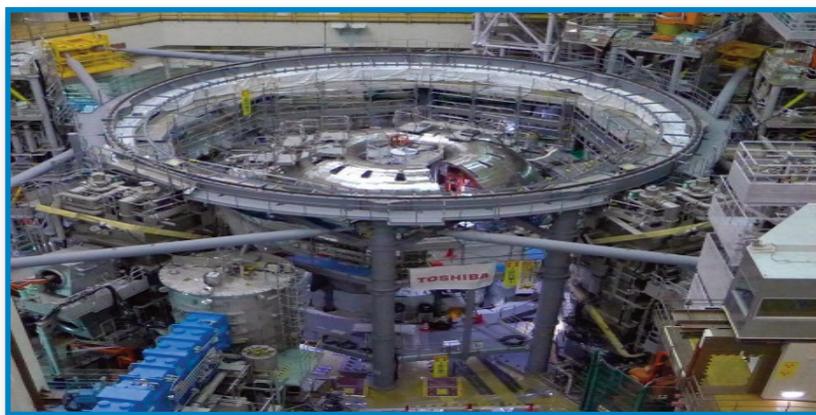


Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari a ITER

SCENARIO DI RIFERIMENTO

La fusione termonucleare controllata è considerata una opzione concreta come fonte di energia sicura, compatibile con l'ambiente e praticamente inesauribile. A conferma, 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).

Per sfruttare al meglio le sperimentazioni di ITER è necessario prevedere delle attività complementari di fisica e tecnologia ed in quest'ottica Europa e 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. L'accordo 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* e la realizzazione di una *facility* IFMIF per lo studio del danneggiamento dei materiali sottoposti a un flusso di neutroni di energia da fusione.



OBIETTIVI

Costruzione 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 (Giappone) 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 6 trasformatori.

IFMIF

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 *facility* di ricerca detta IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*) costituita da una sorgente di ioni, due acceleratori lineari, per raggiungere l'elevatissima energia di 40 MeV, facendo convergere i fasci di ioni sul bersaglio di litio fuso in circolazione forzata ad alta velocità.

L'ENEA partecipa al programma provvedendo allo sviluppo del target per la produzione dei neutroni

all'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 per il litio.

RISULTATI **Macchina JT-60SA**

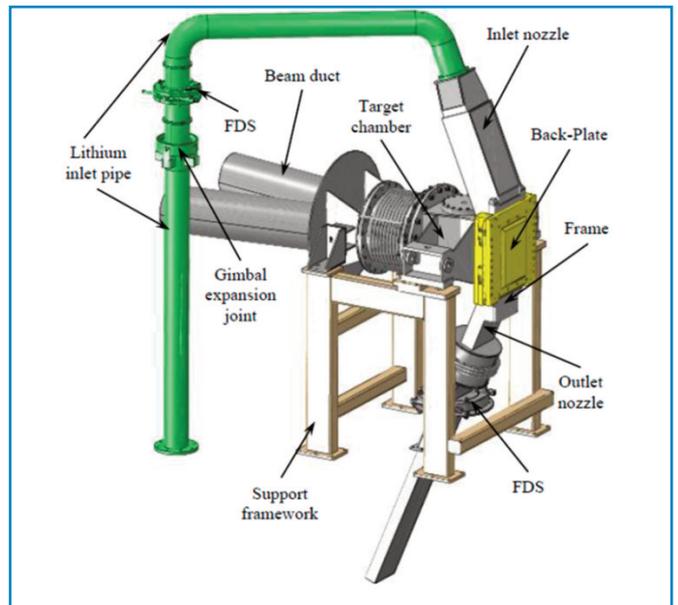
I moduli del sistema toroidale della macchina *tokamak* JT-60SA sono in fase di costruzione presso l'ASG Superconductors SpA di Genova sotto la supervisione di ENEA. È stata completata la realizzazione di tutti i nove avvolgimenti di bobina toroidale con le relative prove di accettazione. Il modulo di magnete toroidale è realizzato inserendo l'avvolgimento di bobina all'interno dei componenti della cassa di contenimento. La chiusura della cassa per saldatura, l'impregnazione dell'avvolgimento in cassa (embedding) e le lavorazioni finali di macchina assicurano le caratteristiche di interfaccia richieste dal modulo di magnete per la formazione del sistema magnetico toroidale.

Nel corso del 2015 è stato completato l'inserimento, la saldatura e l'impregnazione in cassa del primo e del secondo modulo; inserimento e parziale saldatura del terzo modulo. Le attività che mancano al completamento dei primi tre moduli procedono parallelamente alle attività costruttive per i restanti moduli. Nella navata degli stabilimenti di produzione della ASG Superconductors sono disposti sette avvolgimenti di bobina già avvolti dalle tele di vetro previste per compensare lo spazio tra gli stessi e le relative casse di contenimento, e che verranno impregnati con resina epossidica sotto vuoto nella successiva fase di fabbricazione. Altri due avvolgimenti sono in fase di integrazione con la cassa.

In occasione del 23° Technical Coordination Meeting organizzato dall'ENEA per fare il punto sullo stato di avanzamento del progetto a Genova, circa 50 delegati europei e giapponesi hanno visitato l'ASG e il primo modulo di magnete toroidale.

Riguardo la realizzazione delle strutture di contenimento delle bobine toroidali JT-60SA, è stata completata la realizzazione dei primi 6 set di componenti per casse che sono stati consegnati per l'assemblaggio finale rispettivamente ad ASG (Genova) ed ad Alstom (Belfort).

La cassa è costituita principalmente da una gamba



Modello del Target Assembly di IFMIF



Vista degli avvolgimenti in attesa dell'inserimento nelle casse di contenimento



Inserimento del primo avvolgimento nella cassa di contenimento

dritta, una gamba curva e da tre coperchi per il contenimento della bobina come mostrato nel ciclo completo di produzione schematizzato nella figura a lato.

L'ENEA è impegnato anche nella fornitura degli apparati elettrici di potenza per l'alimentazione della macchina JT-60SA. Il Central Solenoid (CS) di JT-60SA è diviso in quattro moduli, ognuno dei quali è collegato ad un circuito di alimentazione e ad una unità di commutazione veloce (switching network unit, SNU) necessaria alla formazione del plasma di fusione.

La principale criticità delle SNU consiste nel dover aprire in meno di 1 ms correnti continue fino a 20 kA producendo ai loro capi tensioni fino a 5 kV. Non essendo disponibili sul mercato soluzioni adatte allo scopo, è stato sviluppato un progetto dedicato, gestito dall'ENEA in coordinamento con i partner internazionali. Data la specificità della fornitura, si è stabilito di eseguire una serie esaustiva di prove su un prototipo a piena scala (primo della serie) nei laboratori del Centro Ricerche ENEA di Frascati, in condizioni anche più onerose di quelle previste durante gli esperimenti di JT-60SA. Dopo l'esito positivo di tali prove, nel corso del 2015, sono stati completati tutti gli altri elementi delle ulteriori tre SNU.

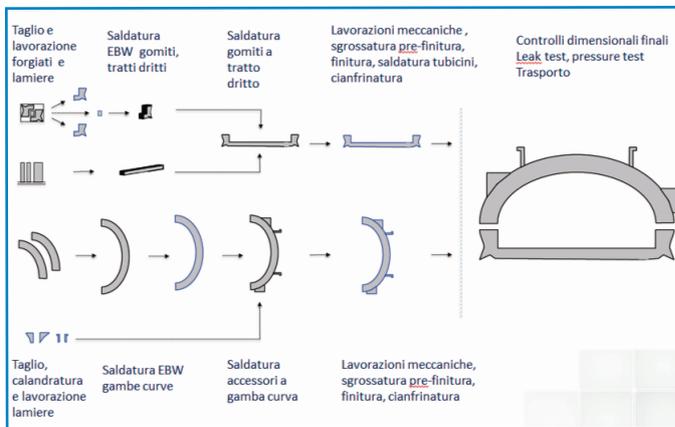
Particolare attenzione è stata dedicata allo sviluppo del sistema di controllo locale (Local Control Cubicle, LCC) con la definizione di tutte le procedure di comunicazioni con il resto degli impianti.

Le prove del sistema di controllo sono state eseguite sul sistema complessivo finale (quattro SNU comandate dall'LCC), assemblato nella sede di OCEM in maniera analoga alla configurazione definitiva nel sito JAEA di Naka.

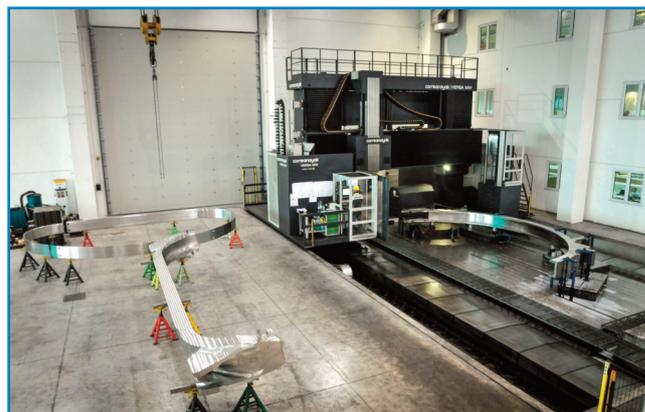
Lo stato delle attività consente di avviare le procedure per l'imballaggio e il trasporto dell'intera fornitura verso il Giappone per l'installazione e la messa in servizio integrata con gli altri componenti dell'impianto, previste per il 2016.

Le alimentazioni di potenza comprendono la fornitura di otto alimentatori AC/DC non convenzionali e sei trasformatori MT/BT, destinati ad erogare le elevate correnti richieste da alcuni avvolgimenti superconduttori del Tokamak JT-60SA. La fase di ingegnerizzazione ha individuato i criteri di dimensionamento dei sistemi e di scelta dei componenti industriali. Nel 2014 è stato completato il design dei trasformatori, mentre nel 2015 sono stati approvati i design dei convertitori.

In linea con quanto programmato sono stati realizzati



Ciclo di produzione delle casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA



Set completo dei componenti di una cassa di contenimento presso le officine Walter Tosto di Chieti Scalo: gamba curva, gamba dritta e coperchi di chiusura



Gamba dritta e gamba curva del 2° casing in fase di assemblaggio in ASG Superconductors SpA di Genova

e collaudati i trasformatori per le bobine del Fast Plasma Position Control (FPPC) e relativi convertitori completi di collaudo.

Nel corso del 2015 è stata terminata la realizzazione di un prototipo del sistema di controllo di un convertitore per Central Solenoid (CS) completo di prove per garantire la comunicazione con il sistema di potenza; parallelamente si è provveduto alla costru-

zione di un prototipo di sistema Crowbar di un convertitore CS con relative prove.

Da ultimo sono stati realizzati i trasformatori per CS2 e CS3 completi di prove di accettazione e i quadri elettrici dei raddrizzatori a tiristori dei convertitori per CS1 e CS4.

Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF

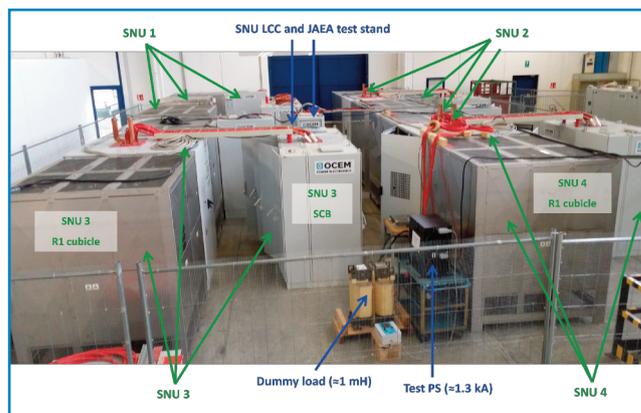
Nell'ambito delle attività IFMIF è stato completato il commissioning dell'impianto Lifus 6 per eseguire prove di resistenza alla corrosione-erosione da litio liquido fluente alla temperatura di 350 °C.

In una prima fase della purificazione, le concentrazioni di carbonio, ossigeno ed idrogeno sono abbattute da una Trappola Fredda; in una seconda fase l'utilizzo di una Trappola Calda, eseguita a partire da ottobre 2015, consente di ridurre anche la concentrazione di azoto.

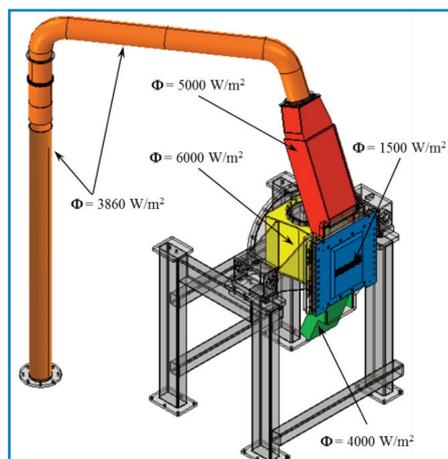
L'avvio delle prove di corrosione è subordinato alla preventiva purificazione iniziale del litio circolante nell'impianto. A tal fine sono state eseguite diverse analisi (offline) di campioni di litio per verificare le quantità di impurezze non metalliche disciolte nel litio circolante e per validare lo strumento di misura in tempo reale di tali impurezza.

Il contributo ENEA comprende lo studio del comportamento termomeccanico del target assembly in condizione transitorie e di start up. A tal fine è stato sviluppato un modello 3-D agli elementi finiti (FEM) in grado di simulare il comportamento termico del prototipo del target assembly nella fase di preriscaldamento. L'obiettivo principale delle simulazioni è stato quello di identificare la sequenza ottimale di carico dei riscaldatori, ovvero quella sequenza in grado di far raggiungere lo stato stazionario finale al sistema mantenendo la temperatura nelle sue varie parti il più uniforme possibile durante il transitorio.

Per quanto riguarda la progettazione ingegneristica del target assembly di IFMIF, le analisi termomeccaniche condotte sul modello del target assembly hanno evidenziato che, sebbene in generale il sistema sia in grado di sopportare le sollecitazioni, alcune sezioni della backplate (BP) in corrispondenza dell'altezza mediana del canale di litio, risultano essere critiche. Si è pertanto evidenziata la necessità



Disposizione degli elementi per il test sul sistema completo



Posizionamento dei riscaldatori elettrici sul prototipo del TA e relativi flussi termici

di una revisione del design della BP con lo scopo di selezionare per essa una configurazione geometrica ottimale in grado di mitigare le problematiche evidenziate ed estendere il più possibile la vita operativa del componente.

Le analisi neutroniche sono state eseguite utilizzando il codice Monte Carlo MCNP compilato con la sorgente IFMIF (McDeLicious) ed integrato con opportuni software di interfaccia (MCCAM, McCAD).

La ricerca di nuovi materiali con alte prestazioni meccaniche e limitato infragilimento sotto flusso neutronico, rende necessario lo sviluppo di acciai ferritico-martensitico alternativo all'EUROFER per la realizzazione del target assembly di IFMIF. Utilizzando una piccola colata di acciaio inossidabile martensitico 7Cr si sono eseguite operazioni volte alla definizione del trattamento termico per identificare la migliore struttura austenitica in grado di sopportare gli alti flussi neutronici che investono il materiale.

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*