



## Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER



Attività relative al programma 'Broader Approach'

**Ricerca di Sistema Elettrico**  
**Roma 28 Novembre 2012**

Antonio Cucchiaro – Coordinatore ENEA/UTFUS per il Progetto JT-60SA  
Per conto dell'Unità Tecnica Fusione

# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER



## Progetto 1.3.2. Fusione Nucleare PAR 2011

- Il presente documento si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2011, relativo all'Area "Governare, Gestione e Sviluppo del Sistema Elettrico Nazionale", Progetto 1.3.2 Fusione Nucleare - "Attività di Fisica della Fusione Complementari a ITER".
- Il programma fusione è coordinato a livello europeo dall'Euratom e vede la partecipazione di tutti i paesi UE più la Svizzera. Le attività italiane, sono condotte dall'ENEA, che ha la funzione di coordinatore, dal CNR e da molte Università italiane.
- Il progetto di ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) rappresenta una tappa fondamentale per arrivare alla realizzazione del primo reattore dimostrativo a fusione (DEMO).

Il programma di ricerca si articola in:

- Attività relative all'accordo 'Broader Approach'
- Attività relative alla progettazione della macchina satellite ad ITER, FAST.

In particolare le attività consistono in:

- ✓ La realizzazione di un esperimento tipo tokamak denominato JT60-SA (Obiettivo A)
- ✓ La progettazione e la realizzazione di prototipi per la sorgente intensa di neutroni IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) (Obiettivo B)
- ✓ L'istituzione del centro studi IFERC (International Fusion Energy Research Center) (Obiettivo C).
- ✓ Lo sviluppo del Tokamak FAST: il nuovo esperimento satellite Europeo (Obiettivo D).

# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER

## Progetto 1.3.2. Fusione Nucleare PAR 2011

| Sigla | Denominazione obiettivi                                      | Ore di personale ENEA          | SPESE (k€)                  |                                   |                           |                            |                                     | TOTALE                       |
|-------|--|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
|       |  |                                | Personale (a)               | Attrezzature e strumentazioni (b) | Correnti (d)              | Collaboratori esterni (d)  | Collaboratori dei cobeneficiari (e) |                              |
| A     | Macchina JT-60SA   | 12284<br>(6000)                | 846<br>(600)                | 6450<br>(7148)                    | 44<br>(0)                 | 0<br>(0)                   | 0<br>(0)                            | 7340<br>(7748)               |
| B     | Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF    | 3728<br>(2400)                 | 248<br>(168)                | 58<br>(125)                       | 58<br>(22)                | 357<br>(390)               | 0<br>(0)                            | 721<br>(705)                 |
| C     | Attività IFERC (International Fusion Energy Research Center) | 5969<br>(1200)                 | 395<br>(84)                 | 72<br>(30)                        | 15<br>(0)                 | 0<br>(0)                   | 200<br>(200)                        | 682<br>(314)                 |
| D     | Satellite (FAST)   | 2689<br>(1255)                 | 188<br>(88)                 | 0<br>(0)                          | 0<br>(0)                  | 180<br>(145)               | 0<br>(0)                            | 368<br>(233)                 |
|       | <b>TOTALE</b>  | <b>24670</b><br><b>(13435)</b> | <b>1677</b><br><b>(940)</b> | <b>6580</b><br><b>(7303)</b>      | <b>117</b><br><b>(22)</b> | <b>537</b><br><b>(535)</b> | <b>200</b><br><b>(200)</b>          | <b>9111</b><br><b>(9000)</b> |

La tabella riporta i costi del progetto (tra parentesi i valori di preventivo). E' da notare un generale maggiore impiego di personale nelle attività (11.235 ore in esubero rispetto a quanto preventivo) con conseguente maggior costo del personale (737k€).

Principali cause:

- Maggiore impegno per la progettazione delle casse e aggiornamento specifiche tecniche SNU e il monitoraggio dei contratti in essere: bobine toroidali e casse contenimento
- Maggiore impegno per le attività di ricerca relative al target IFMIF e ai materiali per IFERC

Il maggiore impegno su parte delle attività suddette ha comportato un leggero ritardo sull'approvvigionamento di alcune attrezzature.

# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER

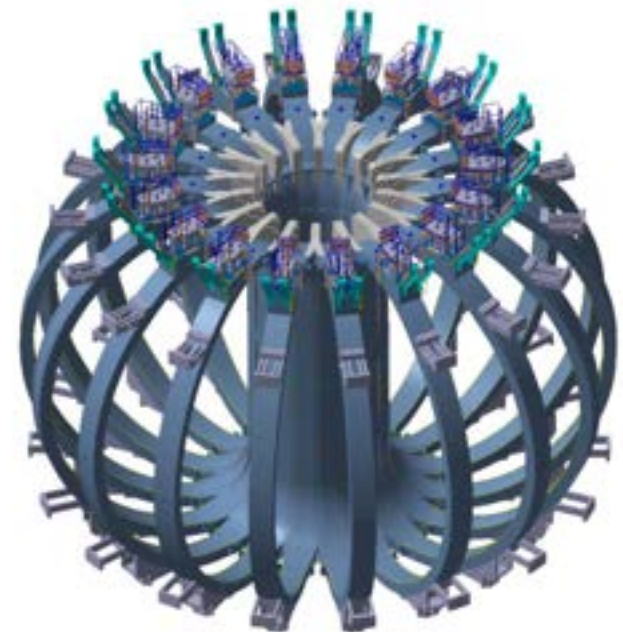
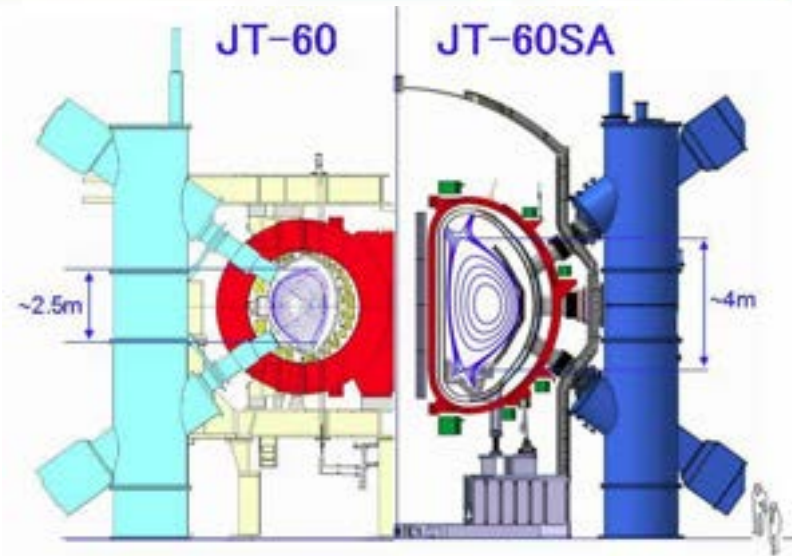
## OBIETTIVO A.

### COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA

Il Tokamak superconduttore JT-60SA sarà installato a Naka nella Torus Hall del Tokamak JT-60U. I 18 magneti di campo toroidale di JT-60SA sono di forma a D avvolti con un cavo in NbTi, raffreddato con elio a 4.4 gradi Kelvin.

L'ENEA è responsabile della Costruzione, Collaudo e Spedizione a Naka di:

- ✓ nove delle 18 bobine superconduttrici in NbTi che costituiscono l'intero magnete; le altre nove saranno realizzate dal CEA Francese;
- ✓ le casse di contenimento delle 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico con alte precisioni per il posizionamento finale delle bobine;
- ✓ le alimentazioni elettriche, per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente, quattro sistemi di commutazione della corrente continua (SNU - Switching Network Unit) con inserzione di di resistenza e quattro trasformatori.



# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER



## OBIETTIVO A- LINEA A1.

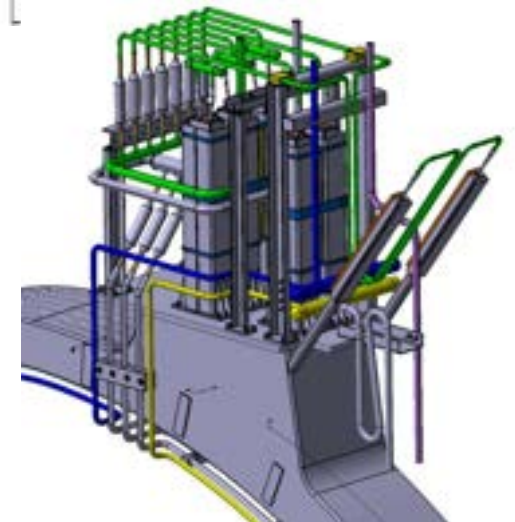
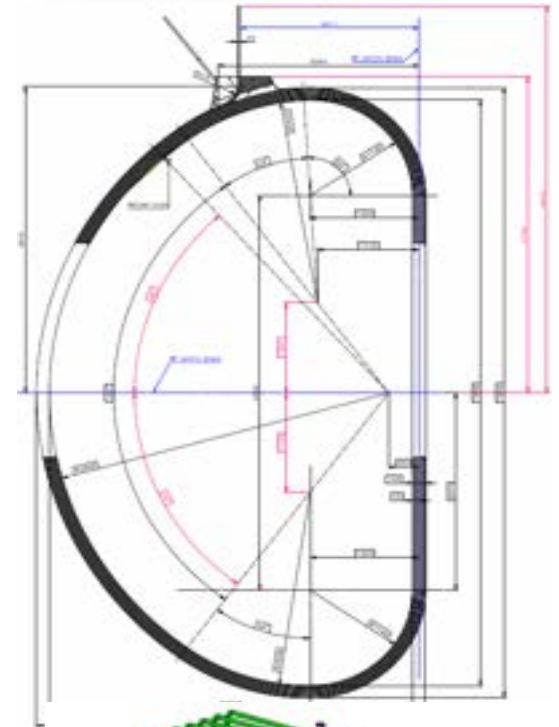
### COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA-DISEGNI

Contratto ASG per la realizzazione di 9 moduli di TF:

**Inizio 20 Settembre 2011;**

**Kick off Meeting 14 Ottobre 2011.**

- Aggiornamento della documentazione con il progredire delle attività.
- Pianificazione attività: prima bobina per Luglio 2014; ultima prevista per Luglio del 2016.
- Emissione degli statini del piano di controllo della qualità;
- Disegni costruttivi dei 6 doppi pancake della bobina e dell'avvolgimento inserito nella cassa completi di: ingresso di elio di refrigerazione, giunti elettrici e riempitivi per l'avvolgimento della bobina (modello 3D CATIA5);
- Disegni del sistema tubiero di raffreddamento e telaio di fissaggio. Disegno e procedura del piatto di isolamento fra bobine.



# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER

## OBBIETTIVO A -LINEA A1.

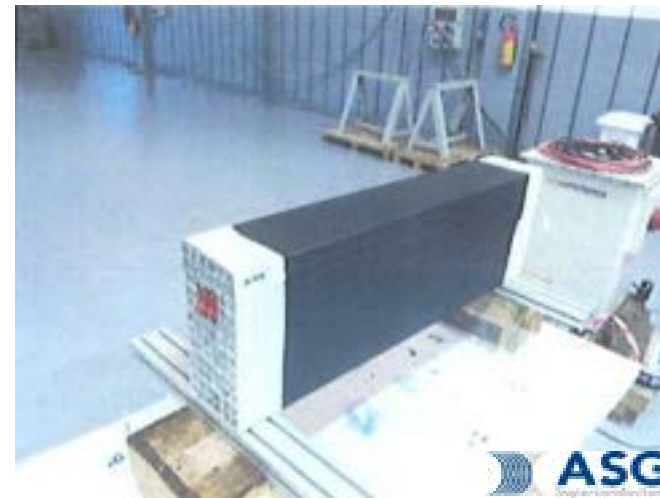
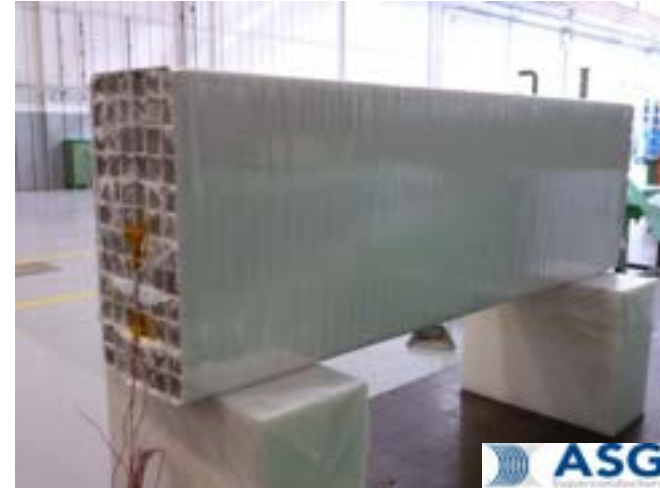
### COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA-QUALIFICA IMPREGNAZIONE

Alcuni processi richiedono un programma di qualifica prima della manifattura.

Il **processo di impregnazione** è stato validato realizzando un tratto lineare di bobina.

#### Prove elettriche:

- ✓ isolamento interspira a  $V=75$  ( $R=79$  G  $\Omega$ ),  $100$  V ( $R=102$  G  $\Omega$ ),  $150$  V ( $R=155$  G  $\Omega$ ). Una prova addizionale ha raggiunto un isolamento di  $10$  kV. **Isolamento richiesto  $80$  V.**
- ✓ isolamento verso massa a  $V=3.8$  kV DC /  $1$  min, ( $I < 1\mu\text{A}$ ). Una prova ulteriore ha raggiunto un isolamento di  $15$  kV. **Isolamento richiesto  $3.8$  kV.**

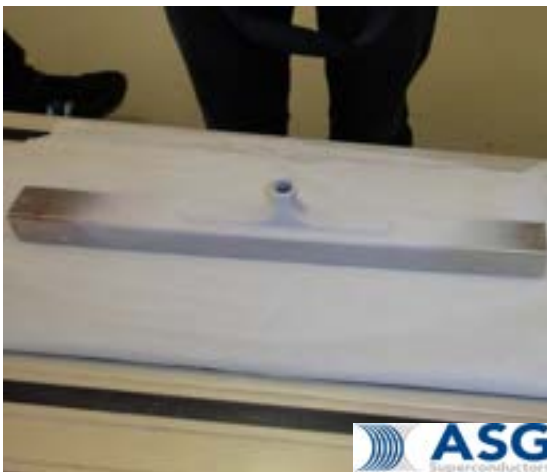


## OBIETTIVO A- LINEA A1.

### COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA-QUALIFICA INGRESSO ELIO (1)

Presenza come terza parte dell'Istituto Italiano di Saldatura. Operazioni eseguite:

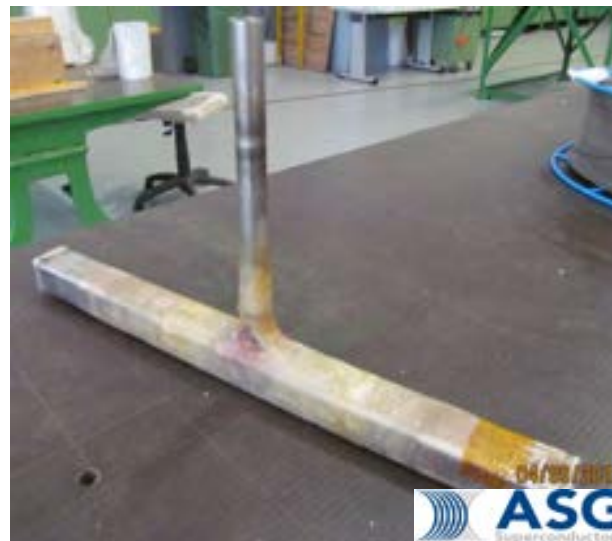
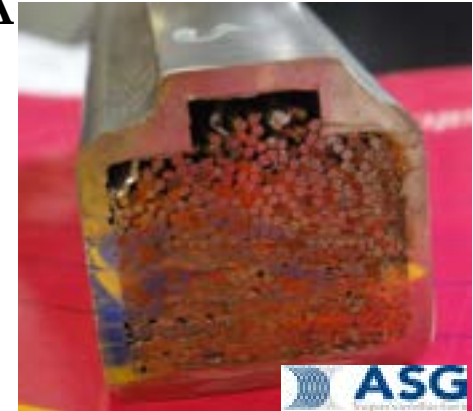
- ✓ Lavorazione dell'asola sulla camicia del conduttore per l'installazione del bocchello dell'ingresso di elio.
- ✓ Saldatura TIG dell'ingresso di elio e monitoraggio della temperatura sul cavo (Temperatura media raggiunta  $350^{\circ}\text{C}$ ; limite in specifica  $500^{\circ}\text{C}$  30 s); **superata**.
- ✓ Lavorazione del cordone di saldatura per migliorare la resistenza a fatica.
- ✓ Prova con liquidi penetranti; **superata**.



# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER

## OBIETTIVO A- LINEA A1. COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA QUALIFICA INGRESSO ELIO (2)

- ✓ n° 3 shock termici per immersion in azoto liquido;
- ✓ esame visivo, liquidi penetranti e raggi X come test distruttivo;
- ✓ Prova di pressione a 25 bar/1h e fuga con elio con  $4 \cdot 10^{-10}$  mbar l/s (si richiede  $1 \cdot 10^{-7}$  mbar l/s).
- ✓ Isolamento contromassa dell'ingresso di elio elettricamente isolato pari a:  $R = 780 \text{ G}\Omega$  a  $V=3.8 \text{ kV/1min}$ ;  $R=700 \text{ G}\Omega$  a  $V=5.0 \text{ kV/1min}$ . **Richiesto  $V=3.8 \text{ kV}$  con  $R = 100 \text{ M}\Omega$ .**

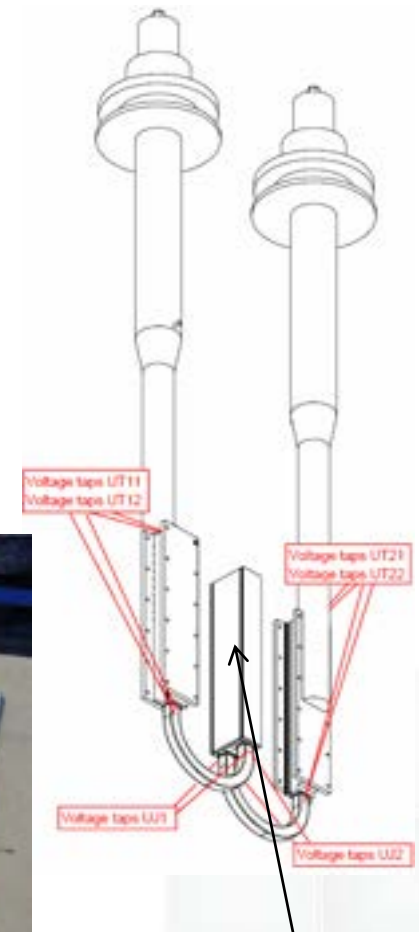


## OBIETTIVO A- LINEA A1.

### COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA-QUALIFICA RESISTENZA ISOLAMENTO

Valutazione meccanica dell'isolamento con nastro di vetro impregnato sotto vuoto con resina epossidica.

- ✓ Resistenza alla sollecitazione di taglio statica e dinamica di 36000 cicli dopo impregnazione:
  - Prova di taglio (MPa) a R.T.: 57.4; 56.2; 53.6; **richiesto 40 MPa.**
  - Prova di taglio (MPa) a 4 K.: 62; 80; 64; **richiesto 55 MPa.**
  - Prova dinamica a 20 MPa a R.T.; **superata.**
- ✓ Realizzazione del prototipo del giunto elettrico interno.



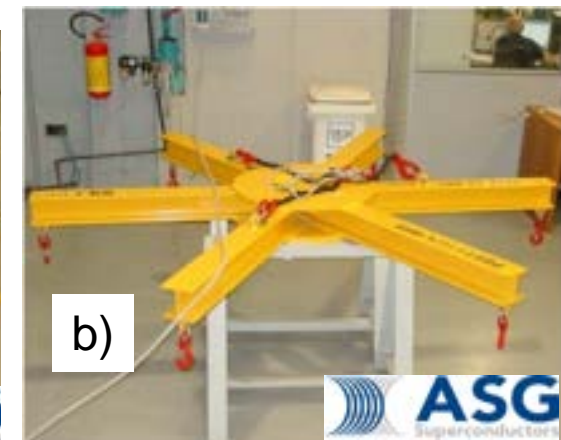
Inner electrical joints

# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER

## OBIETTIVO A- LINEA A1.

### COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA-ATTREZZATURE

- a) Attrezzatura per la manipolazione del DP in grado di interfacciarsi con la linea di avvolgimento;
- b) attrezzatura per la manipolazione del cestello del conduttore;
- c) banco di composizione del DP dotato di supporti regolabili per l'applicazione dell'avvolgimento contromassa;
- d) banco di composizione della bobina toroidale dotata di staffe laterali con regolazione fine per il corretto posizionamento finale di ciascun DP



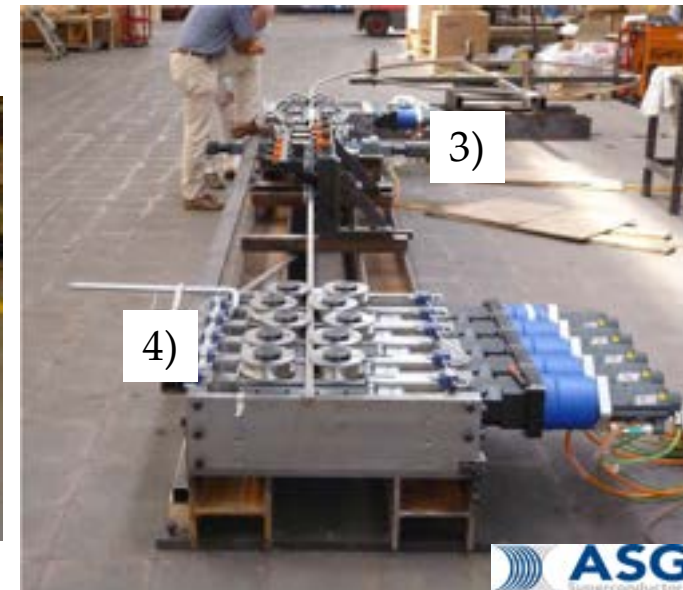
# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER

## OBIETTIVO A- LINEA A1.

### COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA-LINEA DI AVVOLGIMENTO

La linea di avvolgimento consiste di:

1. Sistema di controllo ed acquisizione dati;
2. Naspo svolgitore
3. Unità di raddrizzamento;
4. Unità di piegatura;
5. Stadi di pulizia (ultrasonico, rinsing, drying);
6. Unità di sabbiatura;
7. Avvolgimento nastro isolante;
8. Tavola roto-traslante.



## OBIETTIVO A- LINEA A1.

### COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA-APPARECCHIATURE

- a) Camera da vuoto e sistema di pompaggio per le prove di accettazione del conduttore (prove di flusso con azoto, prova di pressione e di fuga);
- b) stampo di impregnazione dotato di staffe di compattazione e sistema di riscaldamento per la cottura della resina;
- c) camera da vuoto per le prove di accettazione dei DP e finali della bobina toroidale. Il sistema è dotato di pompa turbo-molecolare.



## OBIETTIVO A- LINEA A1. COSTRUZIONE MAGNETE TOKAMAK JT-60SA-MATERIALI

All the main materials and components necessary for the WP and coil manufacturing:

- ✓ Glass tape-clothes for insulation and embedding.
- ✓ Glass-epoxy fillers for winding and termination area.
- ✓ G10 insert and filament winding electrical breakers.
- ✓ Wires for internal and termination joint voltage taps and cernox sensors.



## OBIETTIVO A- LINEA A2

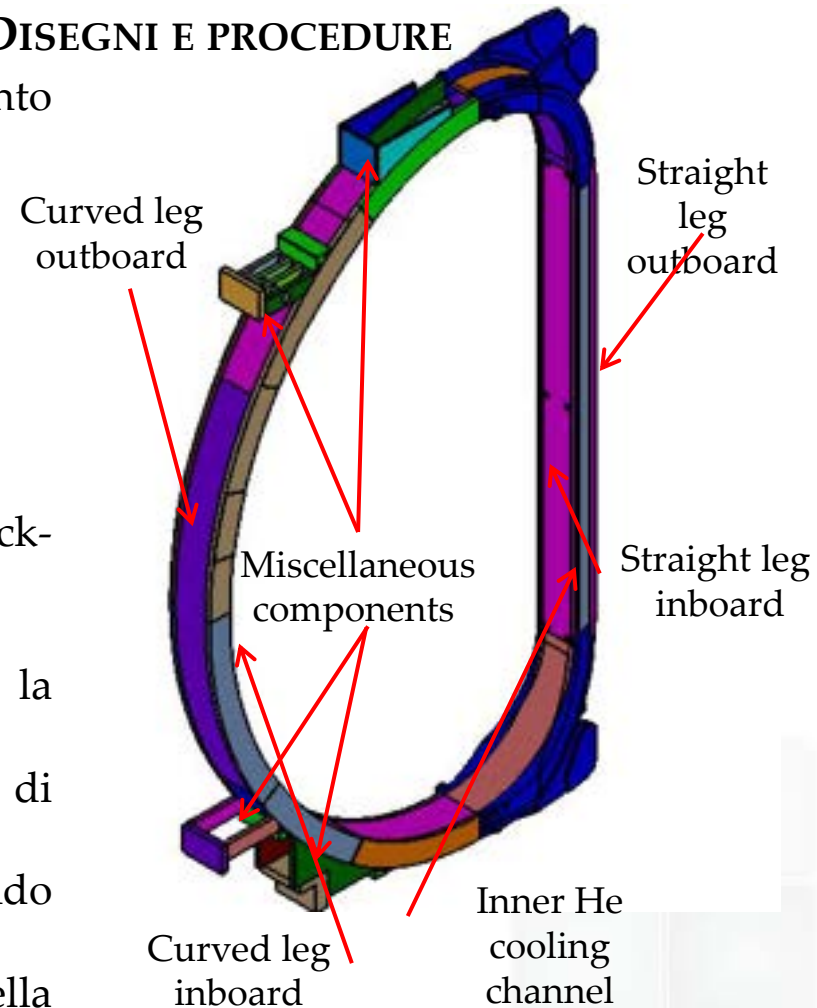
### COSTRUZIONE 18 CASSE PER BOBINA-DISEGNI E PROCEDURE

Contratto con Walter Tosto per le casse di contenimento delle 18 bobine.

**Stipula nel mese di luglio 2012;  
kick-off meeting 12 luglio 2012.**

La ditta ha definito:

- ✓ il quality plan
- ✓ lo schema di segmentazione casse,
- ✓ Modelli 3D e disegni per la realizzazione dei mock-ups e dei componenti delle casse.
- ✓ Metodi di saldature (EBW e TIG) e relativi cianfrini.
- ✓ l'ordine di acquisto di tutto il materiale per la costruzione
- ✓ i criteri di ispezione ed esecuzione delle prove di accettazione dei materiali.
- ✓ le zone di lavoro meccanico e di saldatura confinando le aree in cui la pulizia deve essere garantita
- ✓ documenti relativi alla gestione della documentazione, documenti di controllo di qualità e procedure di lavorazione.



## OBIETTIVO A- LINEA A2.

### COSTRUZIONE 18 CASSE PER BOBINA- COSTRUZIONE DEI MOCK-UP

Realizzazione di 2 set di mock ups (ASG, Alstom) per qualificare la procedura di saldatura sulla cassa. I mock ups in acciaio 316 L verranno utilizzati principalmente per qualificare le saldature trasversali e longitudinali.

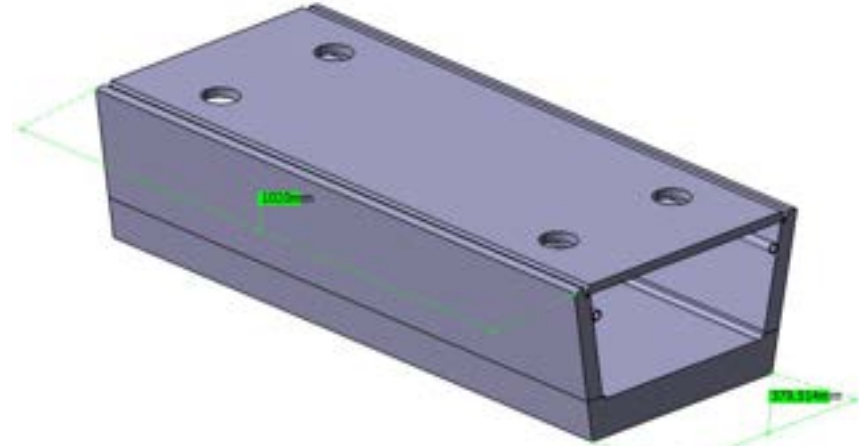
Il cianfrino di saldatura deve essere fornito dai fornitori della bobina.

Prove per qualificare la procedura di saldatura.

Prove di saldatura del tubo di raffreddamento ad elio sulla superficie interna del mock up per ottimizzare il processo di saldatura.

Test per la preparazione della finitura superficiale mediante lavorazione di macchina

Lavorazione di macchina delle lamiere che compongono i mock ups.

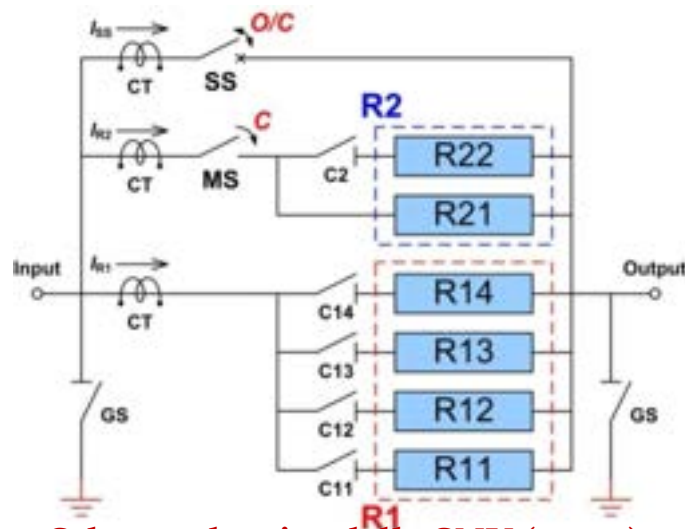


## OBIETTIVO A- LINEA A3.

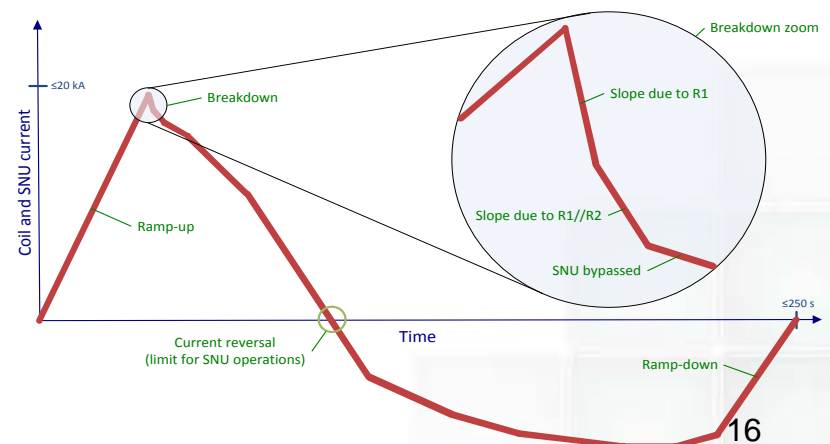
### FORNITURA DI 4 SWITCHING NETWORK UNIT

L'ENEA ha elaborato le specifiche tecniche e gli altri documenti necessari alla realizzazione degli SNU, alla integrazione dei sistemi e alla gestione dell'impianto, ed in particolare:

- ✓ Redazione delle TS definitive per la Call for Tender, lanciata il 04/07/2012.
- ✓ Redazione delle specifiche gestionali e di qualità (MQS) per la Call for Tender.
- ✓ Incontri tecnici e gestionali con i partner internazionali (F4E, JAEA ed altre agenzie ed industrie) per lo scambio di informazioni e l'aggiornamento del progetto.
- ✓ Call for Tender ed aggiudicazione.
- ✓ **Avvio delle attività tecniche con la ditta Energy Technology il 21 Ottobre 2012**



Schema elettrico delle SNU (4 sets)



## OBIETTIVO A- LINEA A4.

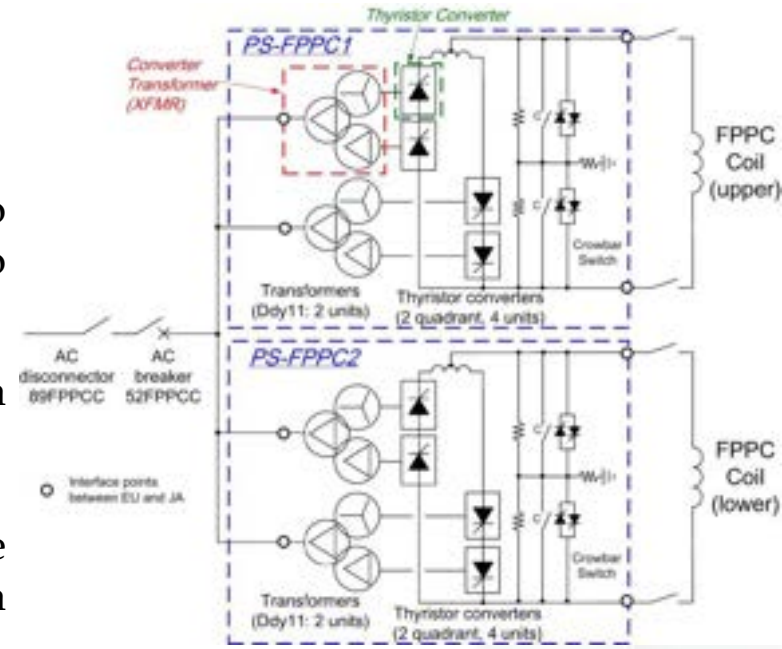
### FORNITURA DI ALIMENTATORI DEI MAGNETI POLOIDALI

Gli alimentatori da fornire sono divisi in:

- ✓ 4 Solenoidi centrali (Central Solenoid, CS), classificati come CS1, CS2, CS3 e CS4;
- ✓ 2 Equilibrium Field (EF) coils, classificati come EF1 e EF6;
- ✓ 2 Fast Plasma Position Control (FPPC) coils classificati come lower FPPC e upper FPPC

Nel periodo di riferimento sono state svolte le attività:

- ✓ Analisi e simulazione di alcuni aspetti del sistema ancora da definire o da aggiornare.
- ✓ Il dimensionamento termico ha richiesto un confronto con gli scenari di corrente previsti giapponesi e lo sviluppo di un tool informatico.
- ✓ Per le TS sono stati eseguiti calcoli finalizzati alla stima della temperatura di giunzione dei tiristori.
- ✓ Definizione delle interfacce e delle condizioni esterne degli alimentatori all'interno dell'impianto JAEA a Naka.
- ✓ Aggiornamento della documentazione richiesta dal **Contratto previsto per Maggio 2013**



**Schema delle PS FPPC.**

## OBIETTIVO B- LINEA B1: IFMIF

### FORNITURA ED IMPLEMENTAZIONI COMUNI PER LA PROGETTAZIONE, COSTRUZIONE ED OPERAZIONI PER L'IMPIANTO A LITIO ELITE (OARAI- GIAPPONE)

#### Risultati PAR 2011:

- Fornitura del sistema di misura online per la determinazione della concentrazione di N in Li. L'apparecchio (CASBA 2000) è stato realizzato per la misura di cavitazione. Il sistema di misura utilizza un sensore piezoelettrico solidale con la componente meccanica da proteggere e sarà consegnato in Giappone per la fine del 2012 / inizio 2013.



Misuratore di  
impurezza del litio  
basato sulla resistività  
elettrica



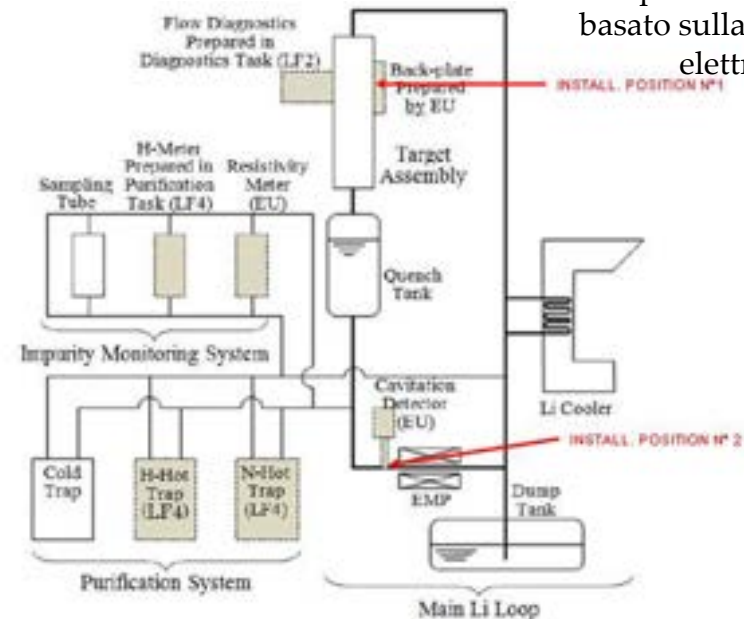
Misuratore di impurezza del litio  
(concentrazione N in Li) Resistivity



Meter



Sistema rilevamento cavitazione sviluppato da  
ENEA ed adattato all'impianto ELITE di OARAI



Posizione sensori CASBA per la rilevazione della cavitazione.

## OBIETTIVO B- LINEA B2-B3: IFMIF

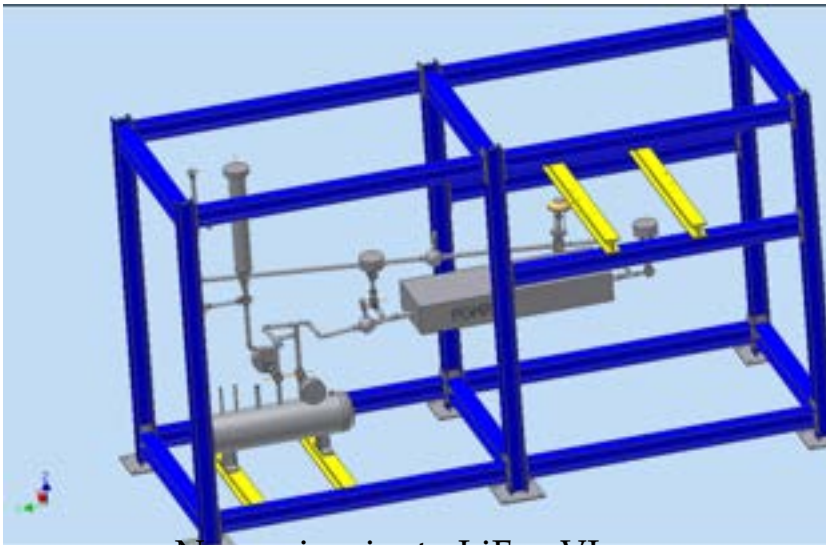
**FORNITURA ED IMPLEMENTAZIONI COMUNI PER SPERIMENTAZIONI DI CORROSIONE ED EROSIONE PER IFMIF E LA QUALIFICA DEL SISTEMA DI PURIFICAZIONE DEL LITIO.**

Risultati PAR 2011:

Un nuovo impianto a Litio (LiFus VI) è stato progettato e tutti i componenti sono stati acquistati. Rispetto al progetto precedente è stato modificato il serbatoio, che svolge adesso funzione di trappola calda (spugna di titanio, getter di azoto), con volume maggiore e geometria verticale. Il dispositivo di misura della concentrazione di Azoto è stato sviluppato presso l'Università di Nottingham in collaborazione con il centro ENEA del Brasimone e si basa sulla variazione della resistività del metallo (Li) prodotta dagli anioni in esso solubilizzati. La validazione delle procedure di purificazione avrà luogo a partire dal prossimo anno.

### Specifiche funzionali dell'impianto :

- Loop isoterma a 350° C ;
- Capacità totale 40 l di litio
- Velocità 16 m/s
- Campioni sezione di prova in Eurofer e in AISI 316L



Nuovo impianto LiFus VI



Flow meter Coriolis Emerson DT65H

# Fisica e Tecnologia della Fusione complementari ad ITER

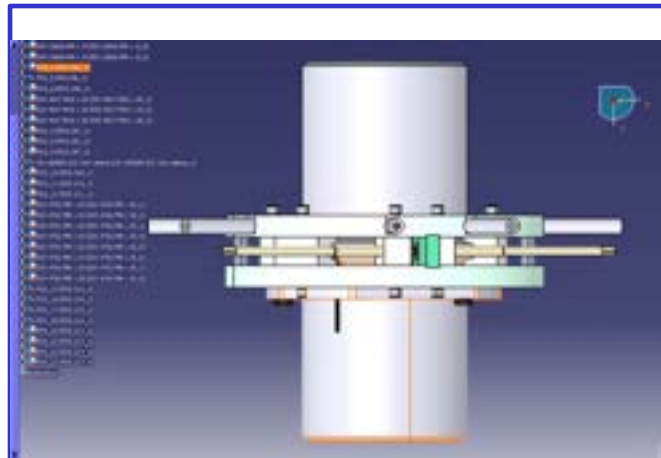
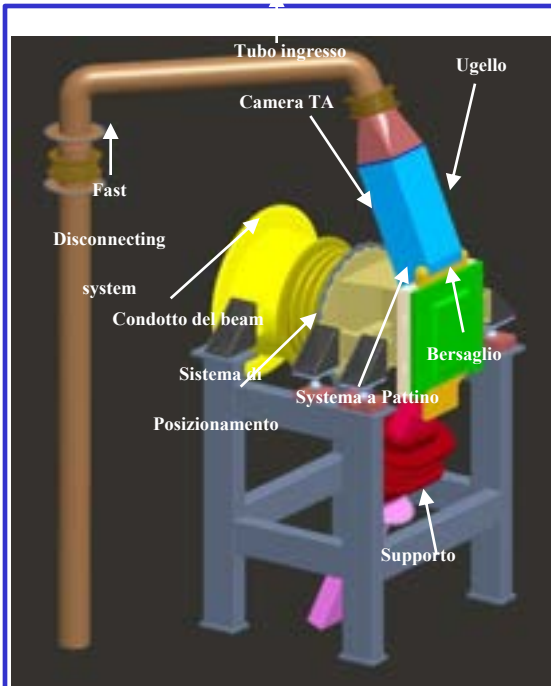
## OBIETTIVO B- LINEA B4: IFMIF

### SVILUPPO SISTEMA MANIPOLAZIONE REMOTIZZATA PER IL TARGET DI IFMIF

#### Procedure Manutenzione

#### Fast Disconnecting System

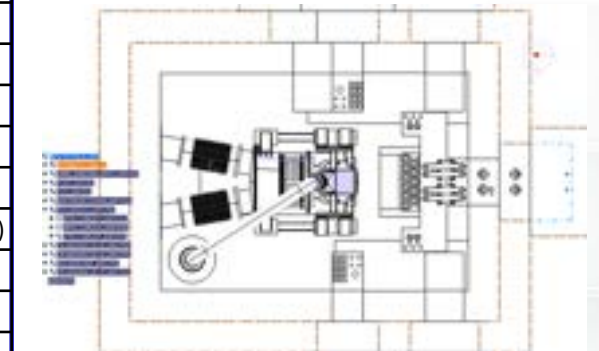
#### Aggiornamento della DRP



Nuovo sistema avvitanento



Stazione Realtà Virtuale

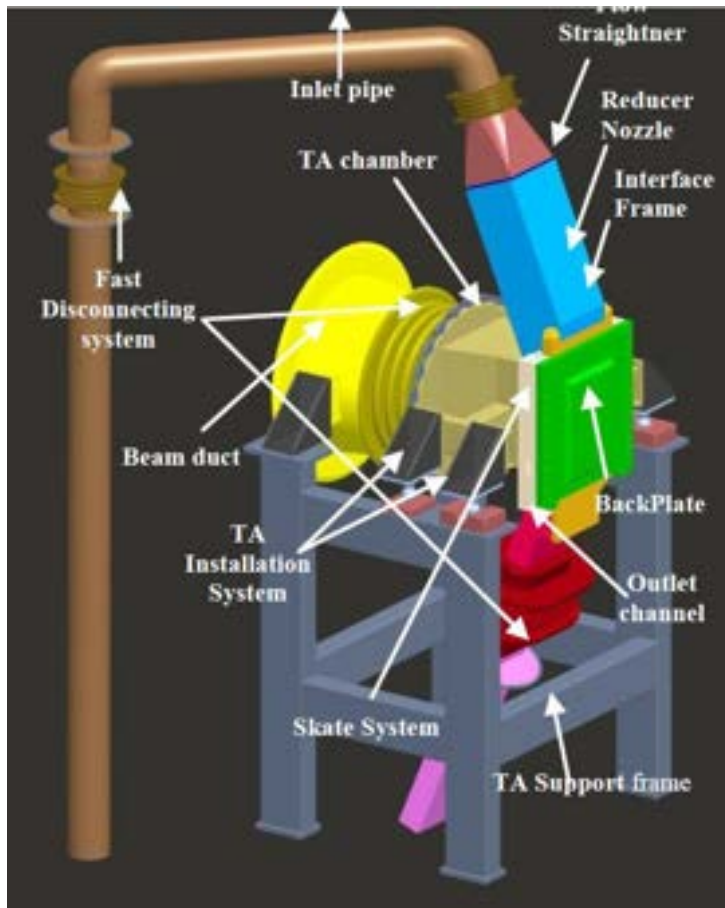


Prototipo TTC



| Item                            | Requirement                                    |
|---------------------------------|--|
| Operating temperature           | 250° C   |
| Design temperature              | 350° C   |
| Environment                     | Neutron + photon fields and Lithium in contact |
| Internal Pressure               | Low pressure (2 bar)                           |
| External pressure               | 50 mbar (inert gas)                            |
| Bolting points for inlet        | 1 or 2 (MAX)                                   |
| Flanges dimension               | DN 200   |
| Clamps reference                | EVAC (swiss)                                   |
| Type of gasket                  | Helicoflex® type (metallic gasket)             |
| Load on the gasket              | Low seating load is preferable                 |
| Max Leak ( He)                  | $< 10^{-7}$ Pa m <sup>3</sup> /s (He test)     |
| Torque max for sealing ( inlet) | As low as possible                             |
| Insulation Temperature          | 250° C → 50° C                                 |

## OBIETTIVO B- LINEA B5: IFMIF PROGETTAZIONE COMPLETA DEL TARGET A LI PER IFMIF



Vista 3D del Target Assembly  
integrato nella Test Cell

### Risultati PAR 2011:

- ✓ integrazione del Target Assembly con Backplate a baionetta con la sua struttura di contenimento Target (ENEA)- Test Cell (KIT) e col circuito a litio (lithium loop) progettato dal JAEA (Giappone)
- ✓ avanzamento e miglioramento del modello di Target Assembly esistente, a partire dalla configurazione sviluppata nell'ambito del precedente Accordo di Programma (2010).
- ✓ Il modello 3D finale integrato con lithium loop e il condotto dell'acceleratore è mostrato in Figura.

### Stato

- La progettazione meccanica è stata completata;
- L'analisi termomeccanica in regime stazionario è stata completata;
- L'analisi Termomeccanica in regime transitorio è in corso;
- l'analisi termo idraulica è in corso
- L'analisi neutronica è in corso;

## OBIETTIVO C- LINEA C1: IFERC

### CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ FISICHE COMPOSITO CERAMICO Si/C

Sviluppo di una metodologia multiscala applicata alla modellazione dei materiali compositi.

La metodologia multiscala permette di valutare le caratteristiche meccaniche a partire dal comportamento a livello microscopico dei materiali costituenti (i.e. fibre e matrice).

Nel corso di questa attività è stato sviluppato un codice di calcolo agli elementi finiti.

L'integrazione è avvenuta scrivendo una apposita user subroutine denominata UMAT che includeva anche il meccanismo di danneggiamento per il composito ceramico SiC/SiC con architettura plane weave.

Tale codice è stato convalidato confrontando i risultati numerici con quelli sperimentali su campioni specifici.



**2D Textile Architecture**



**3D Textile Architecture**

## OBIETTIVO C- LINEA C1: IFERC

### CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ FISICHE COMPOSITO CERAMICO Si/C

Il materiale composito ceramico SiC/SiC rappresenta un interessante materiale per un possibile utilizzo come prima parete nei reattori a fusione o come materiale funzionale da utilizzare sempre nei reattori a fusione. Questa possibilità oltre che definire procedure per la realizzazione del materiale implica da parte dei fabbricanti di tali materiali compositi ceramici la capacità di fornire manufatti di varie geometrie. A tal fine la ditta FN deve realizzare pannelli di spessore 3, 4 e 5mm e tubi con diametro esterno di 12.7mm ed interno di 6.3mm con lunghezza di 220mm. La diffusività termica nel caso di disposizione delle fibre in 3D è circa il doppio di quella per 2D in tutto l'intervallo di temperatura ( 25-1050 ° C).



**Impregnazione per avvolgimento tubo**



**Tubi dopo ciclo di lavorazione**

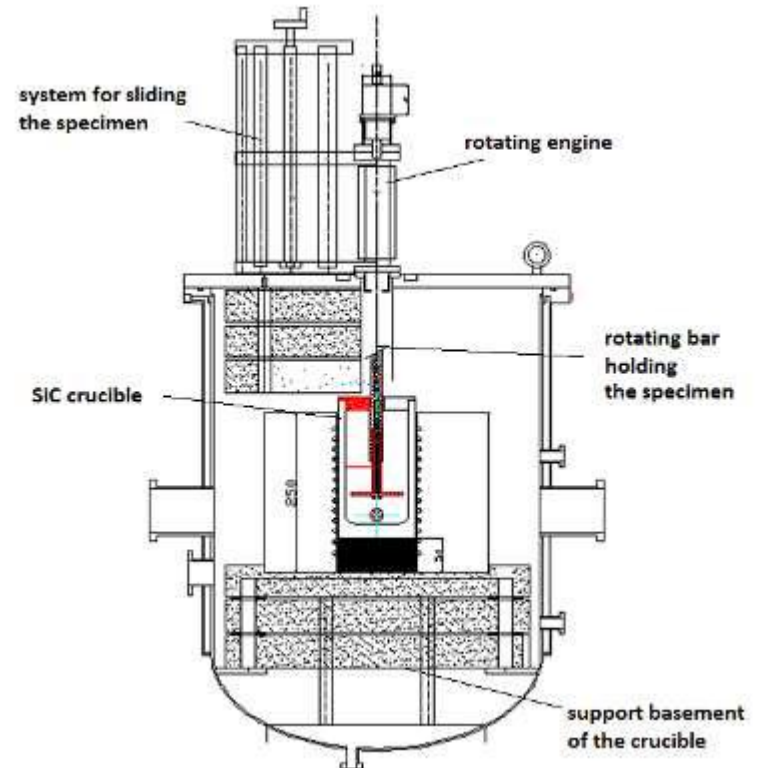
## OBIETTIVO C- LINEA C2: IFERC

### CARATTERIZZAZIONE DEL COMPOSITO CERAMICO SiC/SiC IN LITIO-PIOMBO

Progettazione e costruzione di una camera sperimentale per prove ad alta temperatura (1000-1200 ° C) di campioni di SiC/SiC in litio-piombo per applicazioni Fusionistiche.

Nel forno un campione di SiC/SiC rotante viene mantenuto ad alta temperatura in un crogiolo contenente litio-piombo con le condizioni:

- temperatura massima 1000 ° C,
- velocità relativa LiPb/SiC nell'intervallo 0.1-0.5 m/s,
- durata delle prove fino a 3000 h.



## OBIETTIVO C- LINEA C2: IFERC

### CARATTERIZZAZIONE DEL COMPOSITO CERAMICO SiC/SiC IN LITIO-PIOMBO

Completata: la camera in acciaio inossidabile, il sistema di traslazione e rotazione del campione, il sistema di sollevamento della flangia di copertura del forno, l'isolamento termico interno del forno, le resistenze per il riscaldamento del forno, il supporto interno dei crogioli e la barra rotante per il supporto e la movimentazione del campione in prova.

La progettazione ha richiesto una continua interazione con i colleghi Giapponesi. Si sono rese necessarie prove sperimentali condotte nei laboratori di Frascati per verificare la compatibilità dei materiali.



## OBIETTIVO D

### ALTRE ATTIVITÀ INTERNAZIONALI DI ACCOMPAGNAMENTO DA ITER: FAST IL NUOVO ESPERIMENTO SATELLITE EUROPEO.

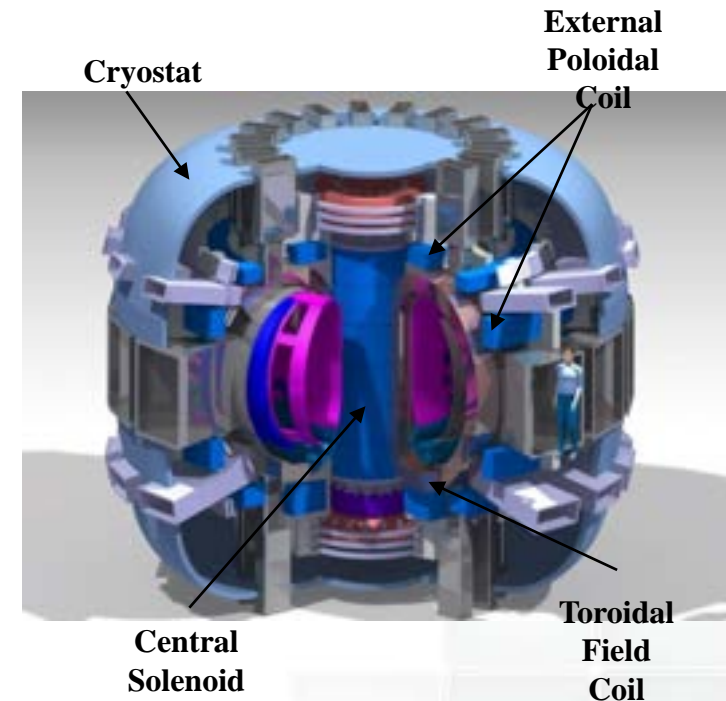
La macchina FAST ha prestazioni intermedie tra quelle di JET e quelle di ITER. FAST opererà a partire dagli ultimi anni della costruzione di ITER con lo scopo di preparare gli scenari di ITER simulando le particelle Alfa. L'uso di soluzioni tecnologiche innovative per i componenti ad alto flusso termico consentono di provare componenti rilevanti per ITER e DEMO.

#### Linea D.1: Calcoli strutturali per il sistema magnetico, la camera da vuoto ed il criostato di FAST.

Analisi preliminare della camera da vuoto in cui è contenuto e del sistema magnetico usato per confinarlo considerando gli scenari di riferimento ed i fenomeni di disruzione rapida.

#### Obiettivo D.2: Analisi sistema di Remote Handling.

L'alto flusso neutronico richiede l'utilizzo del sistema di RH in particolare per il divertore. Una revisione del design, fatta con il gruppo finlandese (VTT) che sta sviluppando il sistema per ITER, ha condotto ad una nuova soluzione, per permettere l'uso di diverse geometrie di divertore. In futuro si validerà con un sistema virtuale 3D la cinematica di sostituzione del divertore.



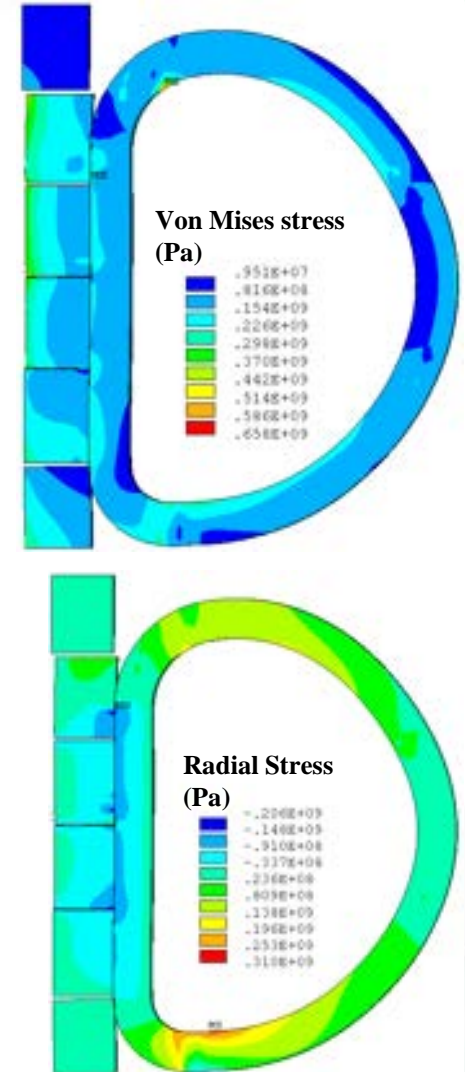
## OBIETTIVO D

Il magnete è composto da 18 bobine, ciascuno costituito da 14 lastre di rame Oxygen Free opportunamente lavorati per realizzare 3 spire in direzione radiale.

Le 42 spire di ciascuna bobina sono saldate corrispondente alla regione più esterna per ottenere un elica continua. L'isolamento del magnete è realizzato con tessuto di vetro impregnato sotto vuoto con resina epossidica.

Le bobine toroidali sono contenute in una struttura in acciaio che le circonda. Due anelli di pressa (superiore ed inferiore) garantiscono la struttura precompressa.

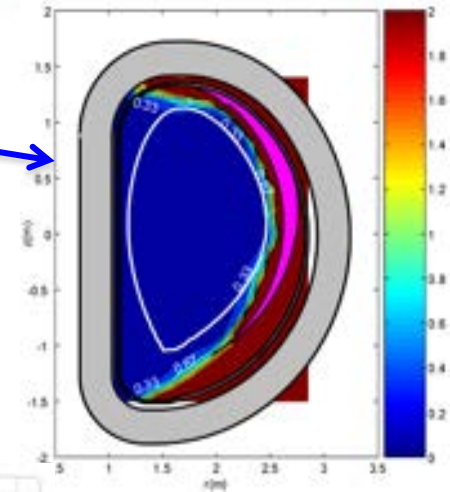
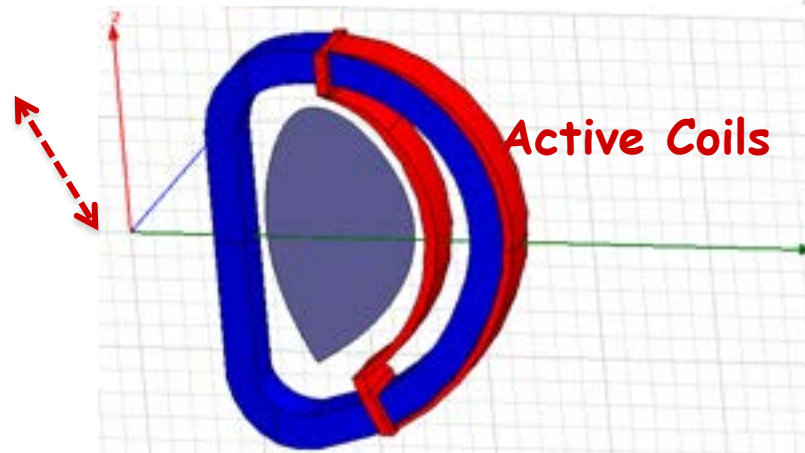
Una analisi delle sollecitazioni (<250 MPa da confrontare con una sollecitazione di snervamento di 380 MPa) mostra che il magnete così come dimensionato è adeguato a sostenere le forze elettromagnetiche.



## OBIETTIVO D

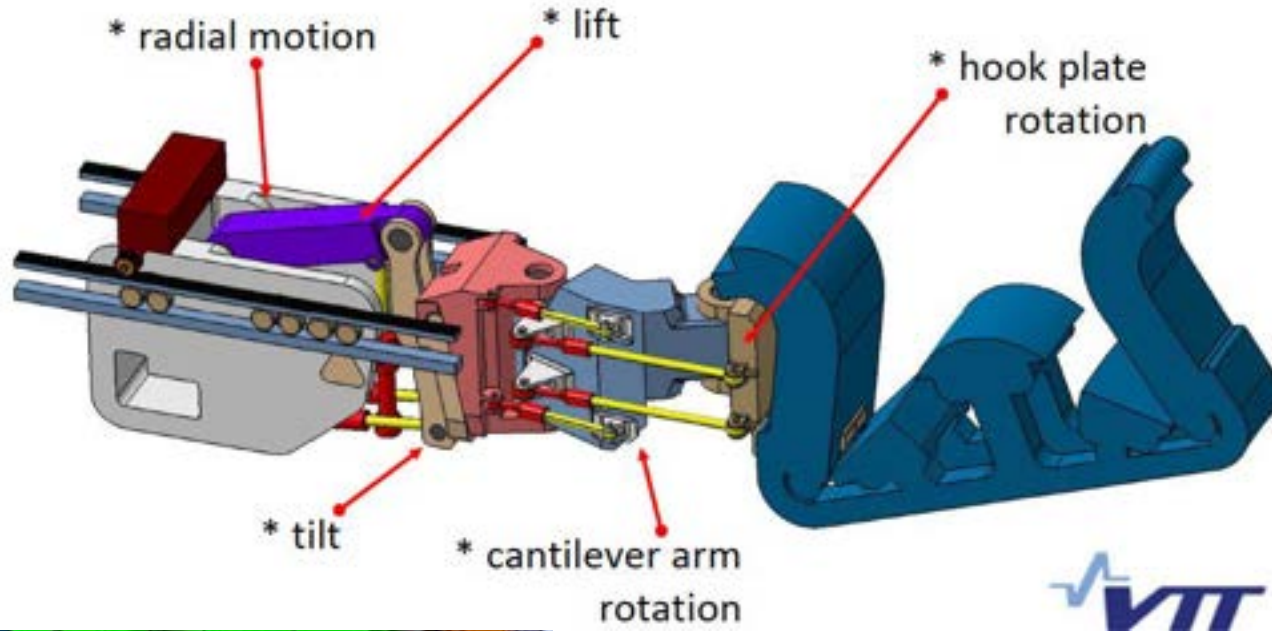
L'aggiunta di inserti ferromagnetici riduce il ripple del campo toroidale sulla separatrice del plasma a valori minori di 0,3%.

La riduzione del ripple a valori molto bassi (<0.3%) può essere ottenuta in modo attivo da una bobina disposta fra camera da vuoto e bobina toroidale.



La presenza di carichi EM relativamente grandi ( $\sim 3.5\text{MN}$  centripeti,  $\sim 1.5\text{MN}$  verticale e una momento torcente  $\sim 0.12\text{MNm}$ ), richiedono una robusta struttura di supporto collegata alla camera da vuoto.

## OBIETTIVO D



E' in fase di sviluppo in collaborazione con il VTT un sistema di manipolazione remota in grado di essere il più flessibile possibile ... e molto altro!

## Considerazioni Conclusive

Le attività del par 2011 si integrano con quelle svolte nell'ambito del programma italiano, e si coordinano con i programmi sviluppati a livello europeo.

Le attività relative alla fusione del PAR 2011 rispettano quanto programmato e promettono il pieno raggiungimento degli obiettivi prefissati.

Le attività di ricerca di questo progetto spaziano dalla superconduttività alle tecnologie dei metalli liquidi, allo sviluppo di materiali ceramici avanzati per utilizzi ad altissime temperature, all'ingegneria, alla robotica. Tutte tecnologie strategiche per il futuro reattore.

La fusione rappresenta per il paese una opportunità unica per sfruttare in piena indipendenza una fonte di energia preziosa per le sue caratteristiche di piena sostenibilità.