



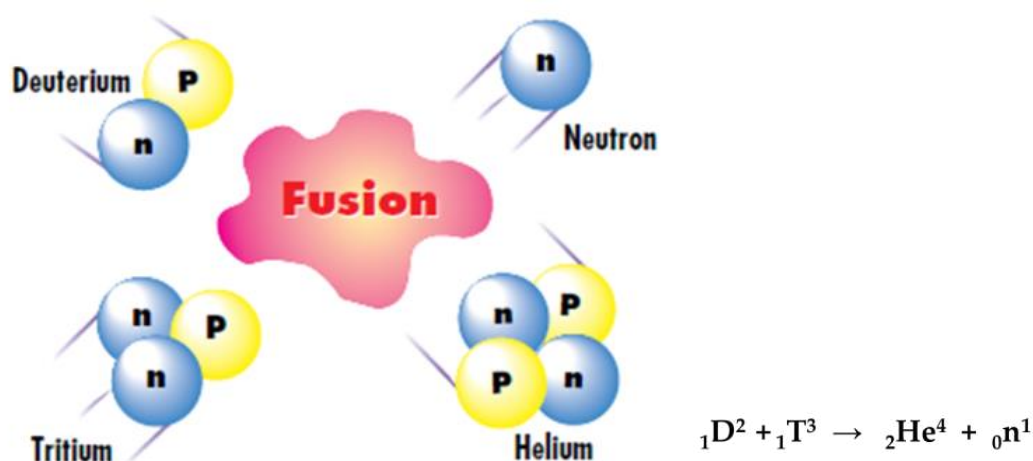
Nota sull'esperimento di fusione inerziale del National Ignition Facility

Antonio Cucchiaro
Consiglio Direttivo Velletri 2030

La fusione nucleare

Nella Fusione nucleare due nuclei leggeri si fondono in un nucleo più pesante con massa minore della somma delle masse dei nuclei reagenti ($m_{in} - m_{fin} = \Delta m > 0$), con conseguente rilascio di energia in virtù della relazione di equivalenza massa-energia di Einstein: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

La reazione avviene in un plasma ionizzato ad alta temperatura producendo una energia di circa 17.6 MeV (Il MeV è una misura di energia elettrica pari a milioni di elettronvolt; un elettronvolt è pari all'energia acquistata da un elettrone quando viene accelerato da un campo elettrico prodotto da una differenza di potenziale di un volt). La fusione fornisce più energia di quanto ne consuma solo se il prodotto di densità (n), temperatura (T) e il tempo di confinamento dell'energia (τ_E) è maggiore di un certo valore (criterio di Lawson). In laboratorio non possiamo creare intensi campi gravitazionali di confinamento come sulle stelle, allora dobbiamo usare altre tecniche per confinare il plasma.



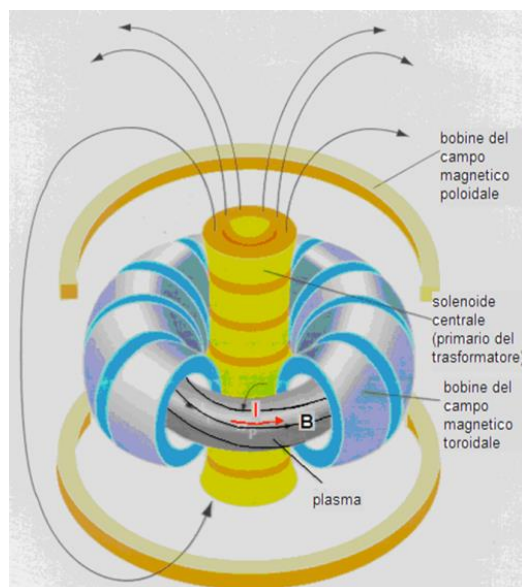
La fusione a confinamento magnetico.

In un Tokamak a confinamento magnetico il plasma è guidato all'interno di una ciambella da un campo magnetico elicoidale che mantiene gli ioni del plasma lontano dalle pareti. Le particelle di plasma si avvitano intorno alle linee di flusso del campo.

Questo è ottenuto dalla combinazione di un campo magnetico toroidale, prodotto da bobine avvolte attorno all'anello di plasma, con un campo magnetico poloidale realizzato dalla corrente indotta nel plasma.

Una variazione di flusso magnetico del solenoide centrale induce una corrente che genera il plasma (breakdown) e lo scalda.

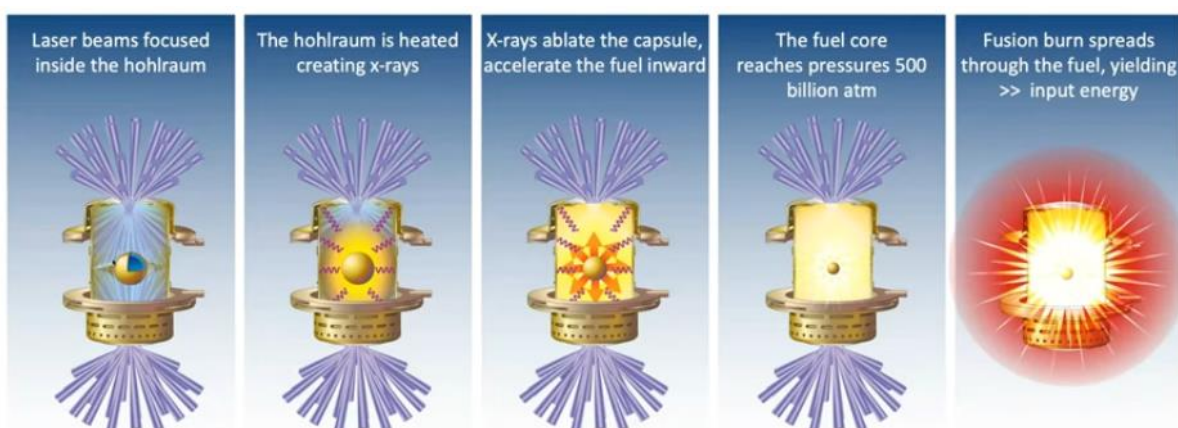
La formazione del plasma è generata dal riscaldamento resistivo, fonti di energia esterne, come delle antenne a radiofrequenza oppure fasci di neutroni ad alta energia, forniscono un ulteriore riscaldamento per portare il plasma alle condizioni di fusione.



La fusione a confinamento inerziale.

Nel confinamento inerziale un elevato numero di laser ad alta energia ed intensità illumina la superficie di una piccola capsula sferica di pochi millimetri di diametro, contenente una miscela di Deuterio e Trizio. Le conseguenti fasi di riscaldamento e compressione della sfera innescano le reazioni di fusione nucleare nel combustibile. Per massimizzare l'efficienza di tale processo è però necessario illuminare la capsula nel modo più uniforme possibile. Per questo motivo si è adottato lo schema a Irraggiamento Indiretto, usato anche nell'esperimento della NIF, in cui i laser non interagiscono direttamente con la sfera, ma colpiscono la superficie interna di un involucro metallico producendo raggi X, che poi agiscono sulla capsula sospesa al suo interno. Questa configurazione aumenta l'uniformità di irraggiamento, raggiungendo un alto livello di compressione del combustibile, ma non garantisce livelli di produzione di energia molto elevati.

I fasci ad alta energia (qualche MJ per una durata di 10÷30 ns) (*il MJ è una misura di energia meccanica pari a un milione di joule, cioè il lavoro compiuto per sollevare di un metro un peso di 100 tonnellate.*) riscaldano violentemente lo strato superficiale della microsfera provocando, per ablazione dello stesso, l'implosione del combustibile contenuto nella microsfera. La compressione adiabatca (*La compressione è talmente veloce da non scambiare calore con l'esterno*) prodotta nel combustibile ne innalza la temperatura e la densità fino a raggiungere le condizioni di ignizione.



Processo di fusione nucleare avvenuto al NIF

L'esperienza al National Ignition Facility (NIF)

Il National Ignition Facility (NIF-USA; Lawrence Livermore National Laboratory, California), grande come tre campi di calcio, guida, amplifica, riflette e focalizza con precisione 192 potenti raggi laser su un cilindro d'oro delle dimensioni di un pisello contenente una pallina congelata degli isotopi di idrogeno deuterio e trizio, erogando oltre 2 milioni di joule di energia ultravioletta e 500 trilioni di watt di potenza di picco.

L'impulso di energia causa il collasso della capsula (la massa totale del combustibile è di circa 200 micro grammi), creando alte pressioni (circa 10^8 bar) ed alte temperature in prossimità dell'equilibrio termico ($T_i \approx T_e \approx 4-5$ keV, $1 \text{ keV} = 1,16 \times 10^7$ K, dove T_i e T_e sono le temperature degli ioni e degli elettroni), e gli isotopi di idrogeno si sono fusi in elio, rilasciando ulteriore energia e creando una cascata di reazioni di fusione.

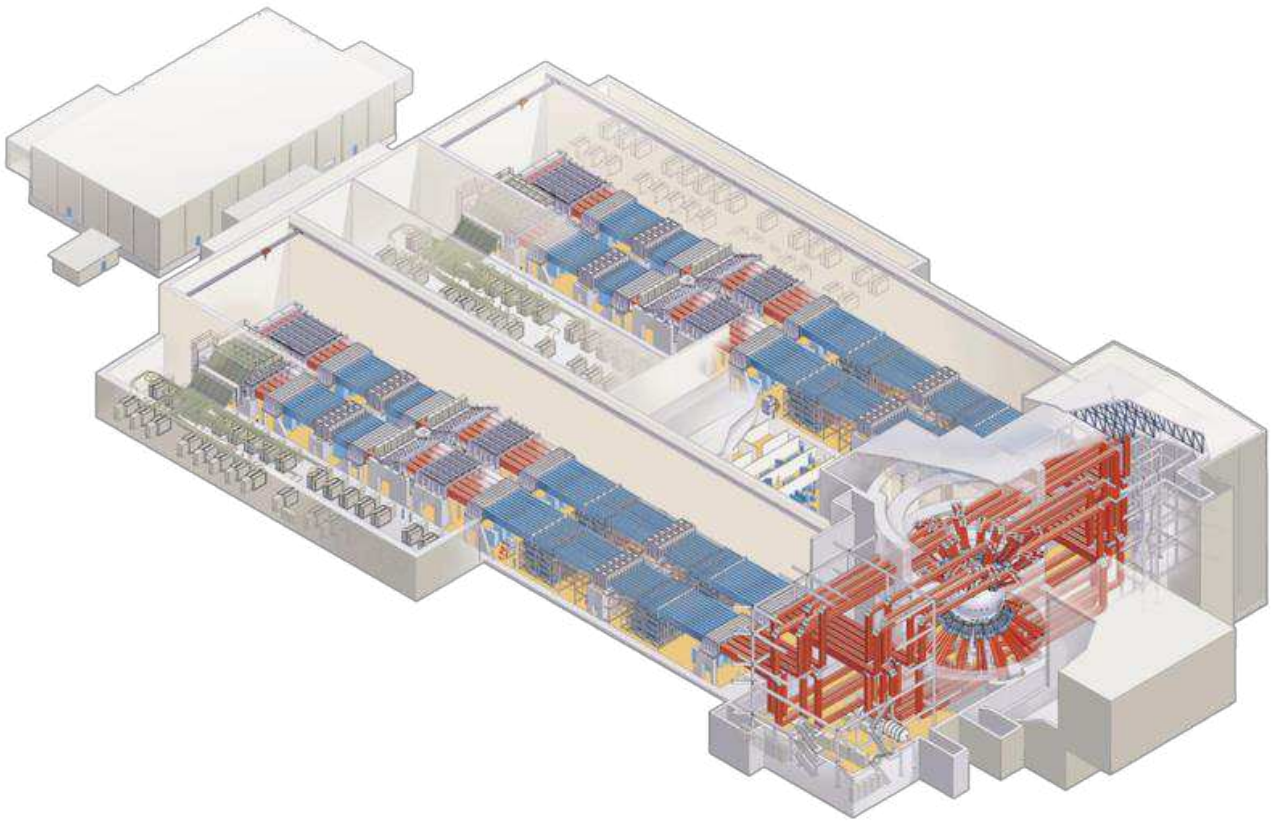
L'analisi del laboratorio suggerisce che la reazione ha rilasciato circa 3,15 milioni di joule di energia, circa il 54% in più dell'energia che è stata fornita per produrre la reazione e più del doppio del precedente record di 1,3 milioni di joule.

Rappresentanti del NIF hanno affermato "La ricerca sulla fusione è in corso dall'inizio degli anni '50, e questa è la prima volta in laboratorio che la fusione ha mai prodotto più energia di quanta ne abbia consumata".

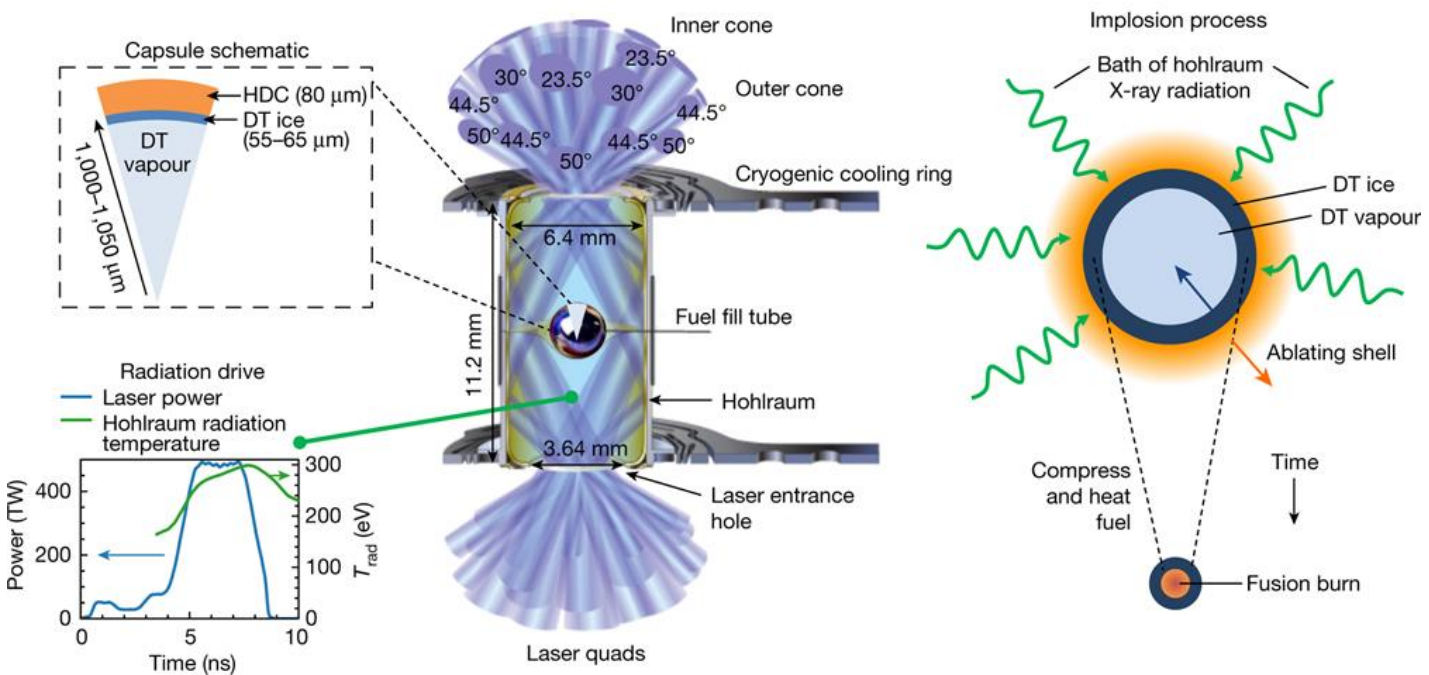
Tuttavia, mentre le reazioni di fusione potrebbero aver prodotto più di 3 milioni di joule di energia, più di quanto è stato consegnato al bersaglio, i 192 laser del NIF hanno consumato 322 milioni di joule di energia nel processo. La maggior parte dell'energia (circa il 92-95%) assorbita dalla capsula viene consumata dal processo di ablazione. Tuttavia, l'esperimento si qualifica come accensione, una misura di riferimento per le reazioni di fusione che si concentra su quanta energia è entrata nel bersaglio rispetto a quanta energia è stata rilasciata.

Per ottenere l'accensione, gli scienziati del NIF hanno apportato molteplici modifiche prima dell'ultimo colpo laser, sulla base in parte dell'analisi e della modellazione al computer degli esperimenti condotti lo scorso anno. Oltre ad aumentare la potenza del laser di circa l'8%, gli scienziati hanno creato un bersaglio con meno imperfezioni e hanno migliorato il modo in cui hanno fornito l'energia laser per creare un'implosione più sferica.

Sebbene il NIF non stia facendo esplodere bombe in miniatura, afferma il Vicedirettore di Livermore, i suoi esperimenti potrebbero aiutare gli scienziati a migliorare i modelli matematici che simulano il modo in cui le armi esploderanno, migliorando la loro progettazione. Altri esperimenti potrebbero testare come l'elettronica e gli altri componenti di un'arma resistono di fronte a intense esplosioni di radiazioni previste in un ambiente di guerra ostile. NIF non è stato progettato pensando all'energia di fusione commerciale e molti ricercatori dubitano che la fusione guidata dal laser sarà l'approccio che alla fine produrrà energia di fusione.



Layout del NIF. L'impulso laser viene inviato nelle linee (blu) poste su entrambi i lati. Dopo diversi passaggi, i fasci laser vengono inviati nei distributori (rosso) e quindi nella camera del bersaglio (argento).



La macchina Tokamak a confinamento magnetico ITER

Il progetto ITER dovrà dimostrare di poter generare, per decine di minuti, una reazione di fusione nucleare che generi più energia di quanta ne venga consumata, validando e migliorando le attuali conoscenze sulla fisica del plasma. Inoltre, ITER dovrà sviluppare tecnologie per ottenere il trizio dai materiali di litio, posti all'interno del mantello, sopportando le elevate temperature intorno al plasma e provare sistemi di confinamento e riscaldamento del plasma.

Sette membri China, Europa, India, Giappone, Corea, Russia e US hanno firmato un accordo nel 2006 per la costruzione e decommissioning di ITER.

Nel marzo 2020 ha avuto inizio, nell'edificio centrale del sito di ITER, l'assemblaggio della macchina. Poco meno di dieci anni dell'installazione della prima pietra, il progetto ITER sta entrando in un nuovo capitolo della sua storia. Il primo plasma è previsto nel dicembre 2025, seguito da studi con plasma in Idrogeno ed Elio e He.

Il montaggio, comprendente un miglioramento, sarà completato per l'inizio del 2035, con l'inizio in plasma formato da una miscela di Deuterio e Trizio (isotopi dell'idrogeno). Nella successiva campagna sperimentale verranno condotti studi per il raggiungimento dei principali obiettivi della missione scientifica del progetto ITER: dimostrazione di un guadagno di energia superiore a 10 con impulsi di durata compresa tra 300 e 500 sec.

Il più potente sistema di riscaldamento esterno di ITER, l'iniezione a fascio di neutroni, sarà testato presso il Neutral Beam Test Facility (NBTF) di Padova. Il test offrirà agli scienziati la possibilità di indagare su complesse questioni fisiche e tecnologiche e di convalidare i concetti prima che il sistema di fascio di neutroni venga installato su ITER.

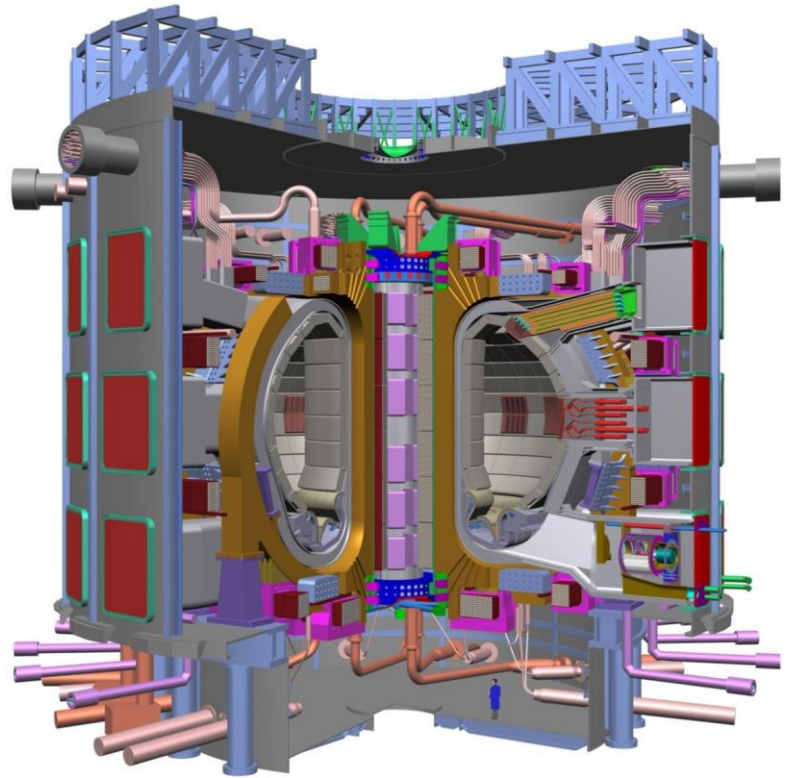
Il prototipo del divertore è stato realizzato da un consorzio italo-francese con capofila la ditta Walter Tosto di Chieti. Infine il consorzio Ansaldo – Mangiarotti – Walter Tosto, sta realizzando diversi settori della camera da vuoto di ITER che saranno montati entro il 2025.

La ASG Superconductor (Genova) ha realizzato 10 avvolgimenti di bobine toroidali. La bobina è costituita da circa 5 km di cavi superconduttori, misura 14 metri in altezza per 9 m di larghezza e pesa oltre 110 tonnellate. Lo sviluppo dei cavi superconduttori, del valore di circa 17 milioni di euro per singola bobina, ha visto il coinvolgimento dell'ENEA, nel ruolo di coordinatore del consorzio ICAS.

L'avvolgimento della bobina toroidale è stato inserito all'interno della cassa di contenimento dalla SIMIC in una delle sue facilities presso il porto di Marghera.

Il peso complessivo della bobina toroidale è 310 t, mentre la bobina interna, della dimensioni 14 x 9 m, pesa 110 t.

- ✓ Altezza edificio: 24 m
- ✓ Larghezza edificio: 30 m
- ✓ Raggio esterno Tokamak: 6,2 m
- ✓ Raggio interno Tokamak: 2 m
- ✓ Temperatura del plasma: $\approx 1.5 \cdot 10^8 \text{K}$
- ✓ Potenza prodotta: $\sim 500 - 700 \text{ MW}$
- ✓ Volume di plasma: 837 m^3
- ✓ Campo magnetico toroidale: 5,3 T
- ✓ Guadagno: $Q > 10$



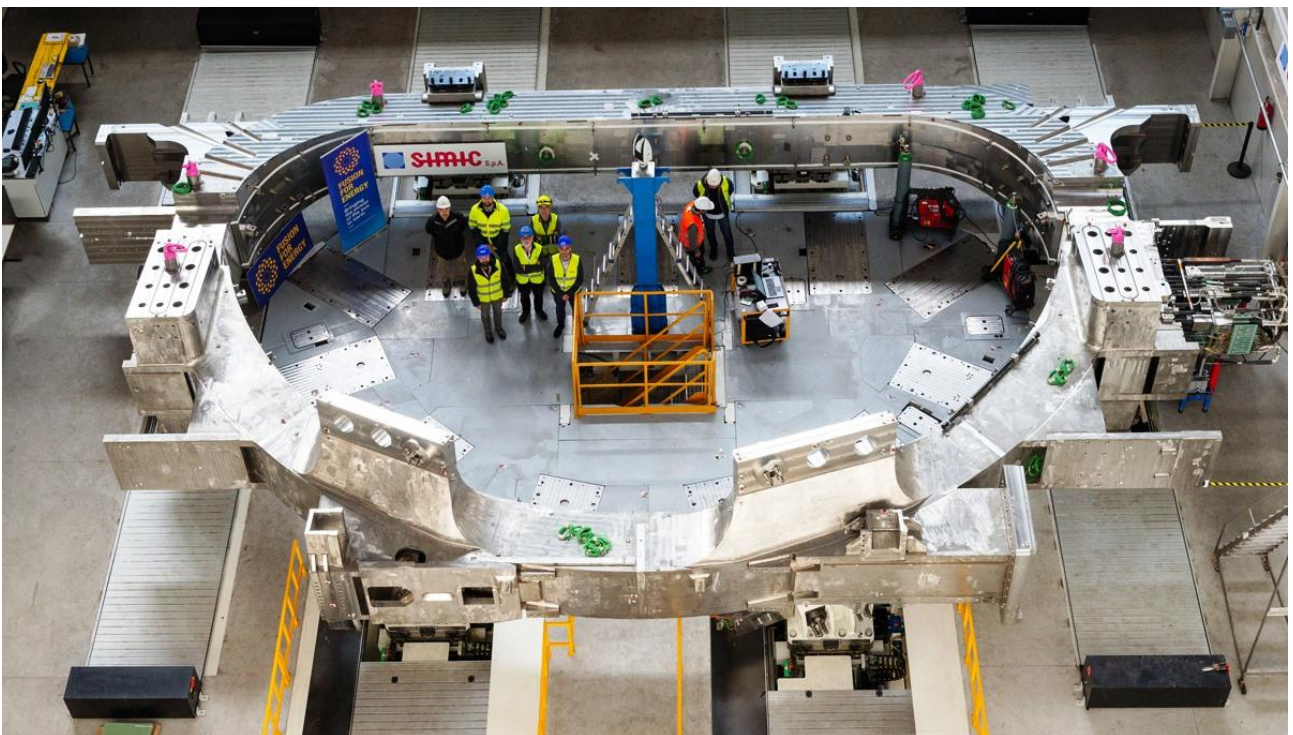
Vista assonometrica 3D della macchina ITER



Prototipo del divertore della macchina ITER



Avvolgimento della bobina toroidale della macchina ITER



Bobina toroidale completa di cassa di contenimento della macchina ITER

Prospettive sulla ricerca della energia da Fusione

Per diversi esperti, la tecnologia laser sperimentata al NIF è meno promettente di altre utilizzate per esempio in Italia e in Europa con macchine Tokamak a confinamento magnetico come ITER in costruzione in Francia a Cadarache. Queste ultime infatti stanno sviluppando anche la tecnologia per estrarre l'energia prodotta e renderla disponibile, trasformando il calore prodotto da questi processi in energia elettrica.

Inoltre si deve considerare che il bilancio energetico positivo che è stato raggiunto al NIF riguarda soltanto l'energia che colpisce l'obiettivo, non tutta l'energia necessaria ad alimentare i laser, che pur essendo i laser più potenti del mondo, sono anche tra i meno efficienti (per far funzionare i 192 laser sono infatti necessari 300 milioni di joule).

Ci sono molti altri esperimenti di fusione in tutto il mondo che stanno cercando di ottenere la fusione per applicazioni energetiche utilizzando approcci diversi.

Ma le sfide ingegneristiche rimangono, compresa la progettazione e la costruzione di impianti in grado di estrarre il calore prodotto dalla fusione e utilizzarlo per generare quantità significative di energia da trasformare in energia elettrica.

Per vedere energia elettrica prodotta da centrali a Fusione probabilmente dovremo aspettare la seconda metà del secolo, questi ritardi non ci daranno un contributo significativo ad affrontare i gravi problemi dei cambiamenti climatici, almeno nei tempi previsti dagli accordi di Parigi.

Finora abbiamo investito troppo poco sulla ricerca in campo energetico, se pensiamo che per ogni dollaro speso in armamenti, il mondo spende un centesimo nella ricerca sull'energia di ogni tipo, dal nucleare alle rinnovabili.