



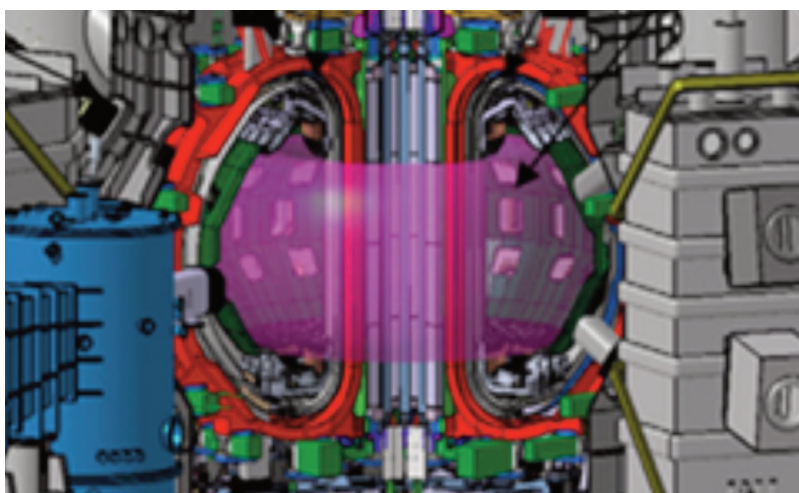
Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER

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. La ricerca sulla fusione vede impegnati tutti i Paesi tecnologicamente più avanzati (Europa, Giappone, USA, Russia, Cina, Corea e India) che 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). Per accelerare lo sviluppo dell'energia da fusione, l'Europa e il Giappone, in occasione delle negoziazioni per la scelta del sito di ITER, hanno ratificato un accordo di collaborazione per un programma denominato Broader Approach (BA) da affiancare a ITER. L'accordo, regolato da specifici Agreement of Collaboration con l'Agenzia Europea Fusion For Energy, vede impegnati Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio con forniture "in kind" importanti e strategiche per il sistema industriale nazionale. Le attività del BA che prevedono la partecipazione dell'ENEA riguardano la costruzione di una macchina Tokamak superconduttrice JT-60SA, la realizzazione di una facility IFMIF per lo studio del danneggiamento dei materiali sottoposti a un flusso di neutroni di energia da fusione 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. Viene anche avviata una attività di ricerca finalizzata alla realizzazione di un esperimento di fusione denominato

FAST che ha lo scopo di preparare scenari operativi di ITER permettendo di studiare un plasma che brucia senza ricorrere all'uso del trizio.

OBIETTIVI



Costruzione

Tokamak JT-60SA

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

L'ENEA è impegnata nella costruzione del magnete superconduttore di JT-60SA in collaborazione con il CEA, con la realizzazione di 9 delle 18 bobine superconduttrici di NbTi, delle casse di contenimento in acciaio austenitico per tutte le 18 bobine, parte delle alimentazioni elettriche del sistema magnetico, per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente, 4 sistemi di interruzione della corrente continua (SNU - Switching Network Unit) e 4 trasformatori. 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 Nb₃Sn 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. Ciascun avvolgimento della bobina è formato da 6 doppi pancake collegati in serie da giunti elettrici interni per assicurare

la continuità elettrica; 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 il corretto accoppiamento con la bobina. La cassa delle bobine toroidali è una struttura saldata di piastre metalliche e costituirà il supporto meccanico per tutto il sistema magnetico di JT-60SA.

IFMIF e IFERC

La fusione termonucleare richiede materiali capaci di resistere ad alte temperature (fino a 800 °C) e a flussi di neutroni da 14 MeV con danneggiamenti quantificabili in 50 dpa. Per condurre ricerche appropriate in questo campo, nel Broader Approach è prevista la progettazione e realizzazione di una complessa facility di ricerca detta IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility). L'ENEA partecipa al programma provvedendo allo sviluppo del target per la produzione dei neutroni ad alta energia, alle relative attività di manutenzione remotizzata, allo studio dei fenomeni di corrosione ed erosione dei metalli in presenza di litio e alla validazione dei sistemi di purificazione per il litio.

IFERC

Lo studio di compositi di SiC/SiC è una delle attività di ricerca e sviluppo di DEMO condotte nell'ambito del progetto IFERC. L'ENEA ha il compito di studiare le proprietà meccaniche e chimico-fisiche di tali compositi e di sviluppare un'analisi di modello in grado di simulare e interpretare le prove meccaniche su campioni.

FAST

Si intende realizzare un esperimento di fusione denominato FAST, tokamak compatto, in grado di realizzare scenari di elevate prestazioni con impulso lungo. FAST dovrebbe operare a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER. Lo scopo è quello di preparare gli scenari operativi di ITER simulando l'effetto delle particelle alfa mediante ioni accelerati da sistemi di riscaldamento ausiliario. L'uso di soluzioni tecnologiche innovative per i componenti ad alto flusso termico, sviluppate in ENEA, e le scariche di lunga durata consentono di provare componenti in condizioni rilevanti per il funzionamento di ITER e DEMO.

RISULTATI

Tokamak JT-60SA – Sono stati completati 6 doppi pancake con la composizione dell'avvolgimento della prima bobina toroidale e relative prove di accettazione, e approvvigionati e installati gli impianti di integrazione per l'assemblaggio finale delle bobine. Sono stati acquisiti impianti e attrezzature per la movimentazione e il posizionamento della bobina e dei componenti della cassa, impianto di saldatura TIG dedicato per la saldatura finale della cassa, sistemi per l'impregnazione e attrezzature di contenimento e riscaldamento per il processo di impregnazione nella cassa.

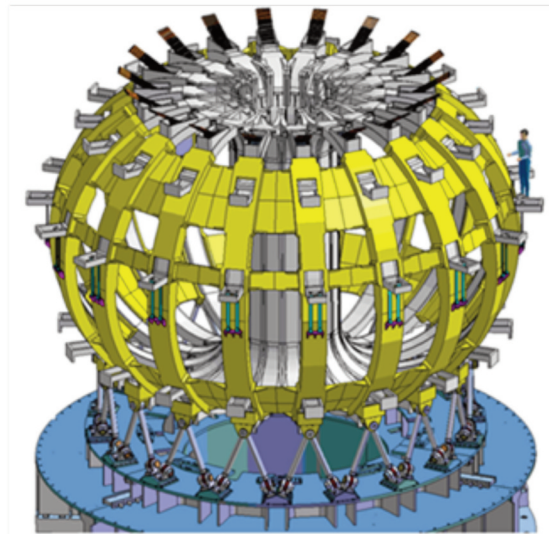
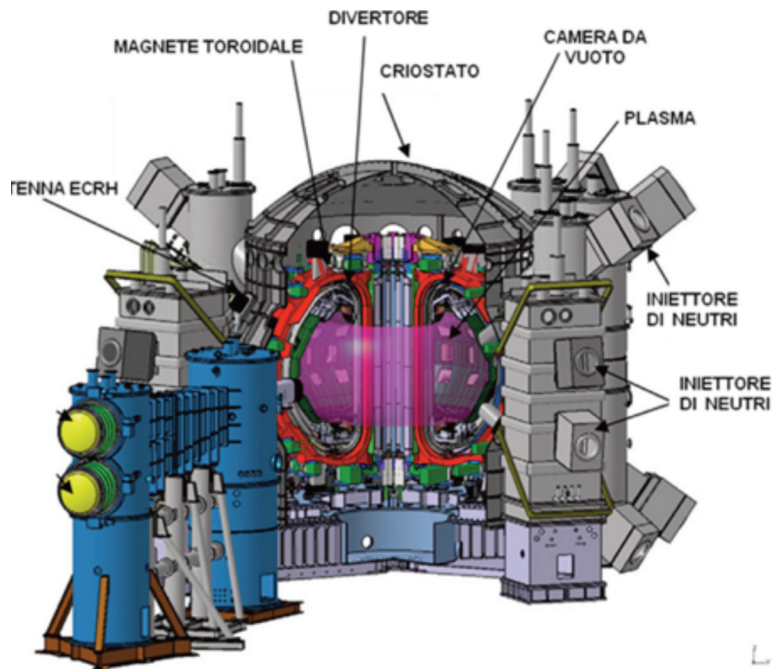
Sono stati completati gli studi sulla qualifica dei processi speciali e la realizzazione e fornitura dei componenti necessari alla composizione di tre casse di contenimento, inclusa l'ottimizzazione dei procedimenti costruttivi, la definizione dei trattamenti superficiali e delle tecniche mirate alla mitigazione degli stress residui.

È stata completata l'ingegnerizzazione di 4 Switching Network Unit per la commutazione rapida della corrente delle bobine del solenoide centrale. L'ingegnerizzazione consiste nell'identificazione dei componenti industriali, della strumentazione di corredo e dello sviluppo dei disegni di fabbrica. Inoltre, a valle dell'attività d'ingegnerizzazione, questa fase comprende l'assemblaggio e la disposizione negli armadi di alimentazione e controllo del primo SNU detto anche prototipo.

Riguardo la realizzazione degli 8 alimentatori AC/DC e dei sei trasformatori per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della Macchina JT-60SA è prevista l'ingegnerizzazione con componenti industriali di 6 alimentatori per le bobine poloidali e 2 alimentatori di controllo e nello sviluppo dei disegni di fabbrica di 6 trasformatori. Tutto questo è oggetto di un contratto stipulato con l'A.T.I. POSEICO-JEMA

In sintesi i risultati ottenuti sono:

- impianto di movimentazione e posizionamento della bobina e dei componenti della cassa e sistema di impregnazione e attrezzature di contenimento e riscaldamento per il processo di impregnazione nella cassa;
- realizzazione dei primi 2 doppi pancake;
- completamento di 6 doppi pancake e relativa composizione dell'avvolgimento della prima bobina toroidale e relative prove di accettazione (contratto ASG);
- componenti meccanici per la composizione di tre casse di contenimento (contratto Walter Tosto);
- realizzazione del primo elemento delle SNU detto



Vista assometrica della macchina Tokamak JT-60SA e del sistema magnetico toroidale)

- anche prototipo (contratto OCEM);
- ingegnerizzazione di 6 alimentatori per le bobine poloidali e 2 alimentatori di controllo e nello sviluppo dei disegni di fabbrica di 6 trasformatori (contratto POSEICO-JEMA).

IFMIF

L'attività prevista consiste nell'installare i sistemi di monitoring, forniti da ENEA, per l'impianto EVEDA di Oarai (Giappone). In tale ambito, prima del trasferimento dei componenti presso il centro di Oarai, sono state apportate alcune migliorie al sistema di controllo della temperatura per il misuratore di resistività. I componenti spediti in dicembre 2012 sono attualmente stoccati presso il centro di Oarai.

È stata portata avanti l'attività sperimentale sui fenomeni di corrosione ed erosione per IFMIF interamente di responsabilità ENEA. Tale programma fornisce i dati attesi di corrosione ed erosione per la corretta esecuzione della progettazione dell'intero impianto a litio di IFMIF. Le attività svolte hanno portato alla realizzazione e qualifica dell'impianto sperimentale per prove di corrosione/erosione in litio (LiFus6).

L'impianto LiFus6 utilizzato per lo studio dei fenomeni di corrosione ed erosione è fornito di un sistema di purificazione delle impurezze disciolte nel litio. È noto infatti che la concentrazione dell'azoto nel litio è l'elemento che promuove i fenomeni di corrosione degli acciai e pertanto la sua concentrazione deve essere mantenuta entro limiti accettabili. Per IFMIF tale

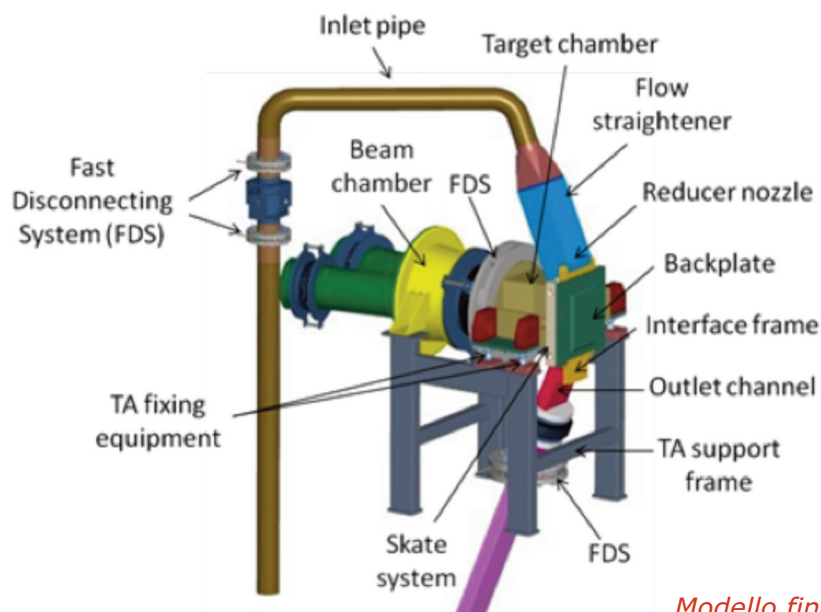
limite è stato fissato in 10 ppm. Il sistema di monitoring attualmente in uso si basa sulla misura della resistività elettrica del litio ed è conosciuto come resistivity meter. L'obiettivo dell'attività è stato quello di fornire le curve di calibrazione della resistività ρ (T °C, N%).

Sono state inoltre completate la validazione delle procedure ottimizzate per il ricondizionamento del target assembly di IFMIF con valutazione della loro affidabilità e la realizzazione dei dispositivi per la validazione delle operazioni di manutenzione remotizzata del target assembly.

IFERC

Sono stati sviluppati e caratterizzati materiali compositi ceramici in matrice e fibra di carburo di silicio per l'utilizzo come componenti funzionali e strutturali.

Il primo passo ha riguardato la messa a punto di tecnologie costruttive per la realizzazione di compositi ceramici con matrice e fibra in carburo di silicio attraverso la tecnologia CVI (Chemical Vapor Infiltration). Sono stati fabbricati pannelli di spessore 3, 4 e 5 mm e tubi di piccolo diametro con successiva caratterizzazione chimico-fisica e a lavorazione meccanica per l'ottenimento di particolari da utilizzare come componentistica nel forno destinato alla caratterizzazione del composito ceramico SiCf/SiC in litio-piombo liquido. Sono state sviluppate anche tecniche per l'ottenimento di prismi cavi a sezione quadrata di grande spessore e con lato di almeno 100 mm



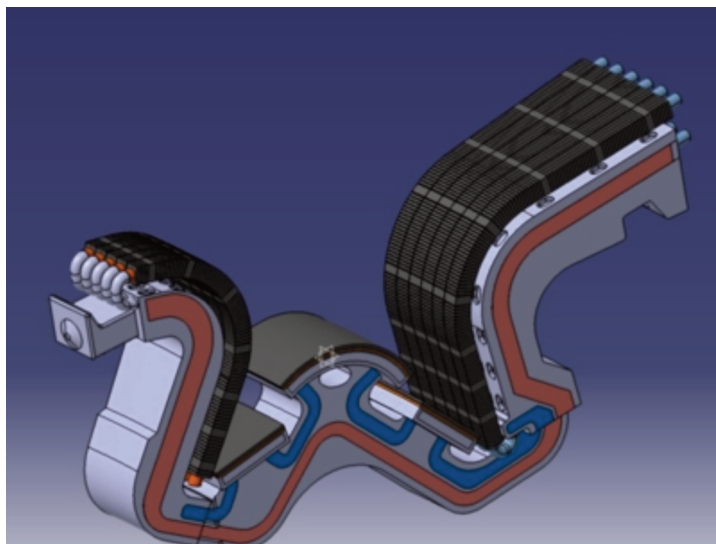
Modello finale 3D del Target Assembly di IFMIF

È stato realizzato anche un apparato per prove ad alta temperatura (1000 °C) di un target rotante di SiCf/SiC nel metallo liquido litio-piombo al fine di caratterizzare i fenomeni di erosione e corrosione. È stato progettato e realizzato il forno ad alta temperatura e sono stati definiti tutti gli impianti accessori necessari per l'esecuzione delle prove.

FAST

Sono stati fatti sostanziali progressi nell'elaborazione delle basi fisiche e nella progettazione della macchina allo scopo di ridurre il carico termico specifico sul divertore. In particolare, la cooperazione tra ENEA, CREATE e LTCalcoli, con le rispettive differenti competenze, ha permesso di condurre in dettaglio, lo studio delle topologie magnetiche innovative "Snow Flake" (SF) e "Super-X (SX)" e dei relativi adattamenti richiesti alla macchina FAST, evidenziandone limiti e vantaggi sia fisici che tecnologici.

È stata eseguita la progettazione, con relative verifiche strutturali, di un innovativo concetto di divertore che permetterebbe un confronto diretto (sullo stesso esperimento) tra una configurazione magnetica con X point standard e con una configurazione (denominata "Snow Flakes") che, in teoria, potrebbe risolvere il problema del power exhaust su un reattore a Fusione.



Progetto finale del nuovo concetto di divertore dopo le ottimizzazioni strutturali e di remote handling

*Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
 Progetto B.3.1 – Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER
 Referente: A. Pizzuto, aldo.pizzuto@enea.it*