



## Fusione nucleare Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate Broader Approach

### Scenario di riferimento

La fusione termonucleare controllata è oggi considerata una opzione molto concreta come fonte di energia sicura, compatibile con l'ambiente e praticamente inesauribile. A conferma di ciò, Europa, Cina, Corea del Sud, India, Giappone, Federazione Russa e Stati Uniti hanno riunito i loro sforzi in un progetto di grande prestigio, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), che rappresenta una tappa fondamentale per arrivare alla realizzazione del primo reattore dimostrativo a fusione (DEMO).

Il reattore a fusione ITER dovrà produrre 500 MW di potenza e dimostrare la possibilità di mantenere la reazione per un tempo sufficientemente lungo. L'impianto fornirà gli elementi utili per la progettazione di DEMO.

Per sfruttare al meglio la sperimentazione di ITER è necessario prevedere delle attività complementari di fisica e tecnologia ed in quest'ottica l'Europa e il Giappone, in occasione delle negoziazioni per la scelta del sito di ITER, hanno deciso di avviare in parallelo un programma denominato Broader Approach (BA) da affiancare ad ITER.

In particolare le attività del BA includono la costruzione di una macchina Tokamak superconduttrice JT-60SA, la realizzazione di una facility IFMIF per lo studio del danneggiamento dei materiali sottoposti ad un flusso di neutroni di alta energia e la creazione dell'International Fusion Energy Research Center (IFERC) che include un centro di supercalcolo e lo sviluppo di materiali avanzati come il SiC/SiC.

### Costruzione Magnete Tokamak JT-60SA

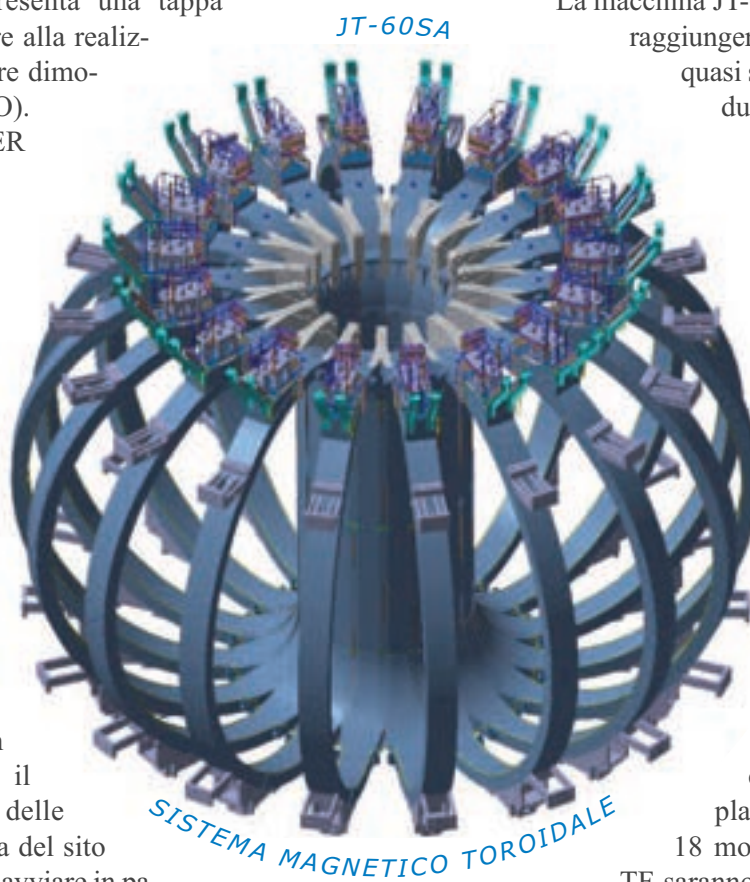
JT-60SA è un Tokamak superconduttore di raggio maggiore di circa 3 m, in grado di confinare plasma di deuterio con una corrente massima di 5,5 MA, con singolo o doppio nullo. Il Tokamak JT-60SA sarà installato a Naka nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U.

La macchina JT-60SA è stata progettata per raggiungere scenari di funzionamento quasi stazionari con impulsi della durata di circa 100 sec che richiedono l'impiego di magneti superconduttori.

Il sistema magnetico di JT-60SA è costituito da tre sotto sistemi: i 18 magneti superconduttori (NbTi) di campo toroidale (TF); i 4 moduli che costituiscono il solenoide centrale (CS) in Nb<sub>3</sub>Sn necessario per indurre la corrente nel plasma, i 6 magneti in NbTi che generano il campo poloidale necessario per stabilizzare il plasma (EF). In particolare, i

18 moduli di magnete toroidale TF saranno di forma a D avvolti con

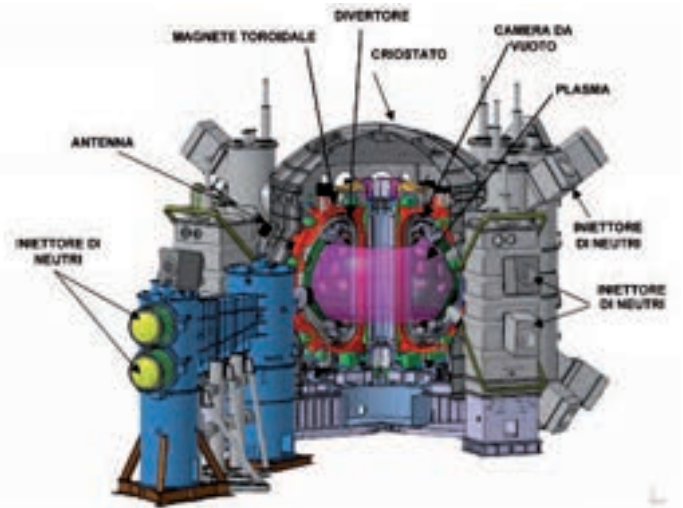
un cavo in NbTi, raffreddato da un flusso forzato di elio supercritico alla temperatura di 4,4 gradi Kelvin. Dei 18 moduli TF che costituiscono il magnete, 9 saranno realizzati dall'ENEA e 9 dal CEA Francese. Ciascun avvolgimento della bobina è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti elettrici interni per assicurare la continuità elettrica; giunti esterni garantiscono la connessione elettrica con le bobine contigue mentre dei collettori provvedono alla distribuzione del flusso di elio. Ogni pancake è formato da sei spire, con un isolamento di spira dello spessore di



1 mm. L'isolamento elettrico è realizzato con tele di vetro e resina epossidica impregnata sotto vuoto. La realizzazione delle 9 bobine richiede lo sviluppo di impianti ed attrezzature prototipali che rivestono carattere innovativo e di ricerca, sia per lo sviluppo delle soluzioni costruttive, che per la definizione delle procedure realizzative degli elementi componenti la bobina toroidale. L'avvolgimento della bobina è contenuto in una cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico ed è caratterizzato da precisioni molto accurate per garantire il corretto accoppiamento con la bobina stessa.

La cassa delle bobine toroidali è una struttura saldata di piastre con spessore nell'intervallo 15-100 mm.

Le casse delle bobine toroidale forniranno il supporto meccanico per tutto il sistema magnetico di JT-60SA.



Vista della macchina tokamak JT-60SA

Parametri operativi di JT60SA

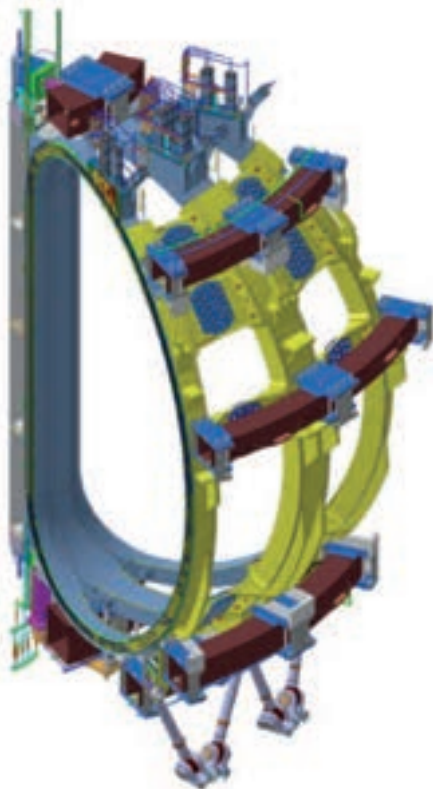
Corrente di plasma	5,5 MA/3,5MA
Campo toroidale	2,7 T
Raggio Maggiore	3 m
Raggio minore	1 m
Durata impulso di plasma	100 s
Potenza di riscaldamento	41 MW
Flusso termico al divertore	15 MW/m <sup>2</sup>

Caratteristiche bobina toroidale

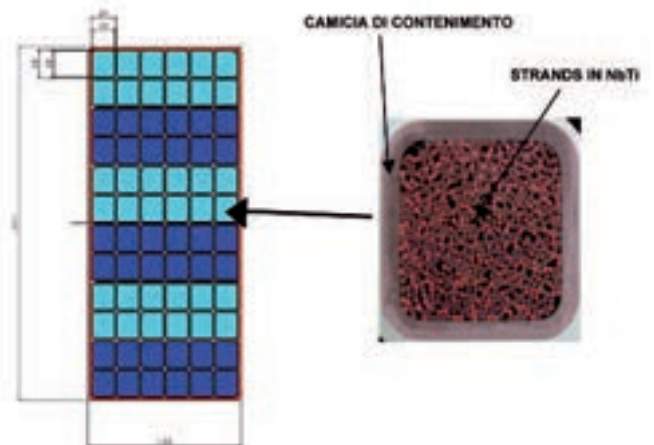
Massimo campo sul conduttore della bobina	5,65 T
Corrente nel conduttore	25,7 kA
Numero bobine toroidali	18
Peso totale bobine toroidali	~370 t
Numero di spire bobina	72
Numero di strati	6
Portata totale dell'elio di raffreddamento	48 g/s
Temperatura elio	4,4 K



Vista della bobina toroidale di JT-60SA



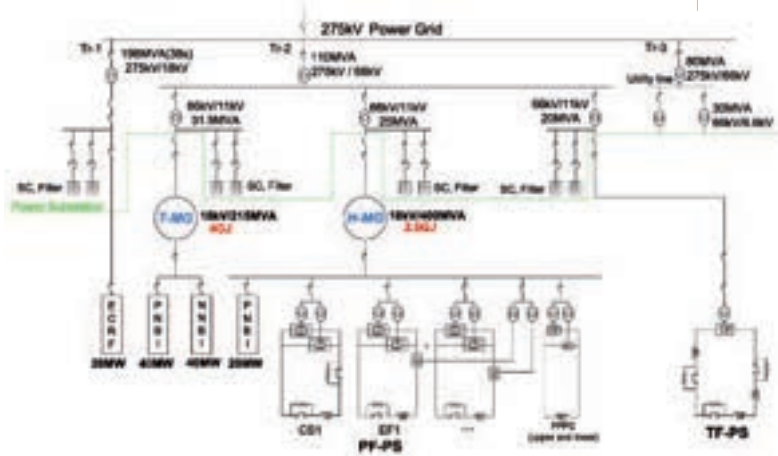
Modello del sistema magnetico in 3D per analisi strutturali



Sezione dell'avvolgimento della bobina toroidale di JT-60SA

## Alimentazione elettrica della macchina JT-60SA

Le alimentazioni elettriche di tutto il sistema magnetico di JT-60SA, per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente con relativi interruttori più quattro trasformatori, quattro sistemi di interruzione della corrente continua (SNU - Switching Network Unit) con inserzione di un sistema variabile di resistenza. Tali sistemi richiedono una progettazione specifica e sono di dimensioni e caratteristiche tali da suscitare un forte interesse da parte della nostra industria. Il ruolo dell'ENEA è di fondamentale importanza perché la progettazione di tutti i componenti in questione richiede un know how specifico da sviluppare in continuità con quanto fatto finora in questi settori.



### Sistema di alimentazione AC/DC per JT-60SA

#### IFMIF e IFERC

La fusione termonucleare richiede resistenza ad alte temperature (fino ad 800 °C) ed ad alti flussi di neutroni da 14 MeV con danneggiamenti quantificabili in 50 dpa. La facility IFMIF è costituita da una sorgente di ioni (tipicamente ioni di deuterio), due acceleratori lineari, di grande potenza (complessivamente 10 MW), che accelerano gli ioni di deuterio fino all'elevatissima energia di 40 MeV, facendo convergere i fasci di ioni sullo stesso bersaglio (target) di litio fuso in circolazione forzata ad alta velocità.

Le attività di ricerca e sviluppo nell'ambito dei programmi IFMIF-EVEDA e IFERC richiedono lo sviluppo di competenze e di applicazioni innovative nel campo dei metalli liquidi, in particolare per gli aspetti legati alla purificazione e alla corrosione/erosione del litio liquido, della manutenzione remota, dello sviluppo e caratterizzazione di materiali compositi ceramici in matrice e fibra di silicio (SiC/SiC). In particolare le attività relative ai metalli liquidi e alla manutenzione remota potranno usufruire degli impianti presenti presso il Centro ENEA del Brasimone.

Una componente essenziale della progettazione è l'analisi delle sollecitazioni termomeccaniche conseguenti all'esposizione neutronica. Nel campo dei compositi ce-

ramici, grazie anche alla collaborazione in atto con la società partecipata FN Nuove Tecnologie e Servizi Avanzati, si hanno dotazioni impiantistiche di grande rilievo come il sistema di CVI (Chemical Vacuum Infiltration) per la realizzazione di componenti di carburo di silicio composito (SiC/SiC).

## Obiettivi

Scopo dell'attività è di ottemperare agli obblighi assunti dal nostro Paese in ambito Europeo, con un impegno nel settore della fusione termonucleare e in particolare nelle attività del "Broader Approach". L'Italia si è impegnata a contribuire allo sviluppo del Programma Broader Approach, affidando ad ENEA la costruzione, in collaborazione col suo omologo francese CEA, del magnete superconduttore di JT-60SA con incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche.

L'ENEA inoltre collabora alla implementazione dell'impianto EVEDA Loop in costruzione ad Oarai (Giappone) finalizzando la campagna sperimentale per testare e validare il comportamento termo fluido dinamico del Target per IFMIF, verificare i fenomeni di corrosione da litio, qualificare i sistemi di purificazione per la rimozione delle principali impurità del litio (idrogeno, ossigeno, carbonio e azoto) e qualificare i sistemi di misura delle concentrazioni delle impurità su indicate.

## Risultati

### Macchina JT-60SA

La macchina JT-60SA sarà il più grande tokamak superconduttore ad essere costruito prima della macchina ITER. La sua progettazione ha richiesto sofisticate competenze specialistiche.

L'analisi di riscaldamento nucleare, flusso neutronico e dosi all'isolante è stata condotta dall'ENEA utilizzando un codice Monte Carlo MCNP-5 con libreria FENDL-2. È stato usato un modello in 3D di un settore di 20° della macchina. I calcoli sono stati effettuati considerando una sorgente di plasma estesa con un'emissione di neutroni prodotti dalla reazione D-D ( $E=2,45$  MeV) di  $1,5 \times 10^{17}$  n/s.

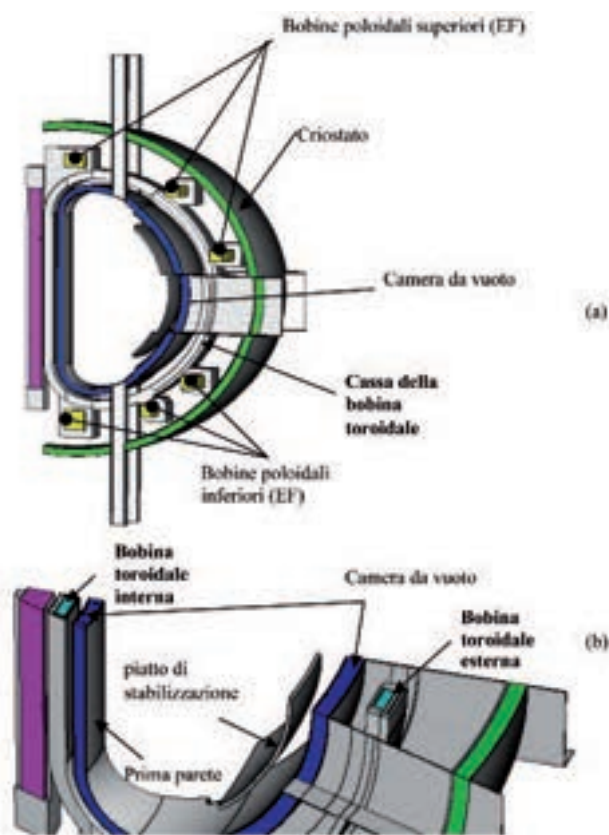
I profili radiali si riferiscono ai settori sul piano equatoriale. I valori calcolati sono stati utilizzati per effettuare le analisi termo-idrauliche e il dimensionamento dell'impianto criogenico.

Considerando un margine di sicurezza di 1,5, la potenza totale che deve essere asportata dall'elio è 7,98 kW di cui 3,01 kW sulla bobina, 4,7 kW sulla struttura di acciaio e 0,27 kW sull'isolante.

La dose prevista sull'isolante a fine vita della macchina (10 anni di operazioni) è talmente bassa (<20 kGy assumendo un margine di sicurezza di 1,8) da escludere la sostituzione del componente per danno indotto dalle radiazioni.

L'analisi termoidraulica della bobina TF ha permesso di verificare l'esistenza di un margine di temperatura di 1,2 gradi Kelvin. L'analisi è stata condotta utilizzando un codice ad elementi finiti unidimensionale (Gandalf 2.2) in grado di simulare contemporaneamente i fenomeni idraulici, termici ed elettrici. I canali di raffreddamento derivati da questa progettazione sono impiegati nelle sole fasi di raffreddamento iniziale o nei fenomeni di instabilità della bobina denominati quench.

L'ENEA ha inoltre condotto delle analisi per valutare il comportamento delle bobine nei transitori rapidi (quench) indotti durante i test a freddo.



*Modello 3-D MCNP di JT-60SA: (a) modello globale, (b) vista del settore equatoriale*

Un passo importante nella definizione del conduttore da usare per gli avvolgimenti TF è stata la realizzazione di due campioni che sono stati testati in condizioni operative presso SULTAN.

**Area di ricerca:** Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

**Progetto 1.3.2.a:** Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate Broader Approach

**Referente:** A. Pizzuto, [aldo.pizzuto@enea.it](mailto:aldo.pizzuto@enea.it); A. Cucchiari, [antonio.cucchiari@enea.it](mailto:antonio.cucchiari@enea.it);

G. Coccoluto, [Giovanni.Coccoluto@enea.it](mailto:Giovanni.Coccoluto@enea.it); P. Agostini, [Pietro.agostini@enea.it](mailto:Pietro.agostini@enea.it);

S. Tosti, [Silvano.tosti@enea.it](mailto:Silvano.tosti@enea.it)



*Preparazione di campioni prima della spedizione a SULTAN. In primo piano il cosiddetto "hair-pin joint" sviluppato da ENEA per questi test*

L'analisi strutturale è stata eseguita con il codice di calcolo ANSYS su un modello di bobina toroidale in 3D sollecitata da carichi elettromagnetici prodotti durante lo scenario di riferimento. Nell'isolamento di spira si raggiunge un valore di taglio di 18 MPa; la sollecitazione di taglio sull'isolamento verso massa mostra un picco di 10 MPa. Entrambi i valori di taglio sono accettabili. La distribuzione delle sollecitazioni nella parte strutturale della bobina raggiunge un picco di circa 400 MPa nella gamba interna; valore accettabile nel caso di AISI 316. La deformazione della bobina assume una forma ad S e raggiunge un massimo di circa 20 mm nella parte esterna, vicino ai port della camera da vuoto.

#### **IFERC**

Nell'ambito del progetto IFERC sono state realizzate misure di conducibilità termica su campioni di SiC/SiC in configurazione 2D e 3D.

È in via di realizzazione un apparato sperimentale in per prove di erosione-corrosione di di SiC/SiC in litio-piombo.