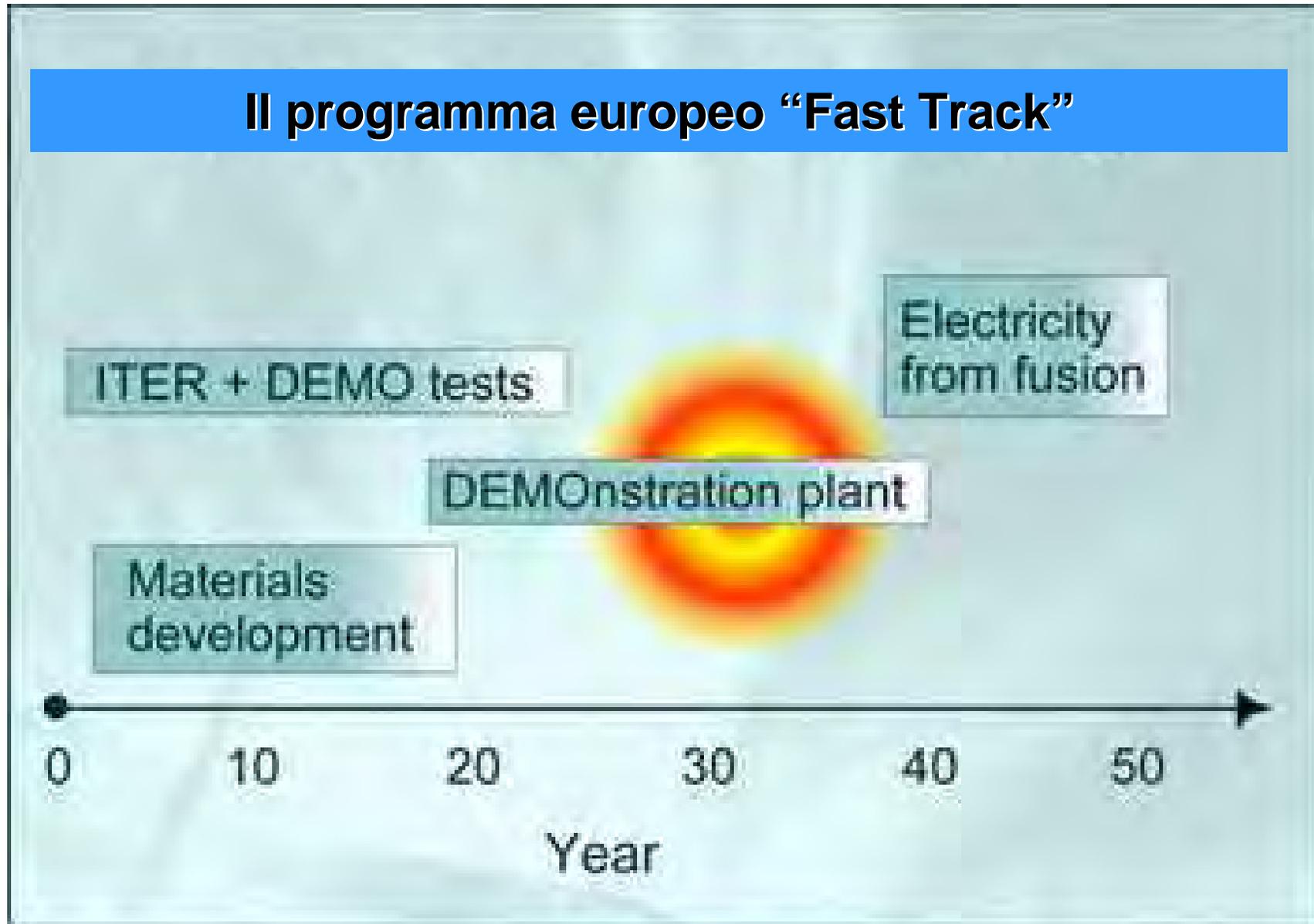
ITER Team at Cadarache



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



Il programma europeo “Fast Track”



Problematiche associate allo sviluppo del nucleare

- **Disponibilità di combustibile**
- **Economicità della produzione energetica**
- **Sicurezza**
- **Impatto ambientale**
- **Produzione e riprocessamento delle scorie**

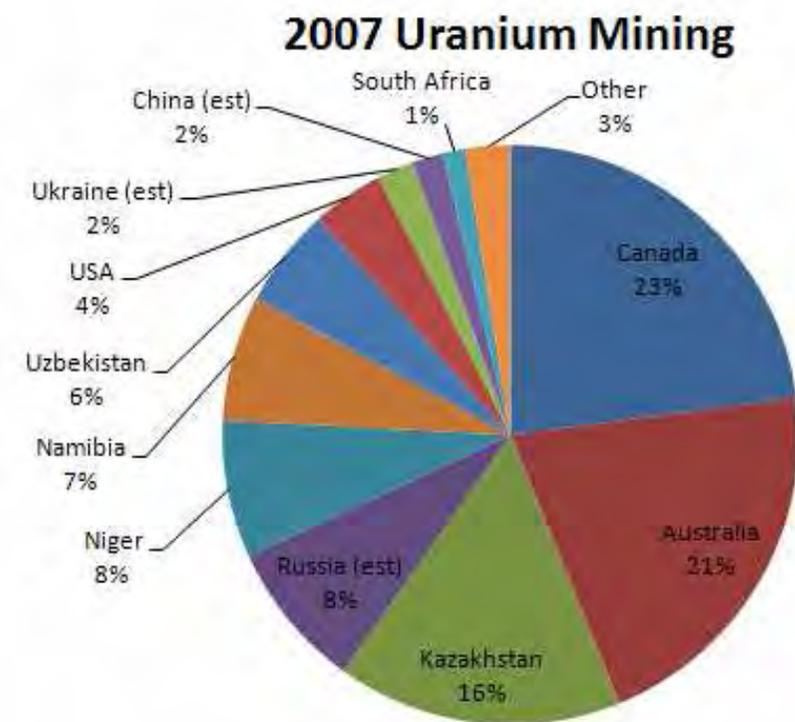
- **Diversione di materiale strategico e proliferazione nucleare.**

Risorse naturali di U_{238} e Th_{232}

- 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

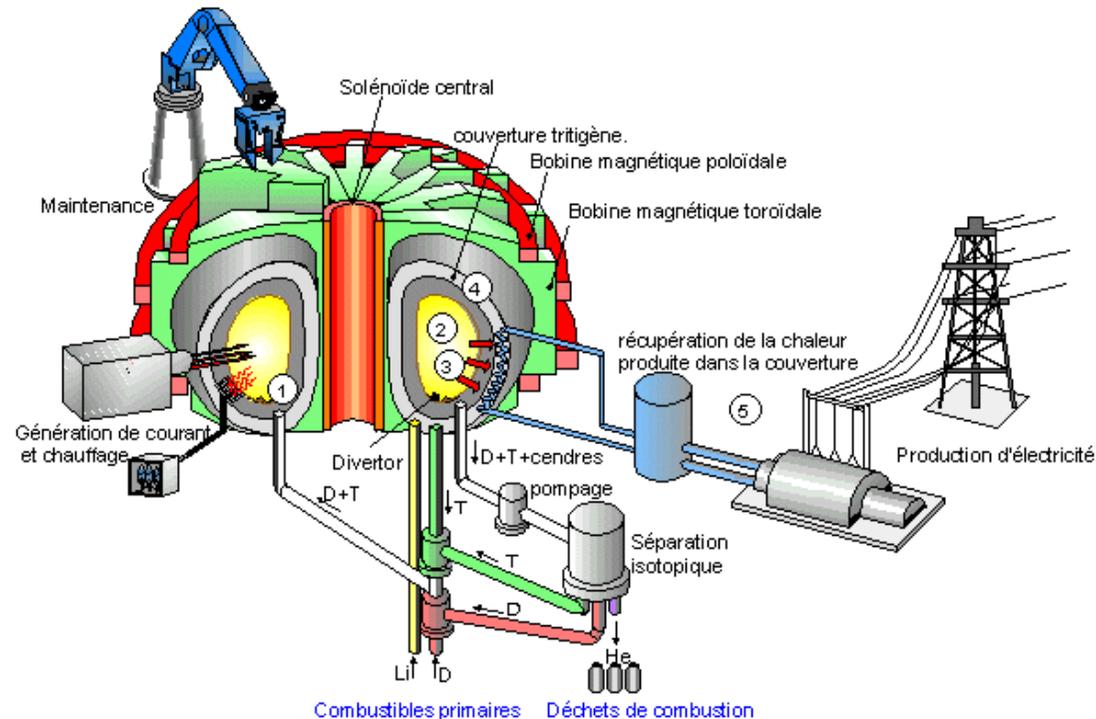
Risorse di Torio: 3 volte più abbondante dell' Uranio

G. Bosia – Energia da Fissione e Fusione nucleare

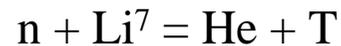


Scuola di Studi Superiori- Università di Torino

Disponibilità di risorse “combustibili” per la fusione



- 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 finora poco usato. Nel reattore a fusione, Il Trizio sarà prodotto a ciclo chiuso, come parte del funzionamento del reattore utilizzando la reazione :



Fissione nucleare : impatto ambientale

Un reattore a fissione non produce prodotti gassosi inquinanti ma solo vapore acqueo, che viene disperso nell' atmosfera mediante torri di raffreddamento



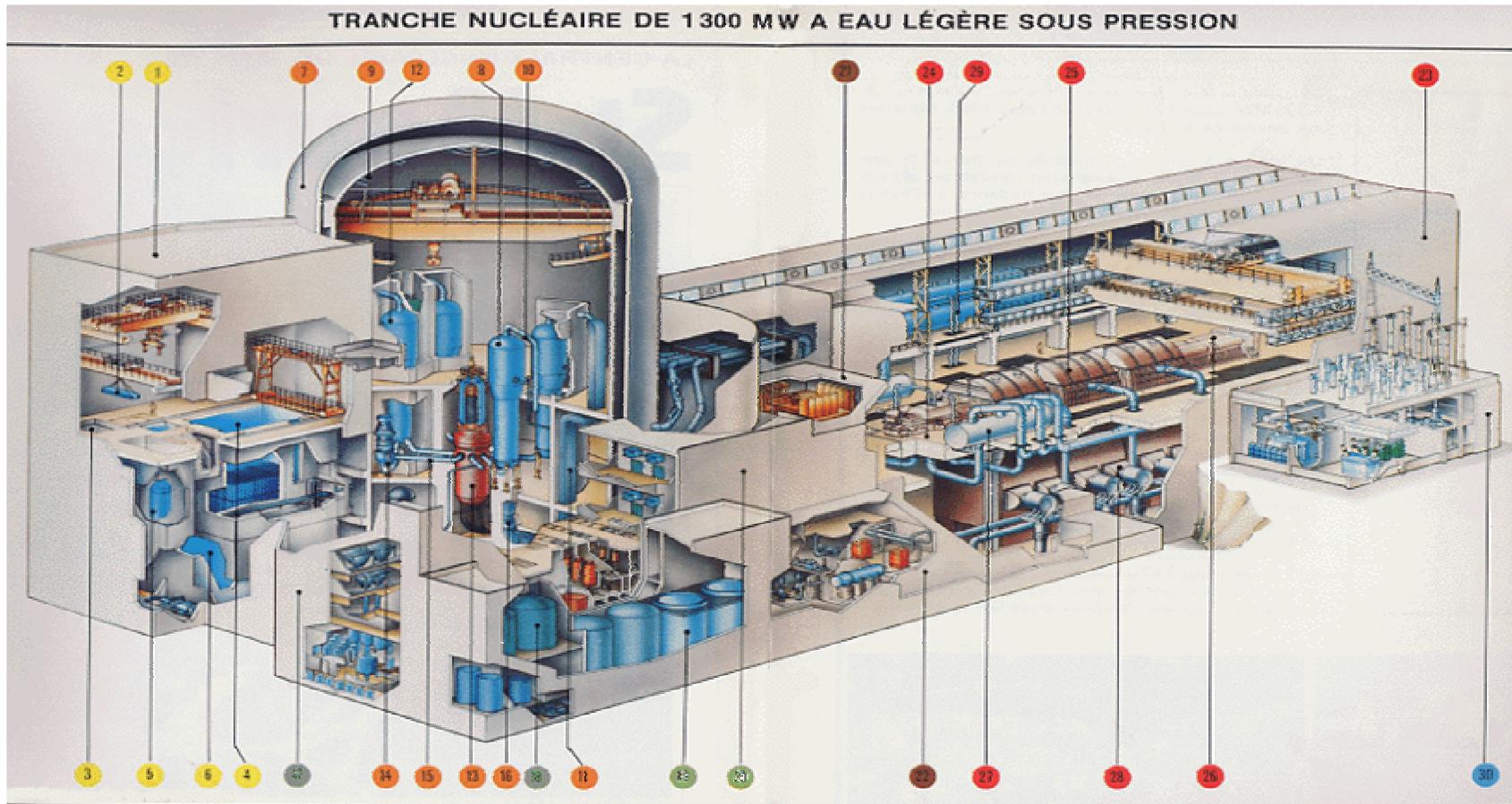
G. Bosia – Energia da Fissione e Fusione nucleare

Scuola di Studi Superiori- Università di Torino

Fusione nucleare: Impatto ambientale

- Un reattore a fissione non produce prodotti gassosi inquinanti ma solo vapore acqueo, che viene disperso nell' atmosfera mediante torri di raffreddamento.
- Il suo funzionamento non ha alcun impatto ambientale
- A differenza dal reattore a fissione non c'è accumulo di combustibile nel nucleo del reattore, ma questo viene introdotto in modo continuo. L' inventario nucleare ed energetico del reattore è pertanto molto limitato. Il funzionamento di un reattore a fusione è
 - A differenza dal reattore a fissione, il funzionamento di un reattore a fusione non produce scorie radioattive primarie (residui di combustibile impoverito). Alla fine della sua vita sono tuttavia prodotte scorie secondarie risultanti dal de-commissioning.

Sicurezza in un reattore a fissione



I reattori in funzione in Europa e US (moderati e raffreddati ad acqua) questo secondo evento non produrrebbe perdite di confinamento dato che sono tutti provvisti da un doppio sistema di contenimento del nocciolo

mo

Costi comparativi per produzione di energia elettrica

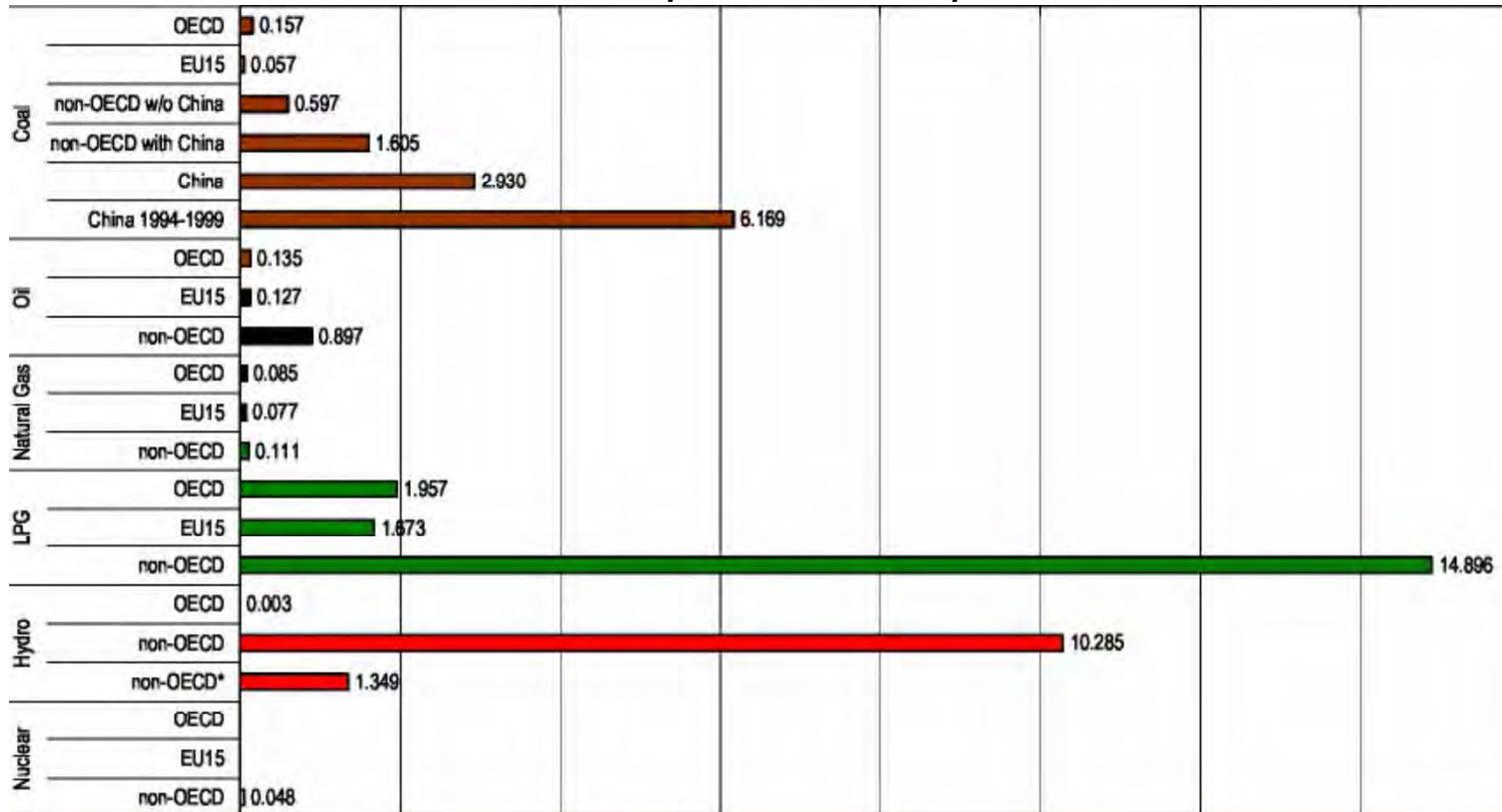
Median Case Specifications	Nuclear	CCGT	SC/USC Coal	Coal w/90%CC(S)	Wind Onshore	Solar PV	
Capacity (MW)	1400.0	480.0	750.0	474.4	45.0	1.0	
Construction cost (\$/kWe)	3681	1018	1916	3337	2237	5759	
O&M (\$/MWh)	14.74	4.48	6.02	13.61	21.92	29.95	
Fuel Cost (\$/MWh)	9.33	61.12	18.21	13.04	0.00	0.00	
CO2 Cost (\$/MWh)	0.00	10.54	23.96	3.22	0.00	0.00	
Efficiency (net, LHV)	33%	57%	41%	35%	-	-	
Load Factor (%)	85%	85%	85%	85%	26%	13%	
Lead time (years)	7	2	4	4	1	1	
Expected Lifetime (years)	60	30	40	40	25	25	
LCOE (\$/MWh)	5%	58.53	85.77	65.18	62.07	96.74	410.81
	10%	98.75	92.11	80.05	89.95	137.16	616.55

Load factor: output energetico effettivo rispetto al valore massimo di progetto

O&M Operation and Maintenance dell' impianto

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 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.



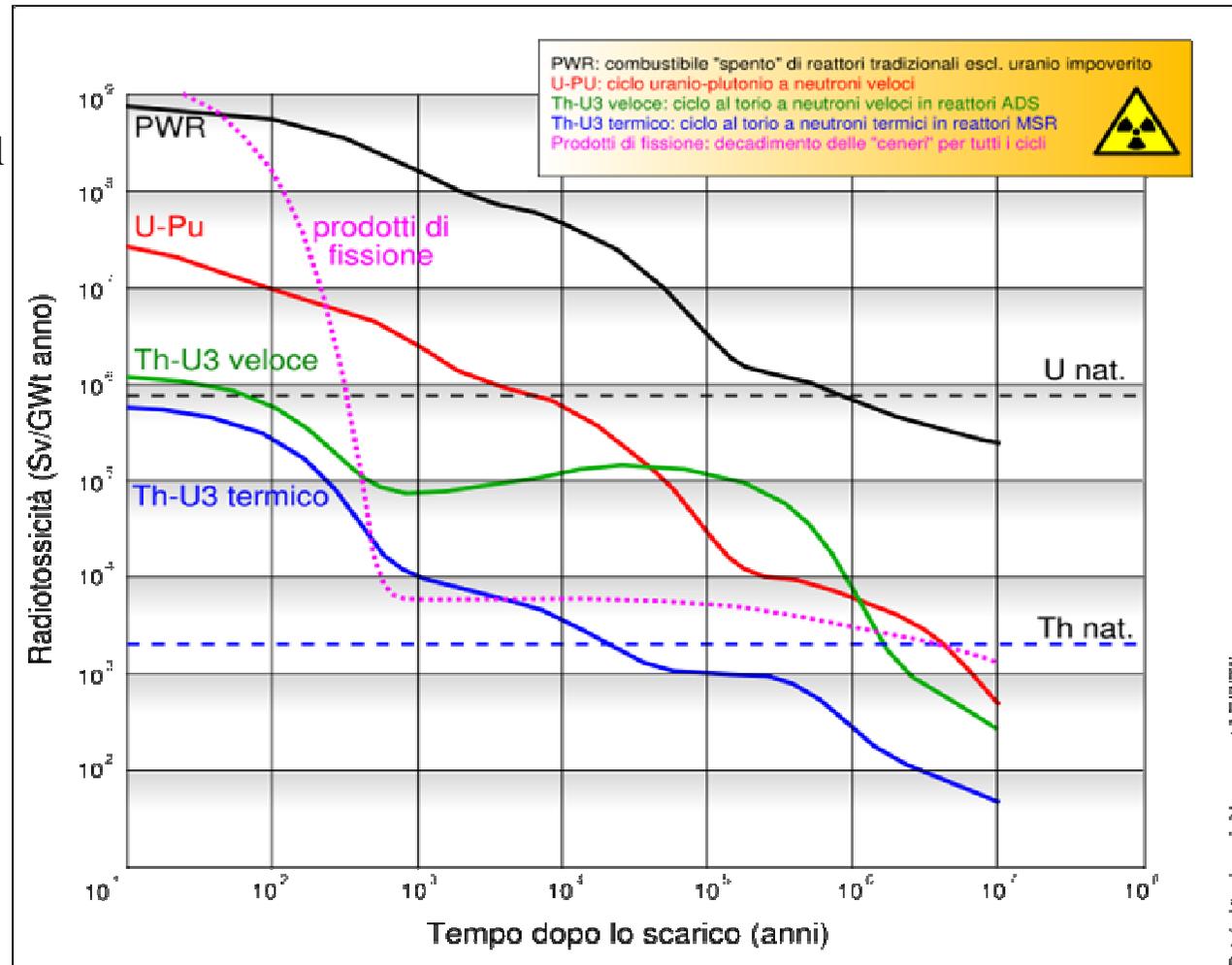
Una immagine significativa delle quantità in gioco mostra la quantità di rifiuto ad alta attività derivante dal combustibile che ha prodotto l'energia elettrica di cui ha bisogno una persona di un paese avanzato per tutta la vita (600 cm³ di scorie totali, 20 cm³ di scorie ad alta attività)

Decadimento radiattivo di materiale fissile

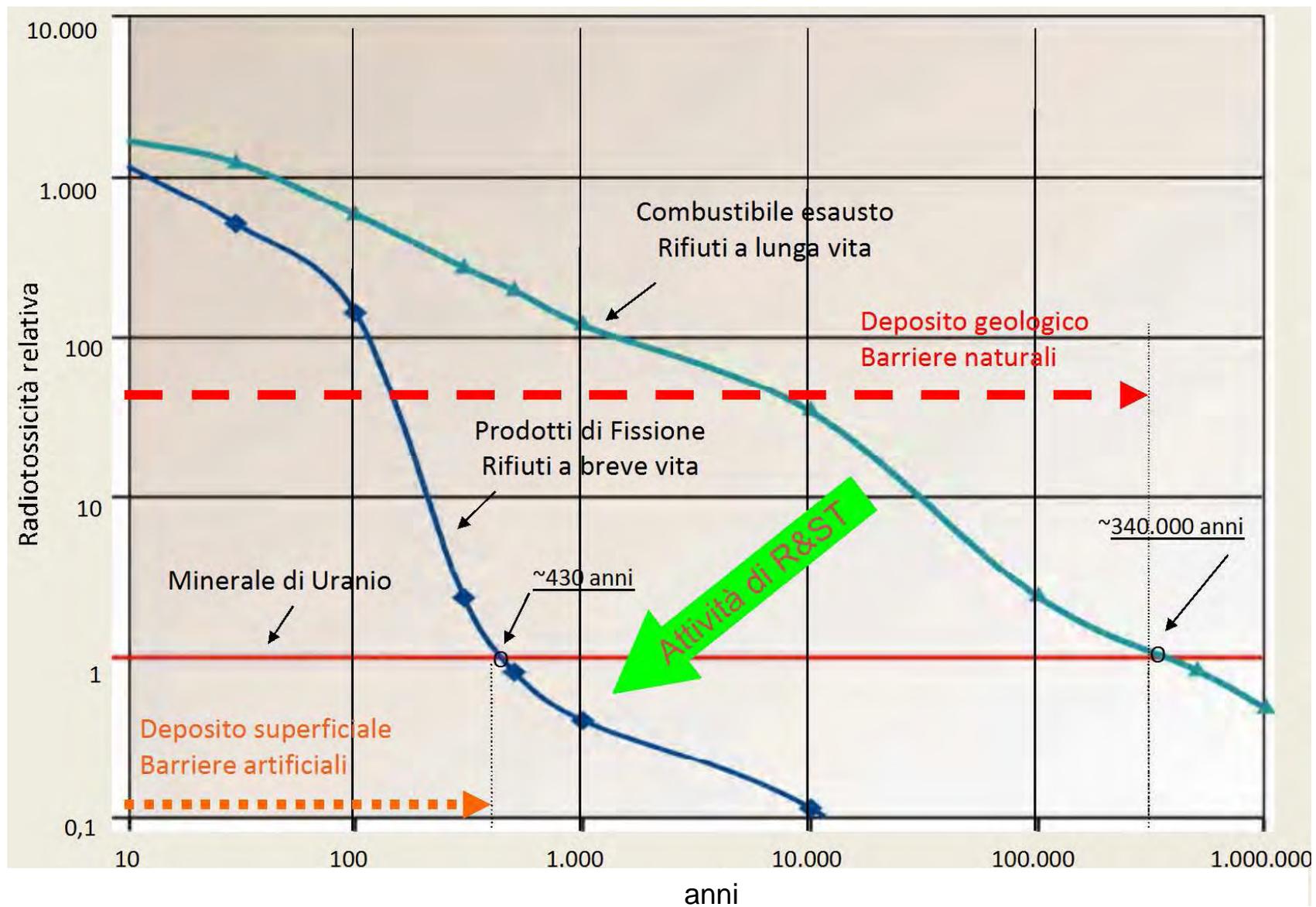
Radiotossicità (in Sv per GW termico all'anno) del combustibile esausto scaricato dai reattori

Curva rossa: reattori veloci U-PU

Curva verde: reattori veloci al Th



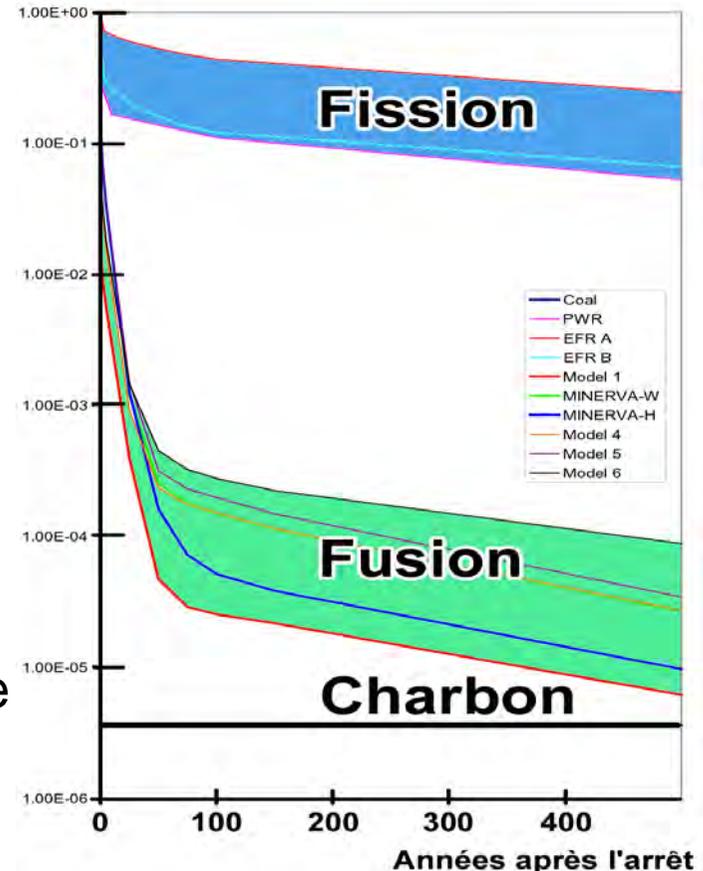
Ciclo del Combustibile con Reattori a Neutroni Veloci



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 dalle strutture del reattore durante il periodo di funzionamento
- I tempi di decadimento radioattivo delle scorie secondarie sono mostrati in figura

Radioattività relativa (ingestion)



Conclusione •

La produzione di energia da fissione nucleare è un processo industriale e tecnologico maturo, a funzionamento continuo, economicamente competitivo e ben regolamentato a livello internazionale, con prospettive di miglioramenti sostanziali nel campo della sicurezza e nella gestione delle scorie.

Il suo sviluppo è stato negativamente influenzato da parallele applicazioni delle tecniche utilizzate alla produzione di armi nucleari, da timori di possibili incidenti (Three Miles Island (1979) e Chernobyl (1986) e dalle difficoltà del pubblico ad accettare siti per lo stoccaggio finale di scorie radioattive, anche dovute a carenze di informazioni e a investimenti nella la gestione delle scorie.

E' tuttavia in grado di giocare un ruolo primario di supporto economico dell' uso di energie rinnovabili nell' attuale processo di decarbonizzazione atmosferica, in particolare se le scale di tempi proposte sono realistiche.

L' energia da fusione ha diverse attrattive, dal punto di vista energetico, ed economico e ambientale, anche nei confronti dell' energia da fissione, e sarà certamente disponibile nel lungo termine come metodo primario di produzione energetica.

Tuttavia appare ancora piuttosto lontana dal poter fornire un contributo allo sforzo di *sostituzione energetica* attualmente auspicato .