

riassunto della lezione del 25.05



La fornitura di **energia** in modo **equo, sicuro e sostenibile** a chiunque serva è un problema fondamentale per l'umanità, che richiede la sinergia tra diverse ambiti di ricerca.

Classificazione delle fonti energetiche e **LCSA** sono necessarie per le scelte.

E' possibile ottenere più energia per unità di massa di combustibile utilizzando **reazione nucleari** invece che reazioni chimiche.

Modificando il nucleo dell'atomo, dove agiscono **forze** molto intense, si può liberare una grande quantità di energia grazie alla perdita di una piccola quantità di massa legando diversamente i **nucleoni** tra di loro.

Fusione di nuclei leggeri e **fissione** di nuclei pesanti.

La **fusione**, che avviene naturalmente nelle **stelle**, richiede che il combustibile venga **riscaldato** (10^8 K) e **confinato** per tempi tali da innescare la reazione, comportando un elevato **investimento** di energia.

I prodotti della **fusione** (nuclei di He) hanno **impatto trascurabile** sull'ambiente.

La costruzione di una **centrale a fusione** non è prevista a breve tempo, viste le difficoltà di tipo tecnologico per soddisfare il **criterio di ignizione**.



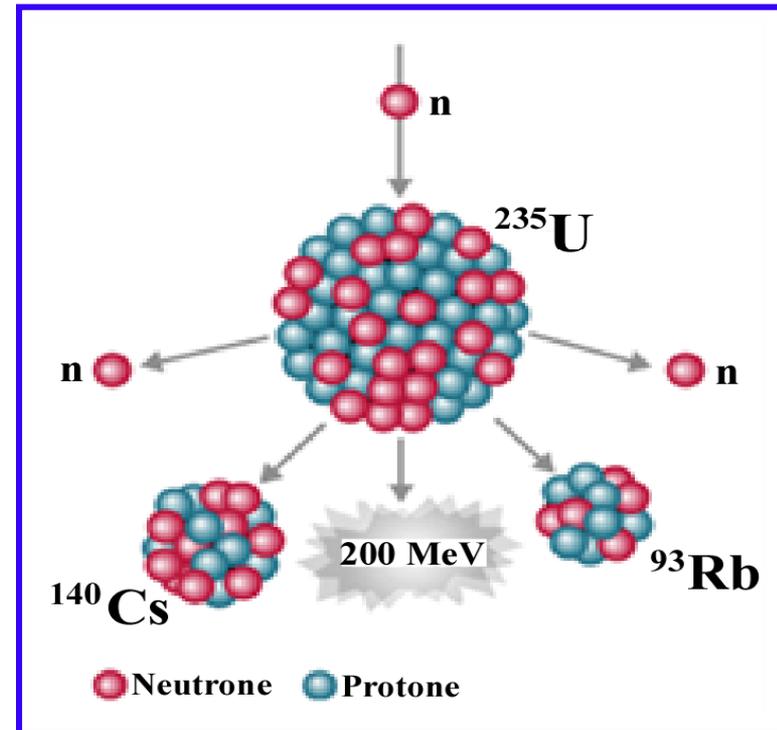
**fissione nucleare,
centrali nucleari a fissione,
un reattore sperimentale a fusione,
centrali a combustibili fossili,
energie rinnovabili.**



reazioni nucleari: fissione

Affinché avvenga una reazione di fissione nucleare è necessario che un **nucleo pesante** (più del Fe) si scinda in due nuclei più **leggeri**: questo avviene se il nucleo viene **colpito** da una particella di opportuna energia.

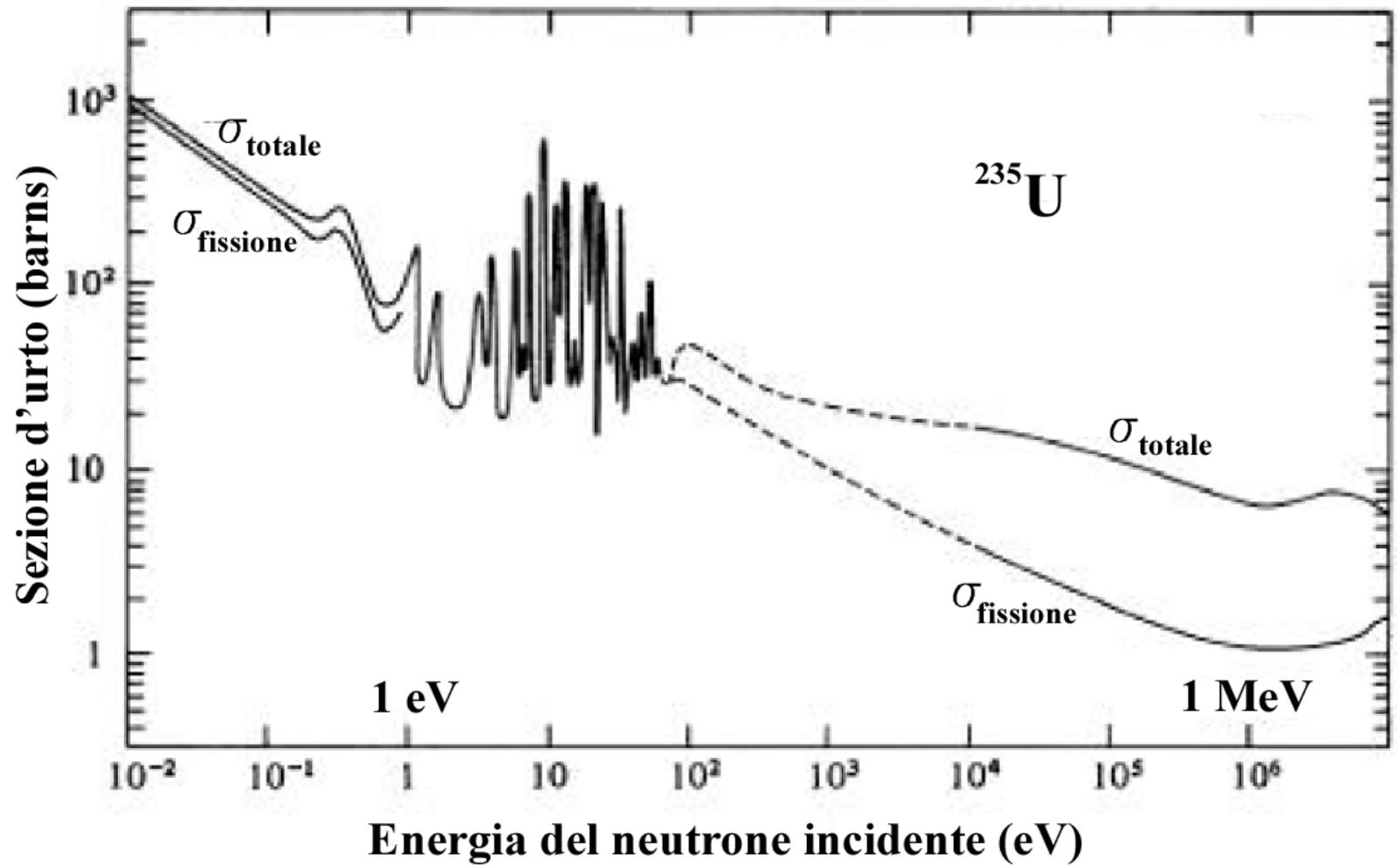
Il **difetto di massa** porta alla liberazione di energia. Ad esempio, nella fissione dell'isotopo 235 dell'uranio (U^{235}) mediante un neutrone lento (o termico) si libera una energia di circa 200 MeV (cioè 3.2×10^{-11} J).



reazioni nucleari: fissione



Sezione d'urto per un neutrone dell' U^{235} $E_n = \frac{1}{2} m_n v_n^2$



reazioni nucleari: fissione

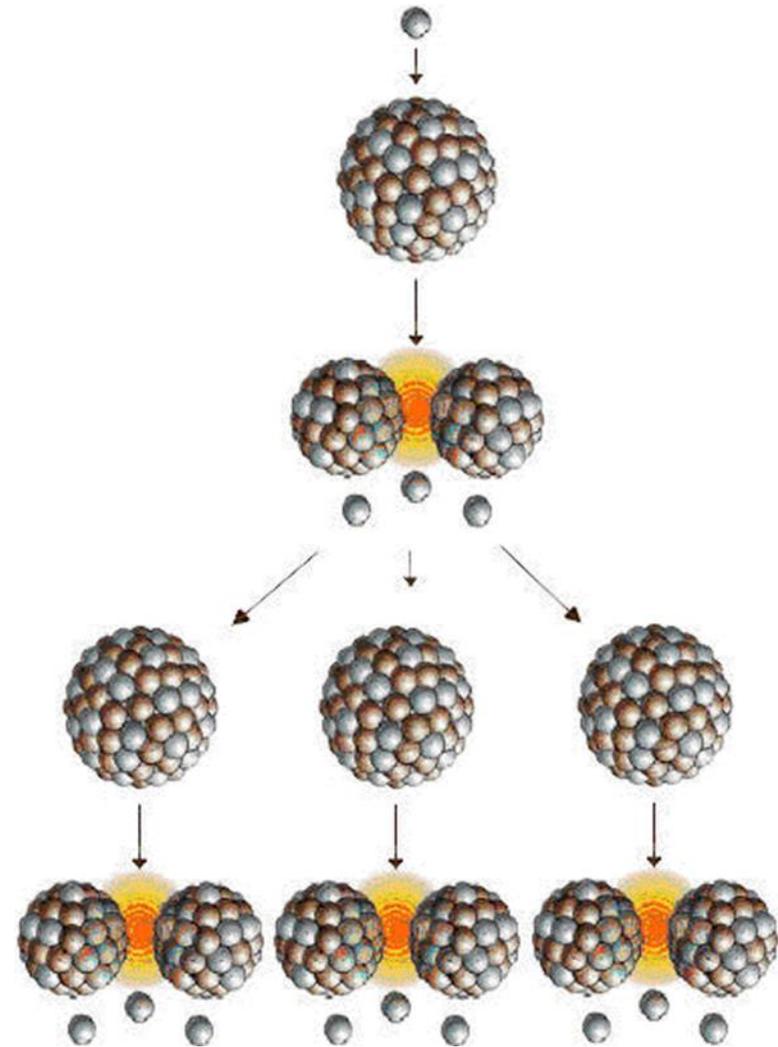


I neutroni prodotti in una reazione di fissione possono poi, a loro volta, colpire altri nuclei fissili dando quindi luogo ad una **reazione a catena**, in grado di proseguire fino a quando sia disponibili materiale fissile.

I **neutroni** non avendo carica elettrica sono particolarmente idonei per la fissione perché non vengono respinti dalle cariche positive del nucleo.

I neutroni usciti dalla fissione sono però molto energetici (200 MeV) e vanno **rallentati** perché possano produrre altre reazioni.

L'energia tolta ai neutroni viene utilizzata dai reattori per **scaldare** acqua.



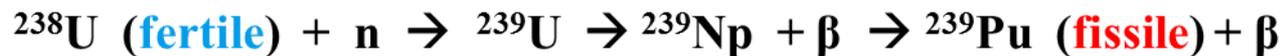
reazioni nucleari: fissione



La produzione di energia da reazioni nucleari di fissione può essere realizzata utilizzando come “combustibile” vari elementi chimici quali, ad esempio, **Uranio** U e **Torio** Th (che esistono in natura) e **Plutonio** Pu (prodotto artificialmente da reazioni nucleari). Di ognuno di tali elementi esistono diversi isotopi.

Alcuni isotopi sono **fissili**: se i loro nuclei sono colpiti da neutroni di energia opportuna possono subire la reazione di fissione del nucleo. In questo caso, si producono due nuclei più leggeri del nucleo bersaglio e alcuni (solitamente 2 o 3) neutroni (veloci). La massa totale dei “prodotti” risulta leggermente inferiore alla massa dei “reagenti” (nucleo bersaglio più neutrone incidente). La differenza di massa si trasforma in energia (convertita quasi completamente in calore).

Altri isotopi, detti **fertili**, possono (mediante reazioni nucleari) produrre nuclidi fissili. Ad esempio:



reazioni nucleari: fissione



Tra gli elementi utilizzati come combustibile nei reattori nucleari quello largamente più usato è l'**Uranio**. Esso esiste in natura fondamentalmente sotto forma di due diversi isotopi: uno **fissile** mediante neutroni termici (U^{235}) ed uno non-fissile con neutroni termici (U^{238}) ma solo con neutroni veloci. Quest'ultimo isotopo (**fertile**) mediante una reazione nucleare può trasformarsi nell'isotopo 239 del Plutonio (Pu^{239}), anch'esso fissionabile, anche mediante neutroni termici.

Il processo di produzione di Pu^{239} è particolarmente rilevante nei reattori nucleari **veloci** nei quali non è richiesta la moderazione dei neutroni prodotti nella fissione. Inoltre, il numero di neutroni prodotti nella fissione del Pu^{239} è sensibilmente più elevato con neutroni veloci.

Dei due isotopi naturali dell'Uranio, quello fissile è presente in piccola percentuale, pari a **0.7%** circa. In molti tipi di impianti nucleari ad uranio è necessario, per poter mantenere la reazione a catena, **augmentare** la percentuale di ^{235}U presente nel combustibile nucleare: ciò è ottenuto mediante un processo di **arricchimento** isotopico.



Poiché l'energia dei neutroni prodotti dalla fissione di un nucleo fissile è troppo elevata per poter dare luogo con probabilità non trascurabile a nuove fissioni e quindi a consentire la **reazione a catena**, si rende necessario diminuire l'energia cinetica dei neutroni (cioè rallentarli, o moderarli) fino a che essa non raggiunga un valore per la quale la **sezione d'urto** di fissione dei nuclei fissili è sufficientemente elevata.

Attualmente gli impianti nucleari nei quali si sfrutta questo fenomeno per la produzione di energia (termica, come energia primaria, ed elettrica, come energia secondaria) sono i **reattori nucleari termici**.

Indipendentemente dal tipo di reattore nucleare utilizzato per la produzione di energia elettrica, il calore prodotto dalle reazioni di fissione riscalda un fluido refrigerante che viene poi utilizzato per produrre vapore che entra in una turbina collegata ad un generatore di corrente elettrica.

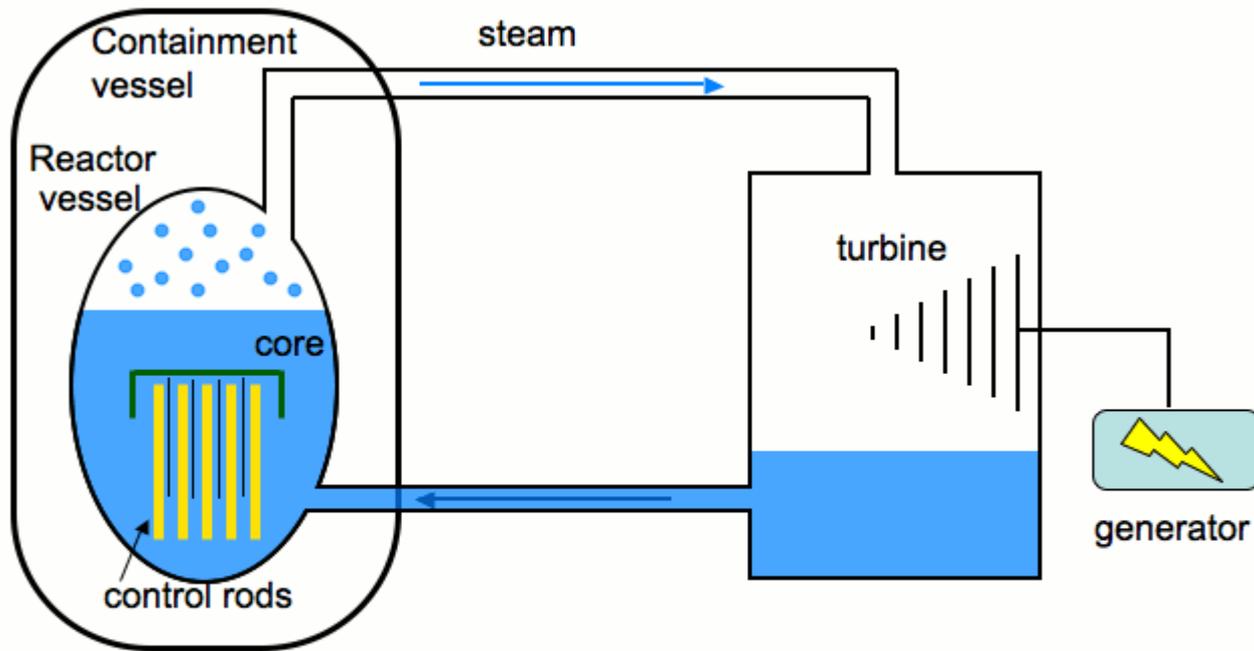
energia chimica → termica → cinetica → meccanica → elettrica

energia nucleare → termica → cinetica → meccanica → elettrica

reattori nucleari a fissione



Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione Boiling Water Reactor (BWR) simile agli impianti coinvolti nell'incidente di Fukushima. Il calore sviluppato dalla reazione di fissione nel reattore viene trasferito all'acqua che si trasforma in vapore all'interno del contenitore (vessel) del reattore. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente.

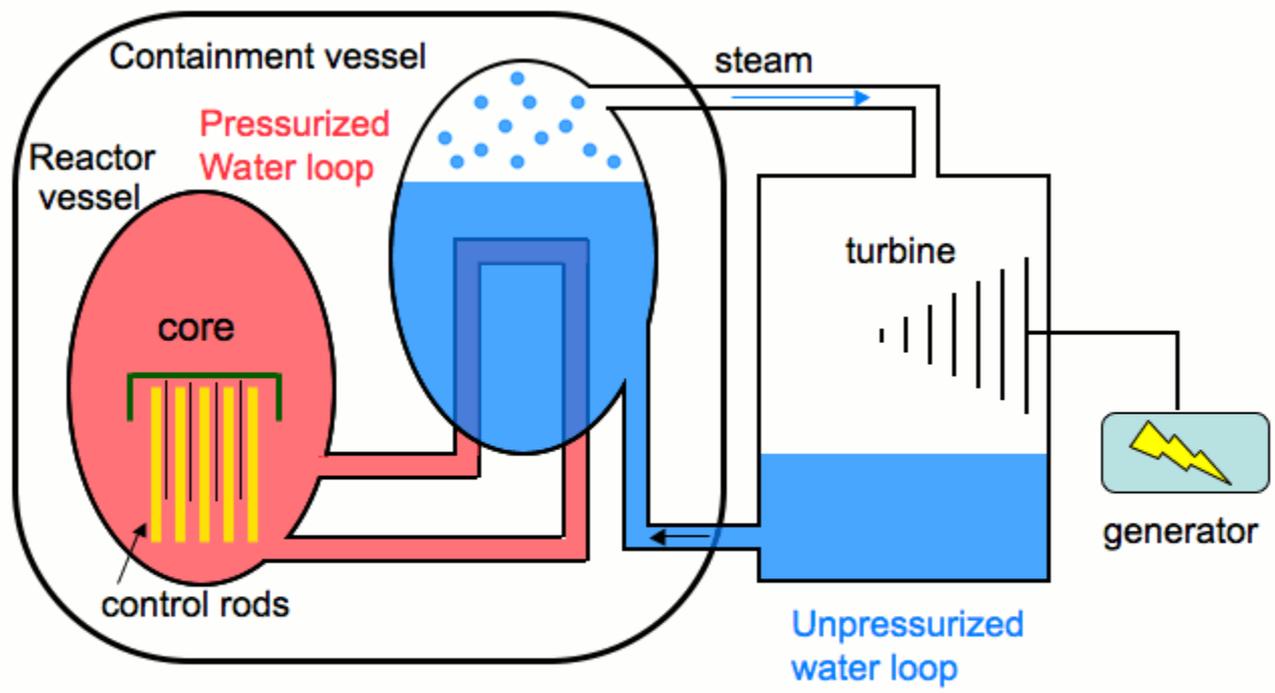


Boiling Water Reactor

reattori nucleari a fissione



Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione Pressurized Water Reactor (PWR). Il calore sviluppato dalla reazione di fissione all'interno del reattore viene trasferito tramite un fluido refrigerante a un flusso di acqua che genera vapore. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente che alimenterà la rete elettrica.



Pressurized Water Reactor

reattori nucleari a fissione

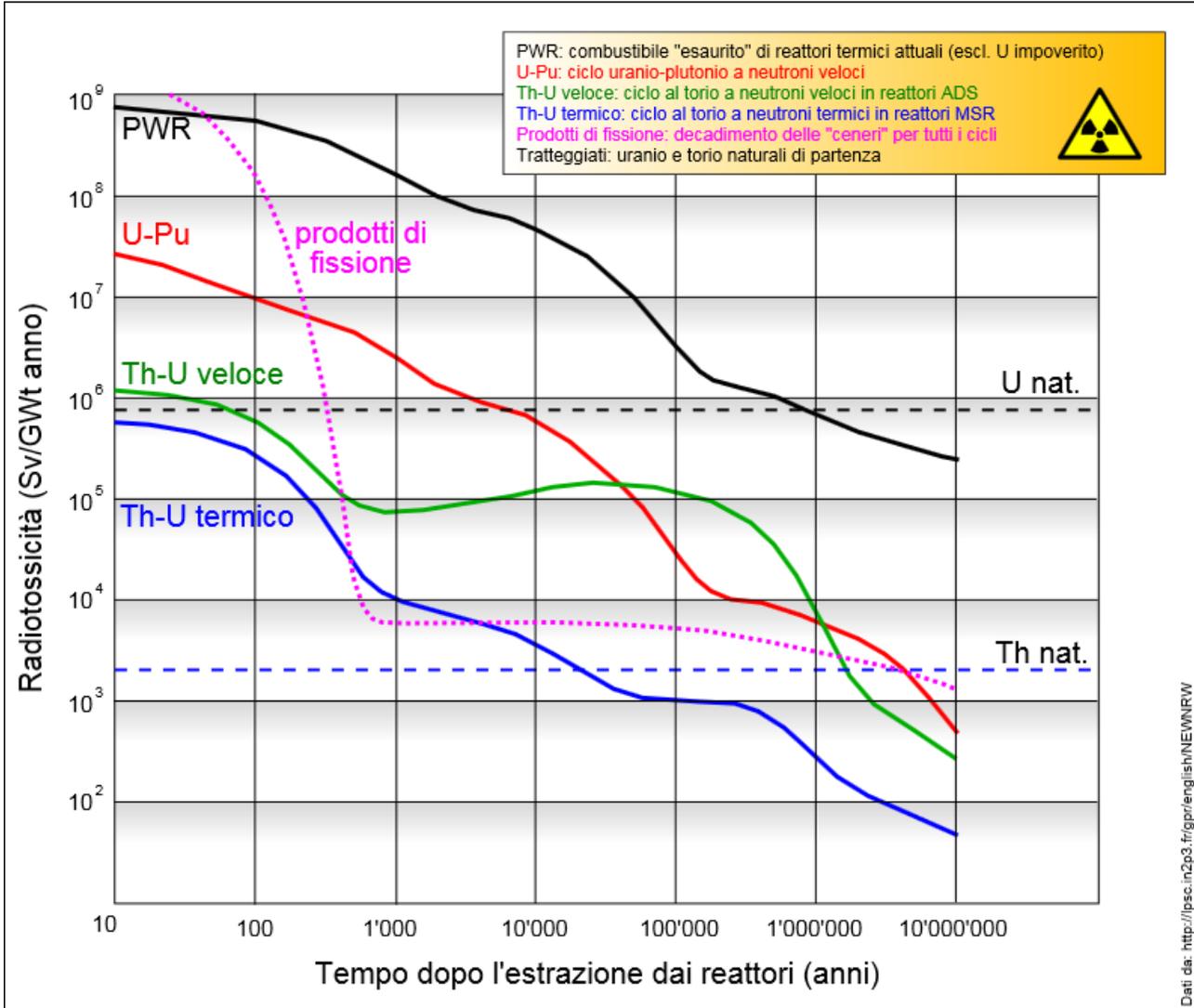


La dose di energia assorbita si misura in Sievert (Sv)

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} / 1 \text{ Kg}$$

Radiotossicità (in Sv per GWt all'anno) del combustibile esausto scaricato dai reattori nucleari per diversi cicli del combustibile, in funzione del tempo.

- Prodotti della fissione**
- Materiale contaminato**
- Incidenti**



Dati da: <http://psc.in2p3.fr/gpr/english/NE/NWRW>



Ia generazione (1950-1960): costruzione e sperimentazione di molti **prototipi** delle più varie concezioni.

Ia generazione (1970-1980): costruzione di un **gran numero** di centrali commerciali per la produzione di energia elettrica, in massima parte ad uranio ed acqua naturale. È dai reattori di questa generazione che proviene la maggior parte di energia elettronucleare prodotta **attualmente** nel mondo. Circa **440 reattori** nucleari (PWR, o BWR) sono operativi in più di 30 paesi. La potenza elettrica di ciascuno di tali impianti è di circa 600-900 MWe.

IIIa generazione (>2000): reattori già certificati e **disponibili** sul mercato. Comprende innanzi tutto i reattori avanzati ad acqua naturale, alcuni già in funzione in Advanced Boiling Water Reactor (ABWR da 1400 MWe) altri, come lo European Pressurized Water Reactor (EPR da 1.600 MWe), in fase di costruzione: il primo esemplare di EPR (Olkiluoto 3, III+) entrerà in funzione in Finlandia nel novembre **2020**, altri sono in fase di approntamento o di trattativa commerciale in Europa, Asia e Medio Oriente.



IV generazione (2030-2040?): allo stato concettuale. una iniziativa avviata nel gennaio 2000, allorquando dieci Paesi si sono uniti per sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, operativi **fra 20 o 30 anni**.

Requisiti: a) **sostenibilità** (massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi); b) **economicità** (rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici); c) **sicurezza** e affidabilità (bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore, tolleranza a gravi errori umani) non dovranno richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, non essendoci uno scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito; d) resistenza alla proliferazione e **protezione fisica** contro attacchi terroristici.



Incidente di Chernobyl (1986)

Due ipotesi: 1) errore umano nella gestione di un test (disattivazione di sistemi di sicurezza); 2) errore di progettazione dell'impianto.

Un incontrollato aumento della potenza del reattore portò ad una scissione dell'acqua di raffreddamento in O ed H, aumentando grandemente la pressione all'interno del reattore, che giunse a far saltare il coperchio del reattore con conseguenti fuoriuscite di materiale radioattivo.

Incidente di Fukushima (2011)

La causa principale fu un terremoto con conseguente tsunami che allagò la centrale, non sufficientemente protetta dal mare.

In caso di terremoto, la centrale sospende automaticamente le reazioni inserendo barre di controllo, attivate da generatori dedicati. L'onda di tsunami, alta 13 metri, ha superato la diga di protezione (alta 10 metri) allagando i motori ed interrompendone il funzionamento, ed il pompaggio di liquido di raffreddamento delle barre. Ciò ha generato numerosi incendi ed esplosioni.

reattori nucleari a fusione



Sia nel caso di impianti a confinamento magnetico che a confinamento inerziale basati sulla reazione deuterio-trizio viene utilizzato come combustibile una miscela di deuterio (esistente in natura, ed estraibile dall'acqua del mare) e di trizio (isotopo radioattivo, non esistente in natura ma prodotto artificialmente mediante reazioni nucleari).

Il trizio T può essere anche prodotto nella stessa macchina a fusione, sfruttando reazioni nucleari prodotte dai neutroni originati dalla fusione stessa.

Ad esempio $\text{Li}^6 + \text{n} = \text{He}^4 + \text{T} + 4.86 \text{ MeV}$

Il Li^6 è presente (7.5%) nel litio naturale che abbonda nelle rocce della crosta terrestre (30 parti su un milione per unità di peso) ed è presente, in concentrazione minore, anche negli oceani.

Il combustibile per la fusione nucleare è pertanto costituito da Deuterio e Litio entrambi presenti in natura in quantità significative.

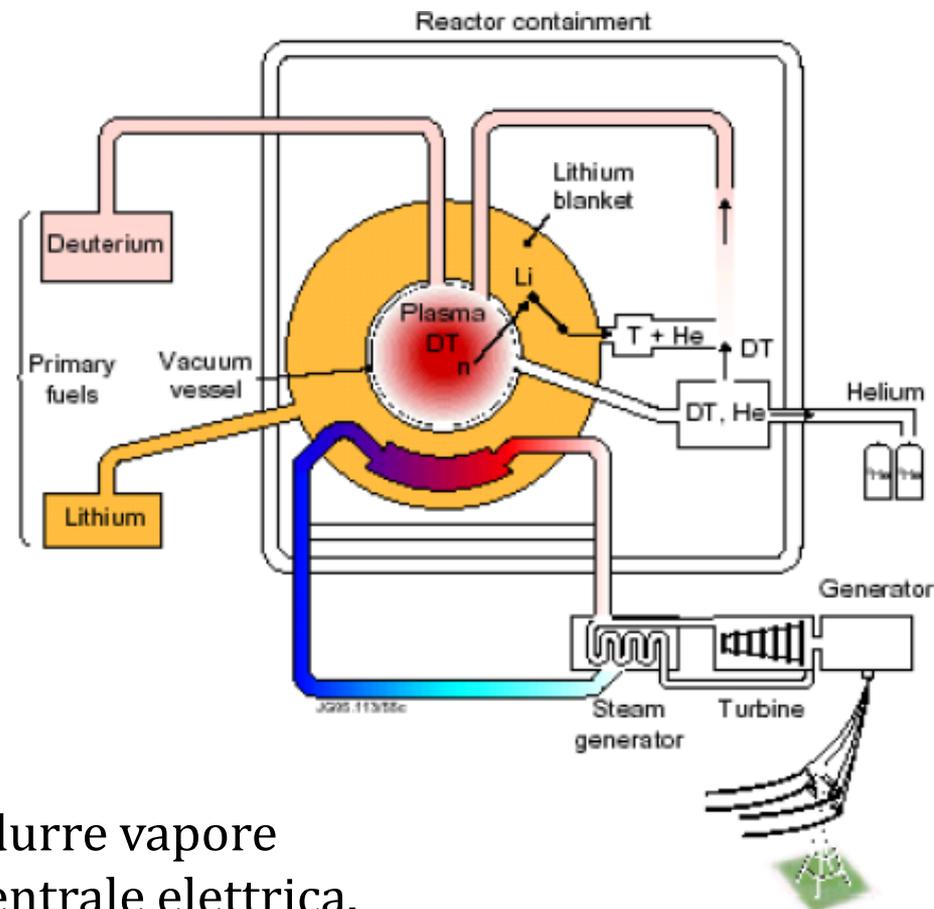


Schema di un impianto nucleare a fusione

Il plasma confinato a $100\text{-}200 \cdot 10^6 \text{ K}$ deve essere rifornito di combustibile (D e T). I neutroni, non confinati, reagiscono con il mantello di Li che circonda la camera toroidale, dando origine a T che viene quindi estratto e riciclato per fornire plasma.

He trasferisce la sua energia al plasma e sostiene i nuovi processi e viene pompato fuori dal toro insieme a parte del plasma per recuperare le particelle di D e T che non hanno reagito.

L'energia liberata dalle reazioni, in particolare quella trasportata dai neutroni, viene recuperata sotto forma di calore generato nel mantello e nella prima parete ed utilizzata per produrre vapore come in uno schema convenzionale di centrale elettrica.





Per dimostrare la **fattibilità tecnologica** di un impianto nucleare a fusione e prima di dare il via alla costruzione di impianti prototipi **pre-commerciali**, si è costituita una impresa raggruppante sette grandi partners mondiali (Comunità Europea, USA, Russia, Giappone, Cina, India, Corea del Sud) al fine di costruire un impianto **sperimentale** a fusione di tipo **tokamak**, di taglia paragonabile a quella di un futuro impianto commerciale. Tale impianto, denominato **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor), è in costruzione congiuntamente dai sette partners presso il centro nucleare francese di Cadarache (in Provenza, Francia).

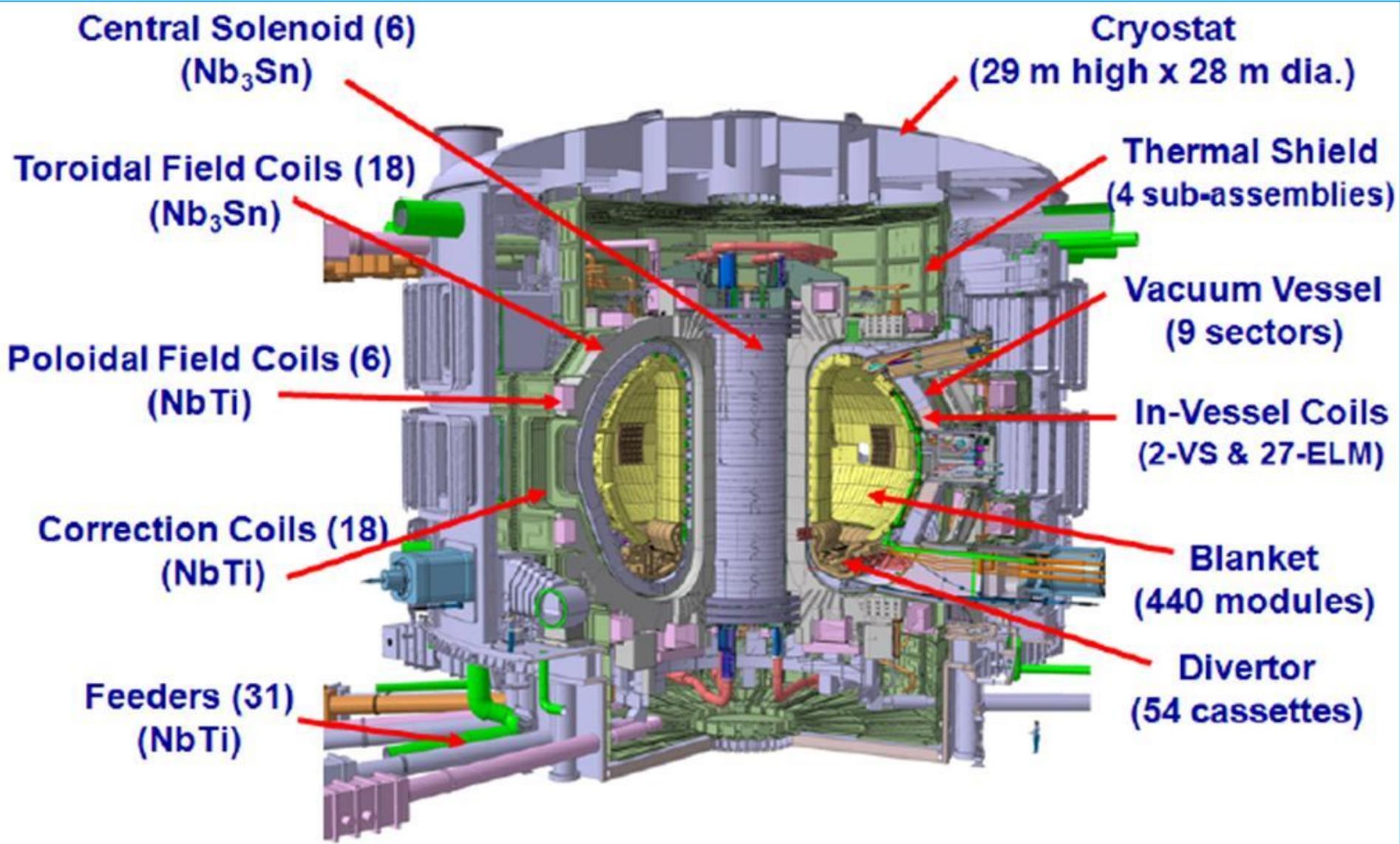
La costruzione e la messa in esercizio dell'impianto richiederanno circa **N** anni. La vita utile di ITER è prevista in circa 30 anni. Il costo stimato per ITER (progettazione, costruzione ed esercizio per 20-30 anni) è di circa **10 miliardi di euro** (costi 2008) rivisti a 15, con un costo di gestione di **290 milioni all'anno**.

Il primo plasma è atteso per il 2025 mentre l'inizio dell'operatività è sarà nel **2035**.

reattori nucleari a fusione



Il tokamak di ITER: 29 m di altezza, 28 m diametro e circa 23000 t di massa



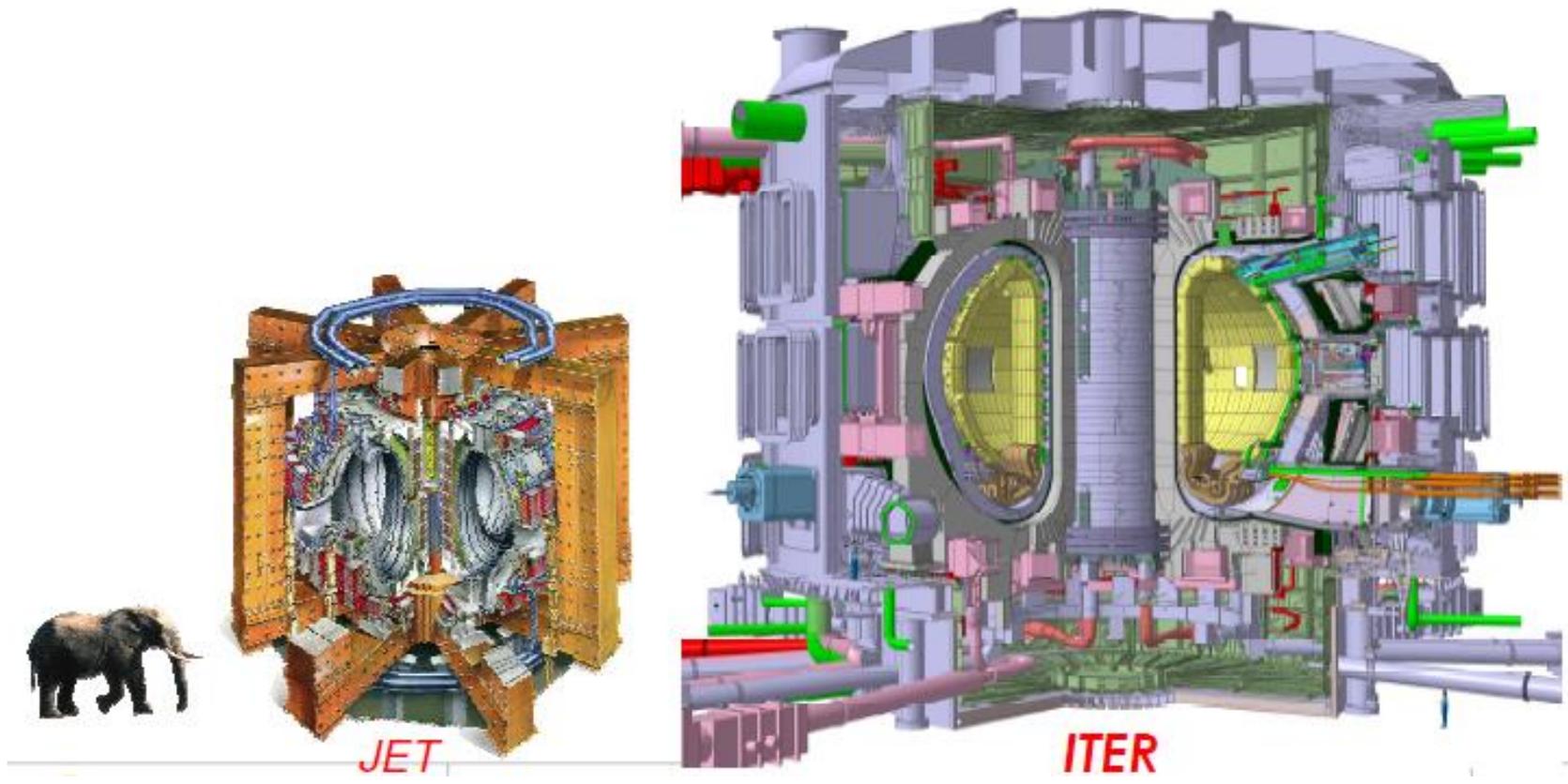
reattori nucleari a fusione



Confronto tra ITER e il Joint European Torus (JET, 1973)

$Q(\text{JET-1991}) = 0.15$

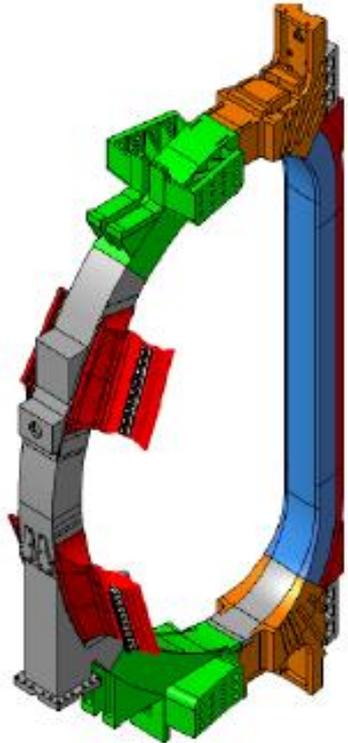
$Q(\text{JET-1997}) = 0.65$





Massa di un elemento superconduttore per produrre il campo toroidale

TF Coil – Mass Comparison



Mass of (1) TF Coil:
~360 t
16 m Tall x 9 m Wide

Boeing 747-300
(Maximum Takeoff Weight)
~377 t

reattori nucleari a fusione



2018/04



reattori nucleari a fusione





Caratteristiche di ITER:

Volume del plasma	840 m³
B	5.3 T
i	15 MA
T	8.7 keV = 100 10⁶ K
N	1.3 10²⁰ m⁻³
P_{in}	50 MW
τ_E	3.4 s
P_{out}	500 MW
Q	10



1. reazione di fusione **$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n (+17.6 \text{ MeV})$** :
 - richiede molta energia per l'innesco,
 - richiede soluzioni tecnologiche superiori (confinamento),
 - combustibile disponibile,
 - assenza di rifiuti/emissioni,
 - ancora non disponibile (40/50 anni?);

2. reazioni di fissione **${}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}^{93}\text{Rb} + {}^{140}\text{Cs} + 3n (+200 \text{ MeV})$** :
 - tecnologia acquisita,
 - combustibile disponibile,
 - assenza di emissioni,
 - combustibile e scorie radioattivi,
 - incidenti potenzialmente catastrofici.