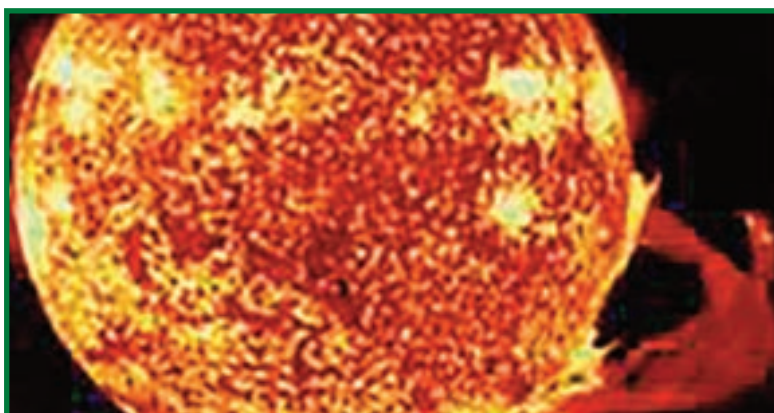




Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER

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. 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. La macchina JT-60SA sarà installata 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 au-

stenitico 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 magneti 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

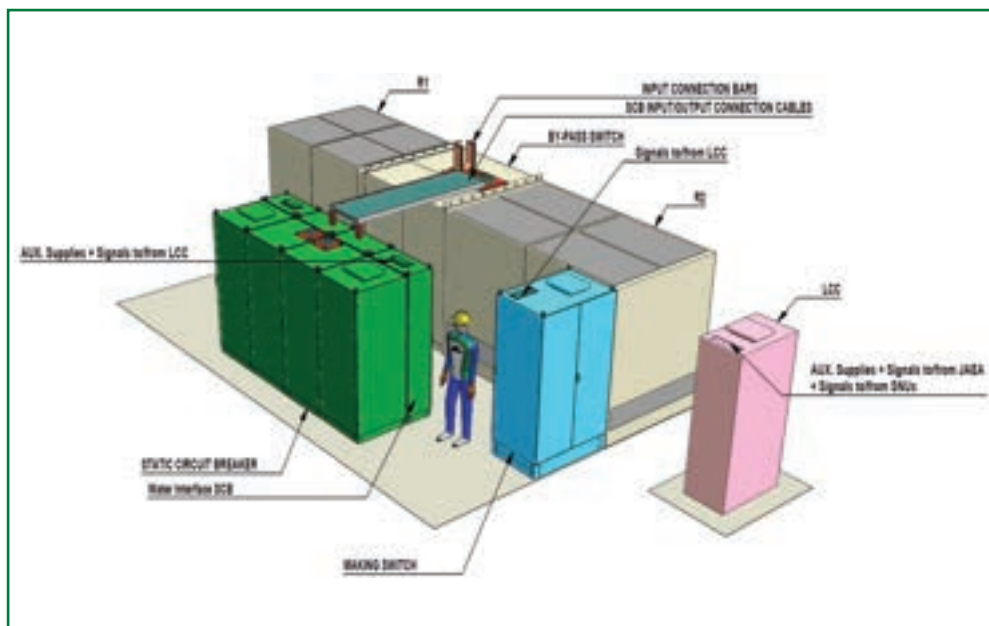
La fusione termonucleare richiede materiali capaci di resistere ad alte temperature (fino a 800 °C) e a flussi di neutroni da 14 MeV con danneggiamenti quantificabili in 50 dpa. Per condurre ricerche appropriate in questo campo, nel Broader Approach è prevista la progettazione e realizzazione di una 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 alla energia da Fusione, 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 del litio.

IFERC

L'attività condotta nell'ambito del progetto IFERC riguarda lo studio di compositi di SiC/SiC di principale interesse per le tecnologie necessarie allo sviluppo di DEMO. 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

Nell'ambito del programma internazionale si intende realizzare un esperimento di fusione denominato FAST, Tokamak compatto, in grado di realizzare scenari di elevate prestazioni ed 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.



Layout 3D in scala del prototipo di SNU nella sua configurazione definitiva



Assieme della prima bobina al termine delle operazioni di impilaggio dei 6 DP e dopo la rimozione del lamierino per impregnazione

RISULTATI

Macchina JT-60SA

Le attività svolte riguardano la fornitura di 9 moduli di magneti di campo toroidale della macchina JT-60SA.

La prima fase necessaria alla realizzazione dei nove moduli è la realizzazione dei Winding Pack (WP) impregnati. Le bobine del sistema magnetico toroidale di JT-60SA sono costituite dalla sovrapposizione di 6 doppi pancake, per un totale di 72 spire di cavo superconduttore in NbTi. Il peso complessivo della bobina al termine dell'impregnazione è di circa 6.3 tonnellate, l'ingombro massimo circa 7.5 m x 4.4 m. La fabbricazione prevede l'esecuzione di tre passi fondamentali: i) avvolgimento del conduttore sulla forma a D per formare il doppio pancake; ii) impilaggio dei doppi pancake e nastratura contro-massa; iii) impregnazione e prove di accettazione finali.

La fabbricazione dei nove moduli di magneti si completerà con l'inserimento delle bobine nelle relative casse di contenimento in acciaio AISI 316L. Per la validazione dei metodi realizzativi sono state completate tutte le attività di qualifica dei processi speciali coinvolti. In particolare è opportuno ricordare: il processo di impregnazione, il processo di inserimento della trave di impregnazione nei mock-up della cassa; la saldatura di quest'ultimi; tutte le attrezzature per la fabbricazione e trasporto delle nove bobine sono state acquisite. Nel corso del 2014 sono state collaudate presso gli stabilimenti ASG di Genova le ultime attrezzature previste. Si tratta dell'attrezzatura di inserimento della bobina nella cassa e dell'attrezzatura di impregnazione in cassa (embedding).

Riguardo la realizzazione delle strutture di contenimento delle bobine toroidali JT-60SA, sono state eseguite le realizzazioni di componenti ed assiemi per la costruzione delle casse a forma di D contenenti le bobine. In particolare sono stati realizzati elementi ricavati da laminati per la composizione di 15 gambe dritte e curve e due gomiti realizzati con il nuovo materiale forgiato.

L'ultima parte delle attività in cui ENEA è impegnata riguarda la realizzazione di parte degli alimentatori dei magneti poloidali di JT-60SA ed in particolare sono stati sviluppati i disegni di fabbrica e layout, i

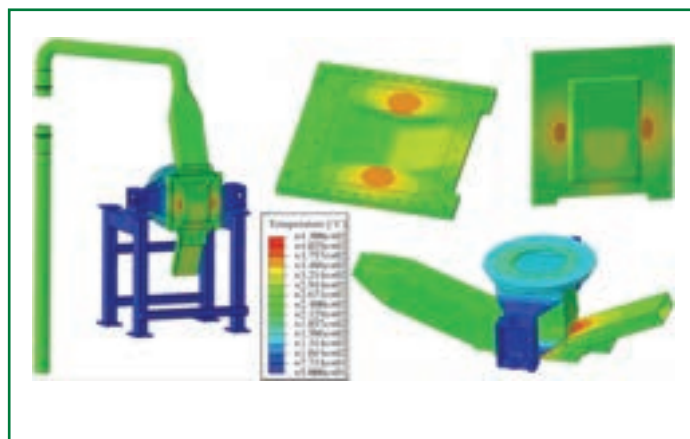


Gamba curva in fase di saldatura degli accessori esterni

disegni meccanici e funzionali e gli schemi elettrici di potenza, protezione, misure comando e controllo necessari per la realizzazione degli alimentatori. I trasformatori sono stati costruiti e sottoposti a campagne di test di corto-circuito presso il laboratorio CESI di Milano e misura della temperatura negli avvolgimenti secondari.

Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF

La prima parte di attività svolte da ENEA riguarda forniture ed implementazioni comuni per progettazione, costruzione ed operazioni riguardanti l'impianto a litio EVEDA Loop per IFMIF. Sono state condotte due campagne sperimentali per il rilevamento dei fenomeni di cavitazione sull'impianto EVEDA Lithium Test Loop (ELTL) di Oarai (Giap-



Simulazione termica nel TA fi IFMIF

pone). In entrambe le campagne sono stati utilizzati i sistemi CASBA per la misura della cavitazione progettati dall'ENEA. L'attività è stata articolata in accordo alle fasi di completamento dell'installazione e commissioning del sistema, due campagne sperimentali e post analisi dei dati e risultati finali. L'installazione dei dispositivi per la cavitazione è stata eseguita dal personale JAEA (Japan Atomic Energy Agency) nel Novembre 2013, mentre l'ENEA ha completato i montaggi dell'elettronica ancora mancante, come i sistemi di pre-amplificazione dei segnali, ed ha eseguito il commissioning della catena di misura e la sua calibrazione.

La seconda parte delle attività riguarda forniture ed implementazioni comuni per sperimentazioni della corrosione/erosione per IFMIF. L'impianto Lifus6 è stato progettato e realizzato nel centro ENEA del Brasimone allo scopo di effettuare test di resistenza alla corrosione/erosione esercitata da Litio liquido fluente alla temperatura di 350°C.

Una ulteriore parte di attività riguarda forniture ed implementazioni comuni per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione del litio per IFMIF. A tale riguardo è stata eseguita la validazione sperimentale della procedure di analisi offline della purezza del litio e stima della cinetica di purificazione. L'ultima attività riguarda forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e la qualifica del sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF.

Attività IFERC

La prima parte di attività riguarda lo studio di composti in SiC/SiC ed in particolare la produzione e la

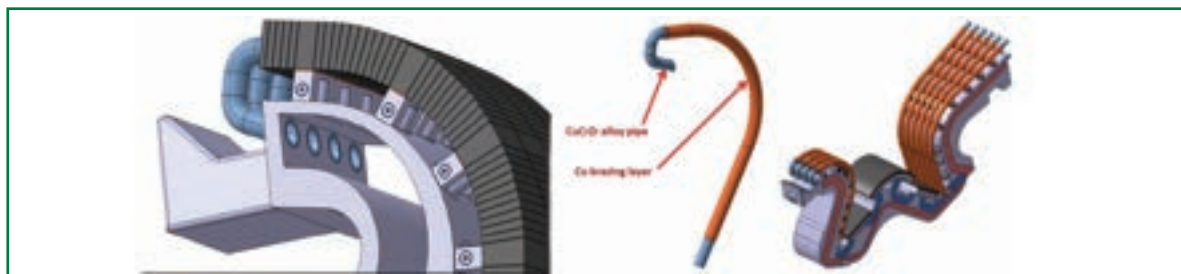
fornitura di tubi di medio e grosso diametro, di prismi a sezione quadrata in SiCf/SiC e delle tecnologie e di campioni di acciaio ferritico con rivestimento in SiC/SiC monolitico o SiCf/SiC. La realizzazione dei componenti e dei campioni è stata propedeutica allo sviluppo delle tecniche di collegamento di SiC/SiC su matrice di acciaio per le differenti tipologie di forme e dimensioni di tubi previste.

La successiva attività di ricerca riguarda la progettazione e costruzione di una camera sperimentale per prove di erosione-corrosione ad alta temperatura (1000°C) di campioni di SiC/SiC in litio-piombo.

FAST il nuovo esperimento satellite Europeo

L'attività di ricerca riguarda l'analisi del problema del power exhaust e del suo smaltimento su componenti metallici in EAST basato su soluzioni FAST-like, in vista della sua applicazione a JT-60SA. In particolare le attività si sono concentrate sullo studio del power exhaust e dell'interazione tra centro e bordo del plasma in EAST e FAST e poi sullo sviluppo della configurazione di plasma di tipo "Snow-Flake" FAST-like per EAST.

La seconda parte delle attività ha riguardato lo studio preliminare delle soluzioni di sostituzione da remoto del divertore e della prima parete in EAST, basato su soluzioni FAST-like. In particolare grande attenzione è stata rivolta alla progettazione di componenti affacciati direttamente al plasma, come prima parete (FW) e divertore, per ragioni di movimentazione remota e carichi termo-strutturali.



Cassette del divertore di FAST con tubi di ingresso (a sinistra) e il layout del nuovo circuito di raffreddamento (a destra)

Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto B.3.2: Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER

Referente: A. Pizzuto, aldo.pizzuto@enea.it