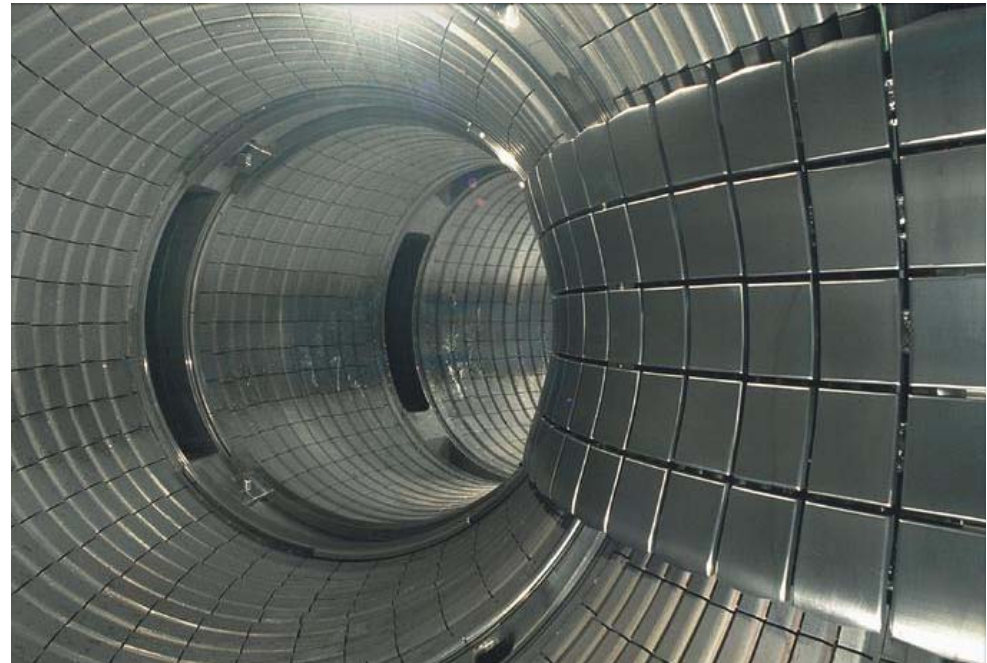
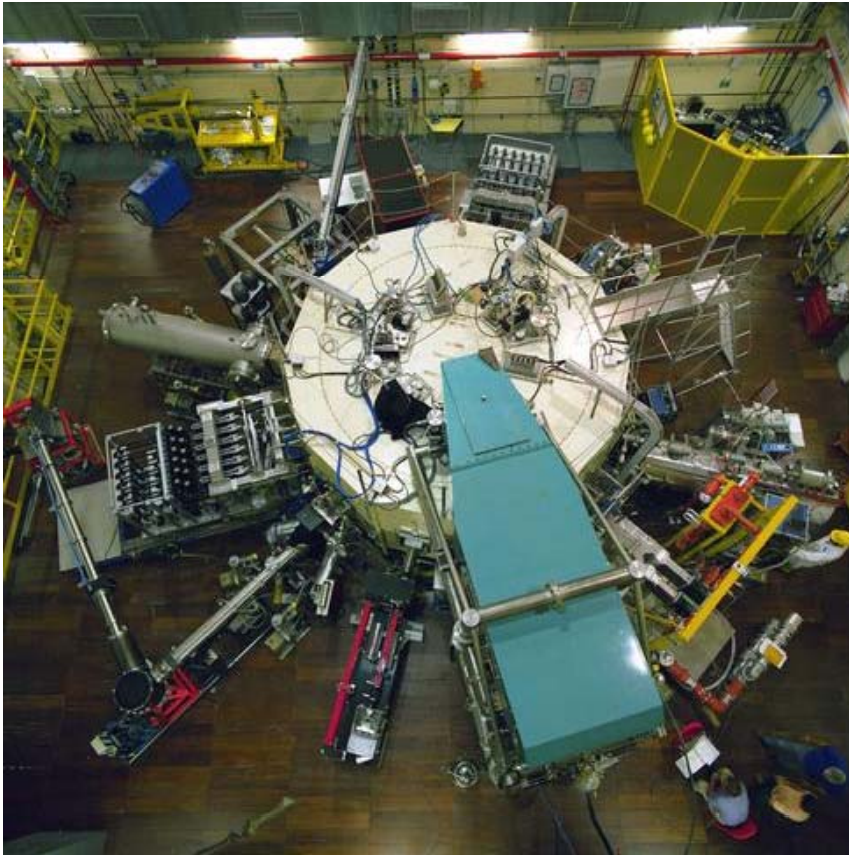
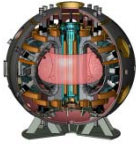


## Frascati Tokamak Upgrade (FTU)



Antonio Cucchiaro per conto della Unità Tecnica Fusione

Ricerca di Sistema Elettrico-Roma-24 Novembre 2011



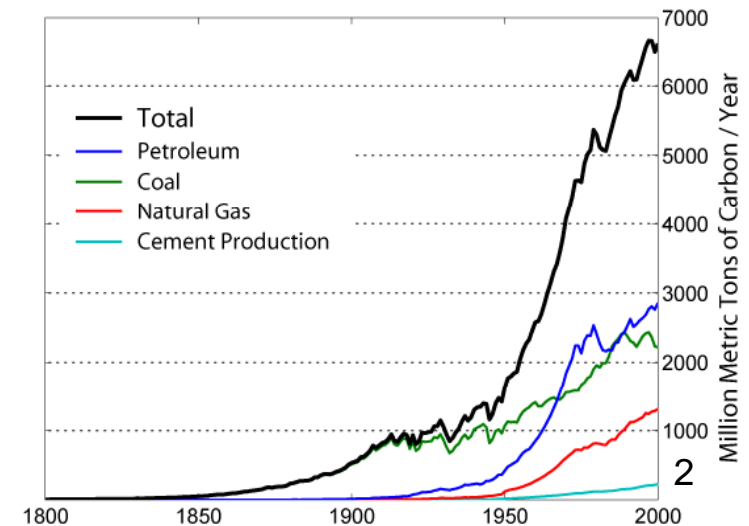
## Nucleare da Fusione

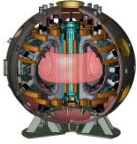
L'energia gioca un ruolo fondamentale nello sviluppo dell'umanità e nel raggiungimento di adeguati livelli di vita.

La combustione è la reazione che avviene tra l'ossigeno dell'aria e altri elementi ed è accompagnata da un forte sviluppo di energia (reazione esotermica).

I reagenti iniziali modificano la loro struttura e composizione originaria per generare i prodotti della reazione coinvolgendo gli elettroni esterni attraverso la formazione o la rottura dei cosiddetti legami chimici.

L'energia di legame degli elettroni in gioco è di qualche eV.





## Nucleare da Fusione

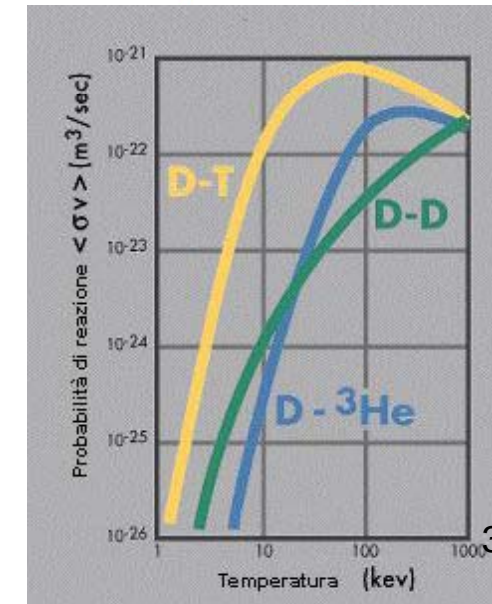
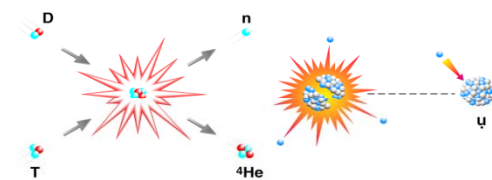
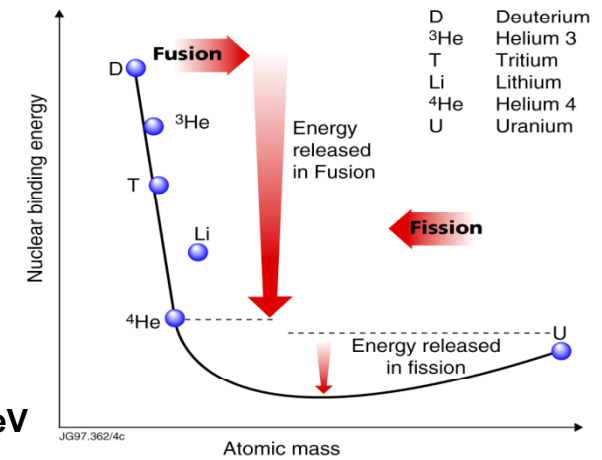
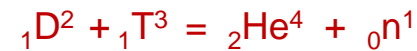
Il nucleo degli atomi è tenuto insieme da forze intense e a breve raggio di azione, le forze nucleari.

Sono possibili quindi combustibili nucleari:

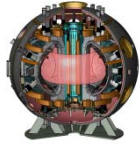
- ✓ la **reazione di fusione** di due nuclei leggeri ( $A < 10$ ), in cui si origina un nucleo più pesante, produce  $\sim 18$  MeV;
- ✓ la **reazione di fissione**, in cui un nucleo molto pesante ( $A > 200$ ) si spezza in due nuclei più leggeri, rilascia  $\sim 200$  MeV.

La reazione di Fusione più favorevole è quella in cui si fonde il deuterio con il trizio per dar luogo ad elio ed un neutrone in un plasma a  $\sim 10$  keV.

3.5 MeV + 14.1 MeV







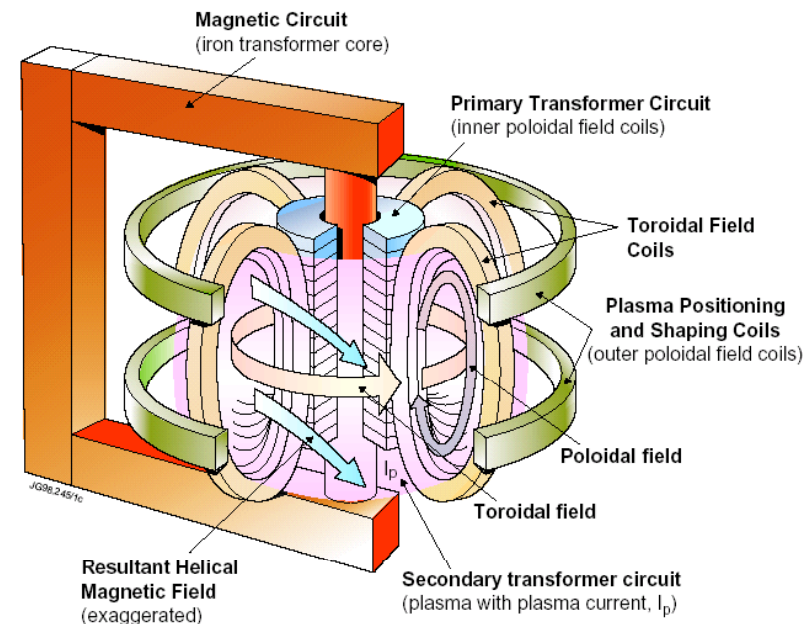
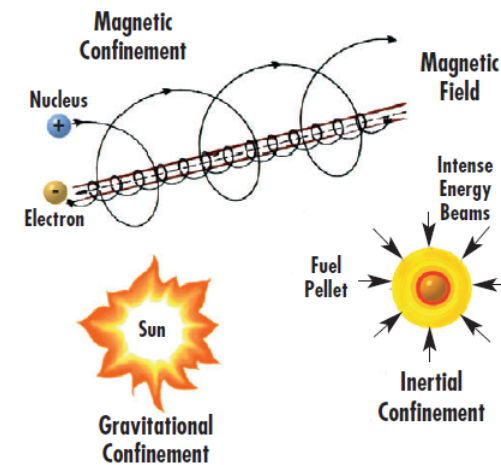
## Nucleare da Fusione

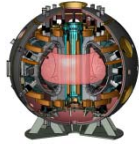
Il plasma (ionizzato) deve essere confinato per un tempo sufficiente per la fusione (Lawson). Nel confinamento magnetico si utilizzano le forze di Lorentz.

Il tokamak è un dispositivo di forma toroidale caratterizzato da una camera da vuoto a ciambella in cui il plasma è confinato mediante un intenso campo magnetico con linee di forza a spirale.

Questa configurazione magnetica è ottenuta mediante la combinazione di un campo magnetico toroidale di confinamento e un campo poloidale di stabilizzazione.

Il plasma è ottenuto per induzione dalle bobine del trasformatore centrale.





## Il Broader Approach

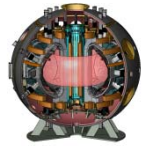
Europa, Cina, Corea del Sud, India, Giappone, Federazione Russa e Stati Uniti hanno riunito i loro sforzi nel progetto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) ITER in costruzione a Cadarache in Francia (Progetto da circa 6.6 B€). L'obiettivo è di avere un reattore entro la prima metà del secolo.

A margine dei negoziati per decidere il sito di ITER, Europa e Giappone hanno ratificato un accordo di collaborazione denominato 'Broader Approach' (BA) destinato ad accelerare lo sviluppo dell'energia da fusione.

L'accordo, che ha un valore di circa 660 M€ da suddividere in parti uguali tra EU e J, include:

- La realizzazione di un esperimento tipo tokamak denominato JT60-SA
- La progettazione e la realizzazione di prototipi per la sorgente intensa di neutroni IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility)
- L'istituzione del centro di studi IFERC (International Fusion Energy Research Center)

Per finanziare l'accordo, Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio hanno offerto dei contributi finanziari per forniture 'in kind'. L'offerta è stata fatta in considerazione del valore industriale e strategico di questo programma.

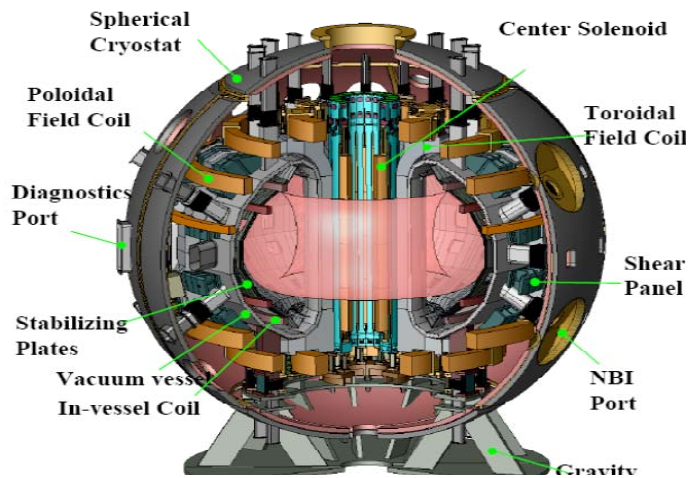


## Il Broader Approach

Finanziamento sulla base di contributi volontari: Francia (180M€); Italia (90M€); Spagna (50M€); Germania (12M€).

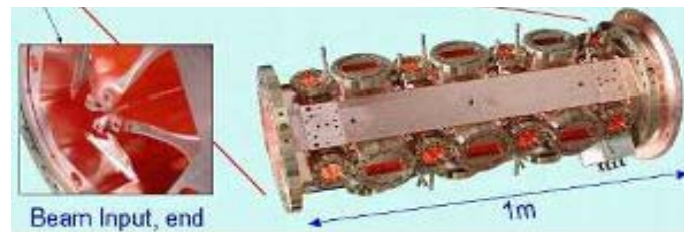
Per l'Italia coinvolti CNR(15M€); INFN(25M€) ENEA (50M€)

L'accordo è regolato da specifici 'Agreement of Collaboration' con l'agenzia europea Fusion for Energy che impegnano i vari paesi a fornire il proprio contributo.



JT60-SA

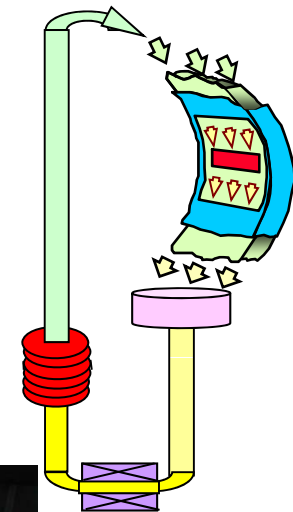
ENEA: Magnete + Parte al. elettriche  
CRFX: parte alimentazioni elettriche



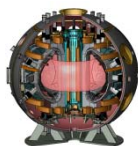
Stadio acceleratore IFMIF  
INFN



Materiali Ceramici Compositi  
ENEA con FN



Target IFMIF  
ENEA



## Le Attività ENEA nel PAR 2011

Progetto 1.3.2 "Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER"  
Obiettivi e relativi preventivi economici

Sigla	Denominazione obiettivi	Data di conseguimento	Ore di personale ENEA	SPESE (k€)					TOTALE	
				Personale (a)	Attrezzature e strumentazioni (b)	Correnti (c)	Collaborazioni esterne (d)	Collaborazioni universitarie (e)		
<b>A. Macchina JT60SA</b>										
A1	Acquisizione dei materiali costituenti la bobina, qualifica dei processi speciali con lo sviluppo di mock-up e rototipi a piena scala, realizzazione di 2 doppi Pancake dell'avvolgimento della bobina completi di collaudo finale	Set 2012	2860	200	3100	0	0	0	3300	
A2	Progettazione strutture di contenimento bobine toroidali JT60SA	Set 2012	2860	200	1873	0	0	0	2073	
A3	Progettazione degli 'switch network unit	Set 2012	1430	100	700	0	0	0	800	
A4	Progettazione alimentatori dei magneti poloidali e toroidali di JT60SA	Set 2012	1430	100	1475	0	0	0	1575	
<b>B. Progettazione e qualifica ingegneristica del target IFMIF</b>										
B1	Forniture ed implementazioni comuni per progettazione, costruzione ed operazioni riguardanti l'impianto a litio EVEDA Loop per IFMIF.	Set 2012	400	28	15	7	300	0	350	
B2	Forniture ed implementazioni comuni per sperimentazioni di corrosione/erosione per IFMIF.	Set 2012	400	28	15	3	20	0	66	
B3	Forniture ed implementazioni comuni per la qualifica sperimentale del sistema di purificazione litio per IFMIF.	Set 2012	300	21	5	2		0	28	
B4	Forniture ed implementazioni comuni per sviluppo e qualifica di sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF.	Set 2012	600	42	90	5	20	0	157	
B5	Forniture ed implementazioni comuni per progettazione completa di target a litio per IFMIF e di dispositivo di purificazione litio dall'impurezza azoto.	Set 2012	700	49	0	5	50	0	104	
<b>C. Attività IFERC (International Fusion Energy Research Center)</b>										
C1	Caratterizzazione proprietà fisiche composito ceramico SiC/SiC	Set 2012	600	42	15	0	200	0	257	
C2	Caratterizzazione del composito ceramico SiC/SiC in litio liquido.	Set 2012	600	42	15	0	0	0	57	
<b>D. Satellite (FAST)</b>										
D1	Calcoli strutturali per il sistema magnetico, la camera da vuoto ed il criostato di FAST e analisi del sistema di raffreddamento	Set. 2012	715	50	0	0	80	0	130	
D2	Analisi del sistema di Remote Handling	Set. 2012	540	38	0	0	65	0	103	
<b>TOTALE</b>			<b>13435</b>	<b>940</b>	<b>7303</b>	<b>22</b>	<b>735</b>	<b>0</b>	<b>9000</b>	

(a) include il costo del personale, sia dipendente che non dipendente, e le spese generali supplementari

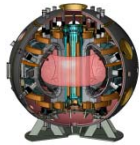
(b) include le attrezzature e le strumentazioni inventariabili

(c) include i beni di consumo, le spese di missione e le altre spese correnti

(d) include le prestazioni commissionate all'esterno, per servizi tecnici o per attività di ricerca (di cui 200 € per attività della partecipata FN)

(e) include le collaborazioni con gli istituti universitari nazionali





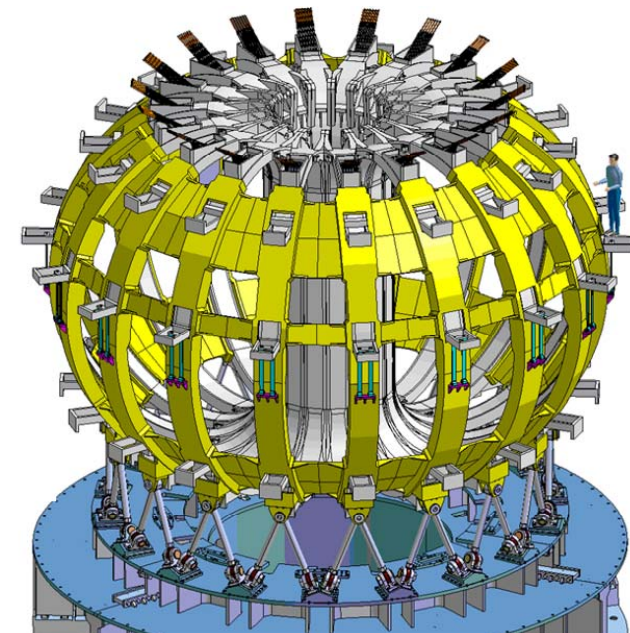
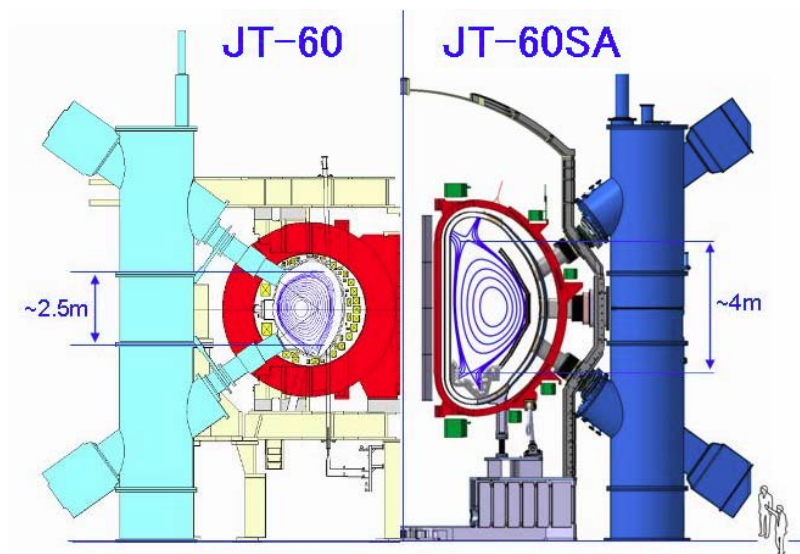
## Il Broader Approach

L'ENEA è impegnato nella Costruzione, Collaudo e Spedizione a Naka del Magnete Toroidale della Macchina Tokamak JT-60SA e di parte dei sistemi di alimentazione elettrica. La progettazione neutronica, termica, strutturale, elettrica è stata completata.

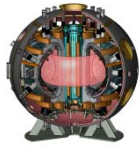
JT-60SA è un Tokamak Superconduttore che sarà realizzato nella Torus Hall che attualmente ospita il Tokamak JT-60U.

L'ENEA è responsabile di:

- Nove delle 18 bobine superconduttrici di NbTi che costituiscono l'intero magnete;
- Le casse di contenimento per tutte le 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico;
- Le alimentazioni elettriche per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente con relativi interruttori e trasformatori più quattro sistemi di interruzione della corrente continua .



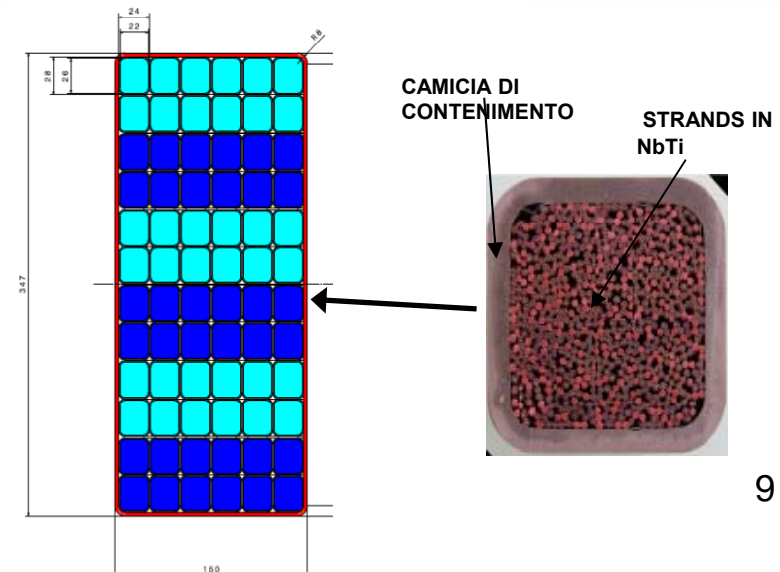
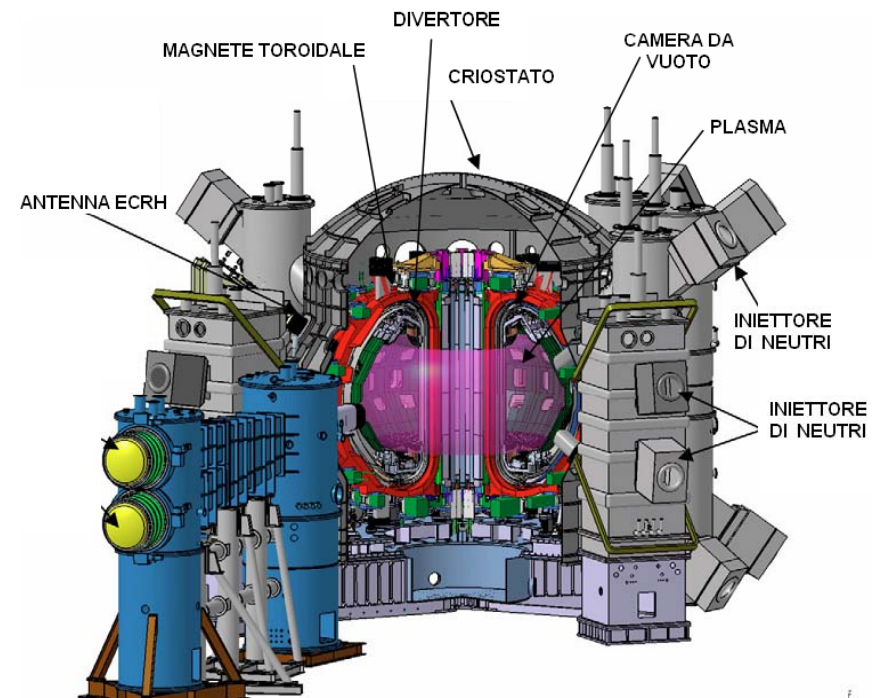


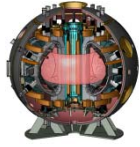


## Magnete Toroidale JT-60SA (A1; A2)

I 18 magneti superconduttori (NbTi) di campo toroidale di JT-60SA sono 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.

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.

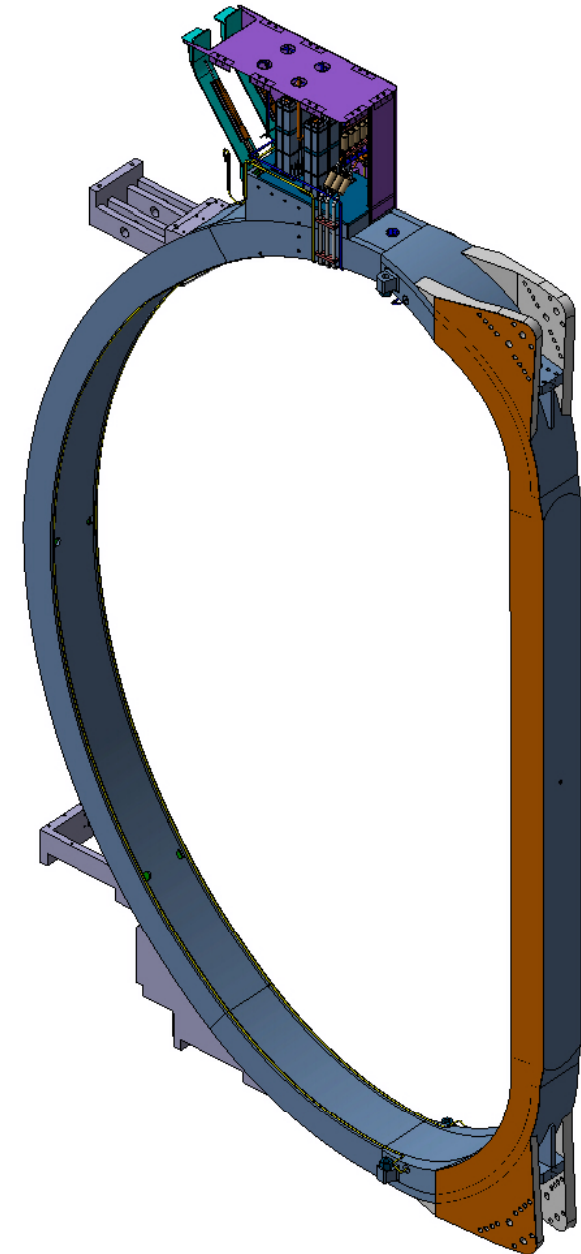
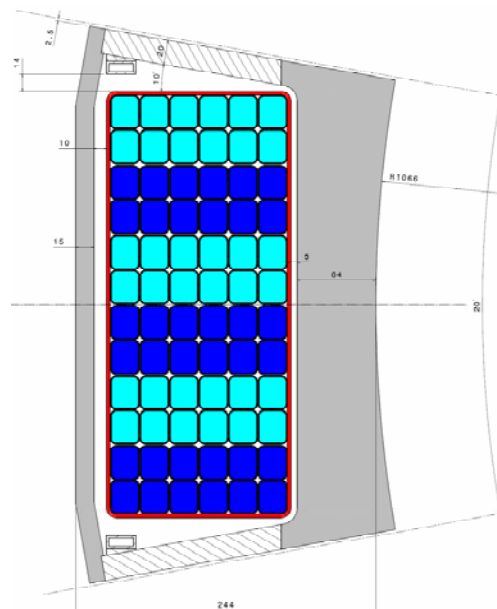
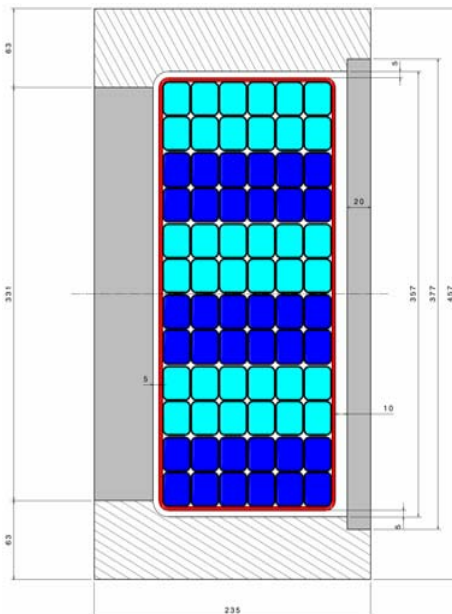


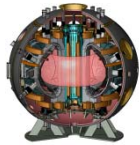


## Magnete Toroidale JT-60SA (A1; A2)

L'avvolgimento della bobina è contenuto in una cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico.

La prima delle bobine sarà pronta entro la metà del 2014 e, dopo il superamento delle prove criogeniche, sarà spedita a Naka (Giappone), mentre il completamento dell'ultima è previsto per la metà del 2016.



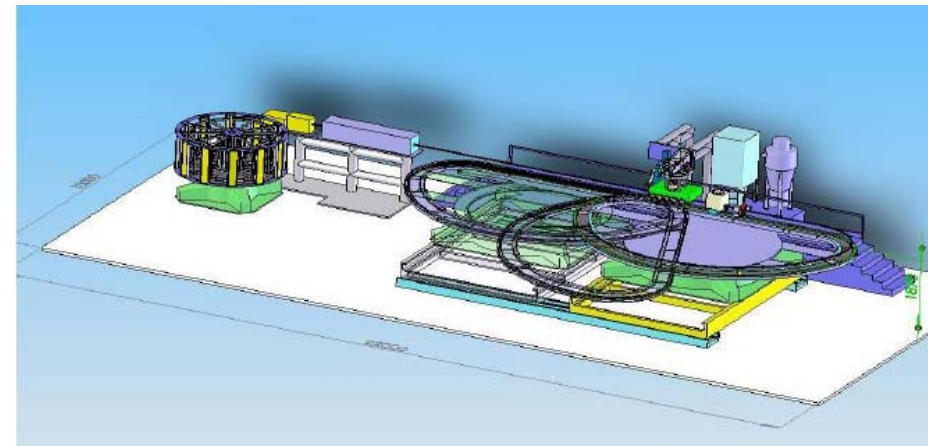


## Magnete Toroidale JT-60SA (A1; A2)

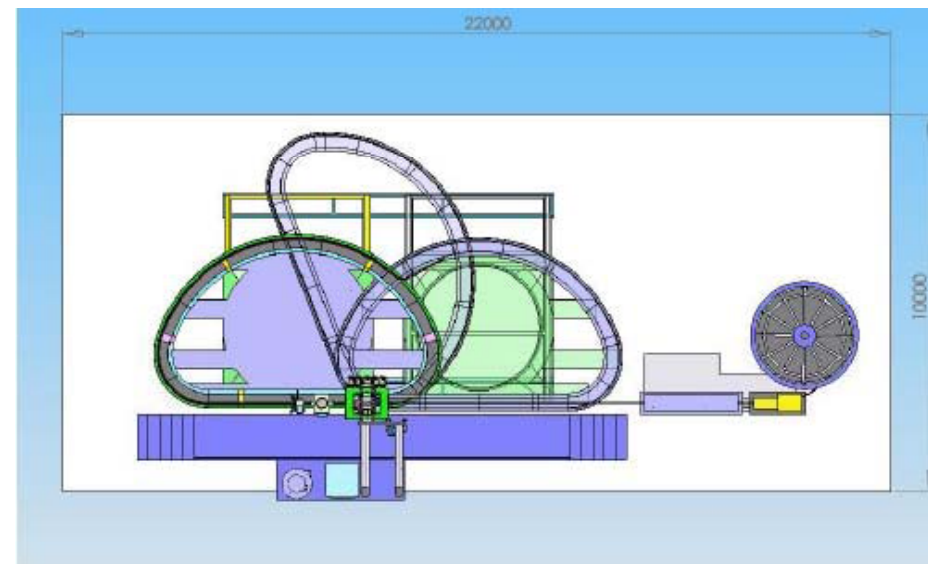
Sono in corso di realizzazione tutte le attrezzature di avvolgimento dei doppi pancake, di composizione della bobina, dell'applicazione dell'isolamento contromassa ed impregnazione.

I componenti base della linea sono:

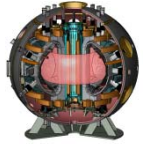
- 1) aspo svolgitore
- 2) raddrizzatrice del superconduttore
- 3) impianto di pulizia del conduttore
- 4) unità di calandratura del conduttore
- 5) impianto di sabbiatura del conduttore calandrato
- 6) nastratrice del conduttore calandrato
- 7) forma di avvolgimento comprensiva di riferimenti esterni ed interni
- 8) tavola roto-traslante per sostegno e rotazione della forma di avvolgimento sincronizzata con l'avanzamento del conduttore calandrato.



Linea di avvolgimento



Movimentazione tavola di avvolgimento

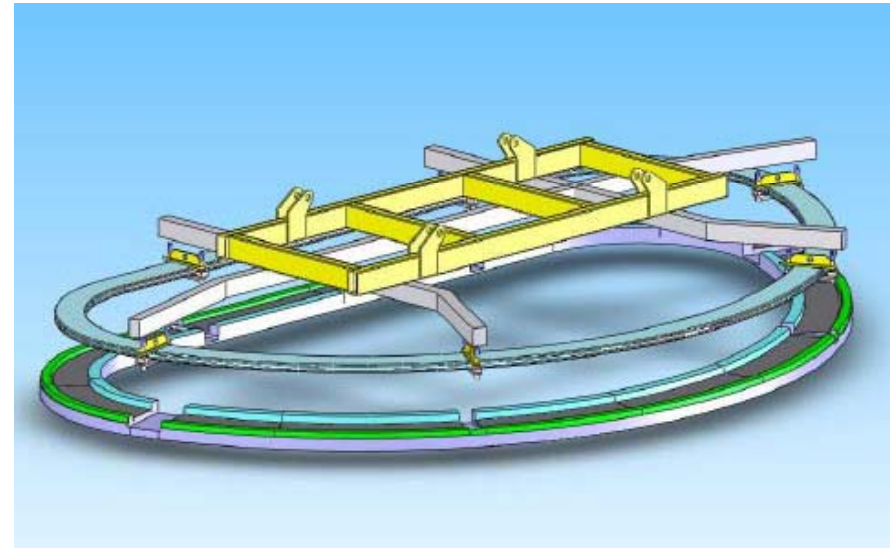


## Magnete Toroidale JT-60SA (A1; A2)

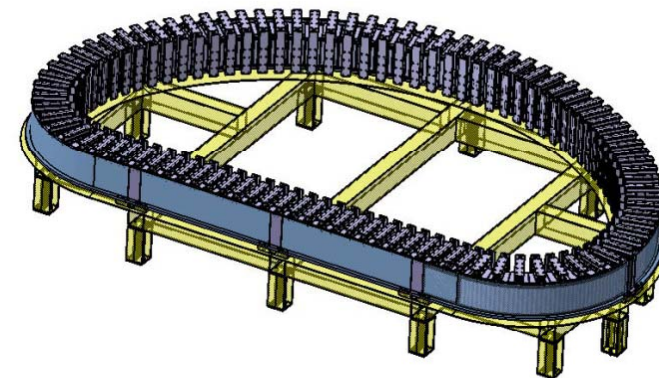
Il DP (o la bobina), agganciato all'apposito bilancino, viene calato sopra i supporti dell'attrezzatura per la nastratura di contromassa.

Terminata la nastratura, il DP può essere riagganciato al bilancino di trasferimento per completare l'impilamento dei 6 DP e completare il contromassa della bobina.

La bobina viene quindi racchiusa nella camera di contenimento resina, realizzata da settori di lamierino sottile di acciaio e rinforzata da staffe per raggiungere le condizioni richieste per l'impregnazione.

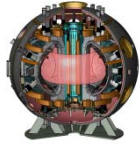


Rimozione DP dalla forma di avvolgimento



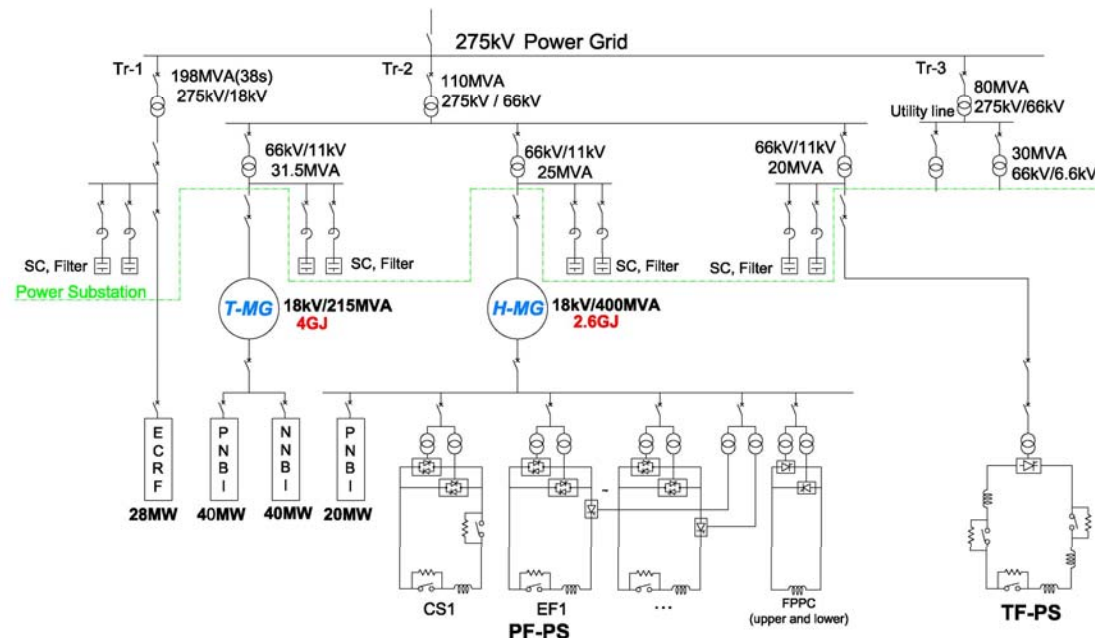
Attrezzatura di impregnazione<sup>12</sup>



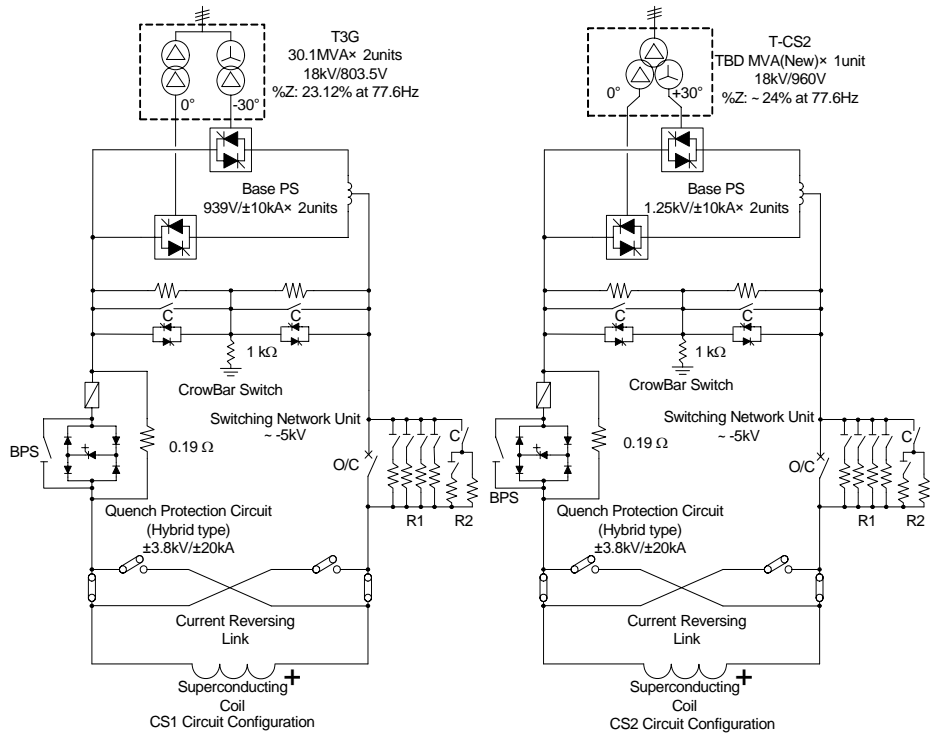
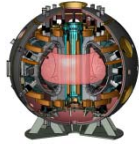


## Alimentazione Elettrica JT-60SA (A3; A4)

Le alimentazioni elettriche del sistema magnetico di JT60SA, 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 .  
Richieste d'offerta Aprile 2012.

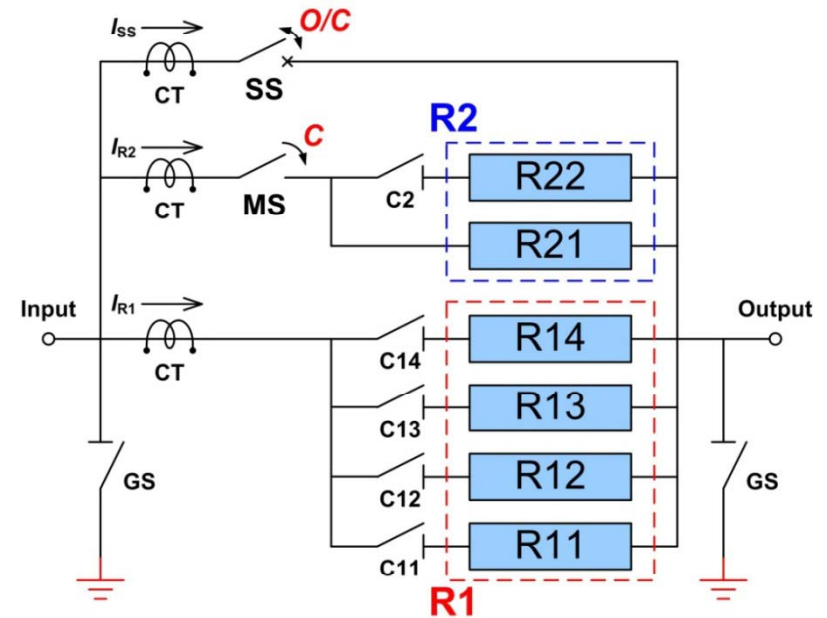


Schema di alimentazione elettrica.

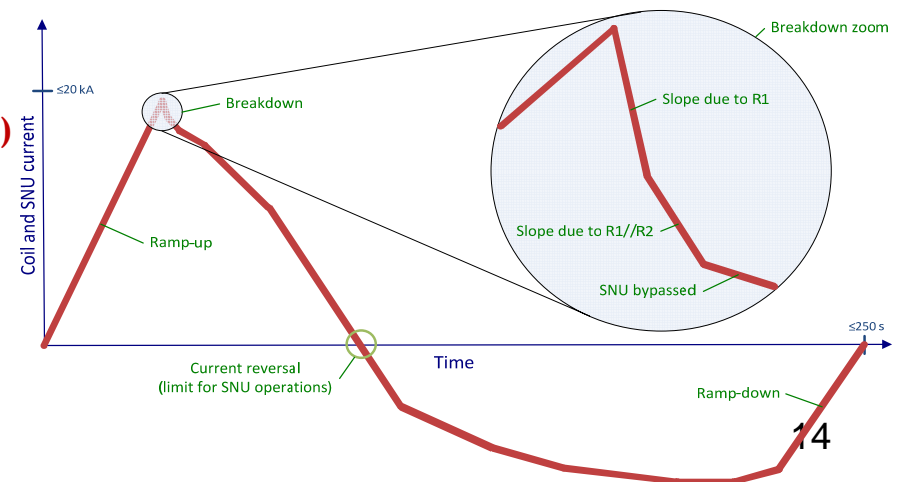


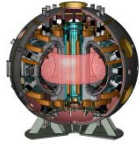
**Schema elettrico degli alimentatori CS1 e CS2 (4 sets)**

CS1, CS2, CS3, CS4, EF1 e EF6 - 6 sets da ENEA  
 FPPCC (Fast Plasma Position Control Coils) - 2 sets da ENEA



**Schema elettrico delle SNU (4 sets)**



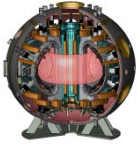


## Contributo ENEA alle attività IFMIF

### L'ENEA ha la responsabilità delle seguenti linee di R&D

#### B. Progettazione e qualifica Ingegneristica del Target di IFMIF

B1	Fornitura ed implementazioni comuni per la progettazione, costruzione ed operazioni per l'impianto a litio ELITE (Oarai- Giappone)
B2	Fornitura ed implementazioni comuni per sperimentazioni di corrosione ed erosione per IFMIF
B3	Fornitura ed implementazioni comuni per la qualifica del sistema di purificazione del litio per IFMIF
B4	Forniture ed implementazioni comuni per lo sviluppo e la qualifica del sistema di manipolazione remotizzata del target di IFMIF
B5	Forniture ed implementazioni comuni per la progettazione completa del target a litio per IFMIF.



## Contributo ENEA alle attività IFMIF

### B1: Partecipazione ENEA alle attività ELITE –OARAI (GP)

#### Risultati PAR 2010:

- Fornitura del sistema di misura online per la determinazione della concentrazione di N in Li e del sistema per il rilevamento della cavitazione ( **I componenti sono in attesa di essere trasferiti in Giappone: 20 Novembre 2011**)



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

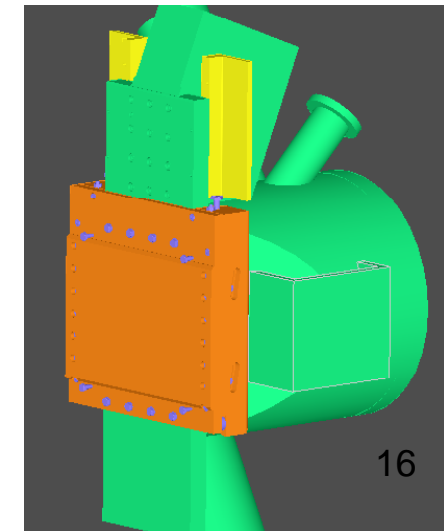


Misuratore di impurezza del litio (concentrazione N in Li) Resistivity Meter

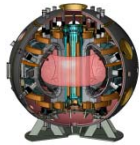


Armadio di controllo per il misuratore di impurezza del litio mediante rilevamento della resistività elettrica

- Fornitura del prototipo della backplate per impianto ELITE ( **progettazione di dettaglio completata**)





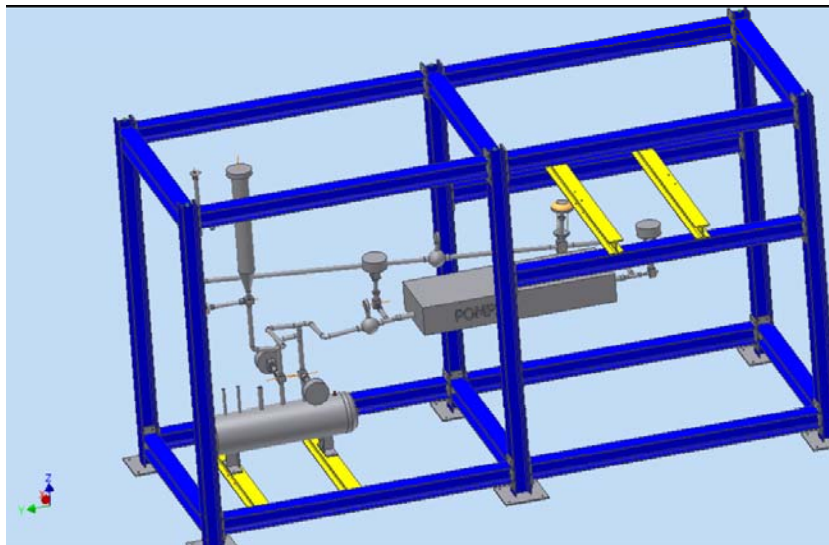


## Contributo ENEA alle attività IFMIF

### B2-B3: Sperimentazione Corrosione Erosione e Qualifica Sistema di Purificazione Litio per IFMIF

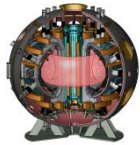
#### Risultati PAR 2010:

- In Aprile 2010, dopo aver effettuato alcune sperimentazioni con l'impianto LIFUS 3, che ne hanno evidenziato i punti deboli, è stato deciso di rimpiazzare tale impianto con una nuova infrastruttura sperimentale, maggiormente adatta alle finalità di IFMIF. In particolare la nuova infrastruttura aumenterà l'efficienza di purificazione del Litio e sarà realizzata con i fondi che erano inizialmente destinati a riadattare LIFUS 3 .
- Un nuovo impianto a Litio (LiFus VI) è stato progettato e tutti i componenti per la sua realizzazione sono stati acquistati.



- 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



## Contributo ENEA alle attività IFMIF

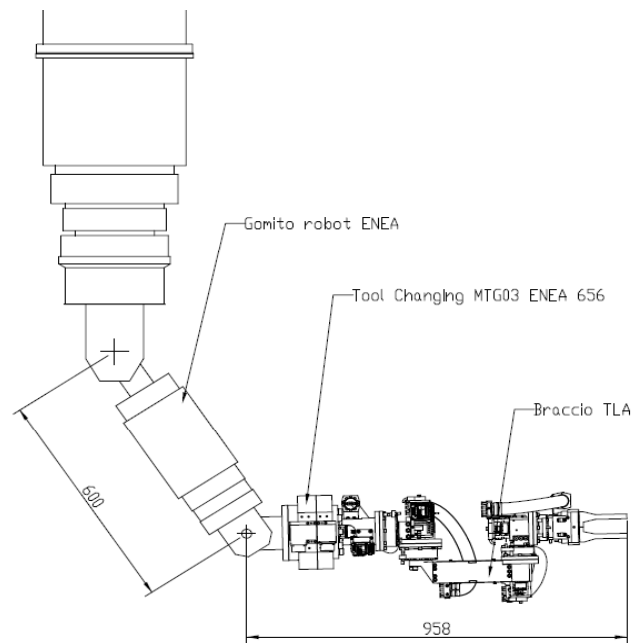
### B4: Sviluppo Sistema Manipolazione Remotizzata per il Target IFMIF

**Risultati PAR 2010:**

- sviluppo dei sistemi di manipolazione
- prove di tecnologia
- aggiornamento della DRP

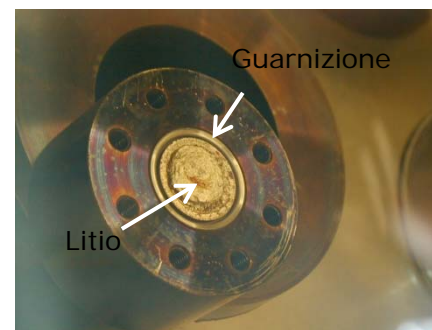
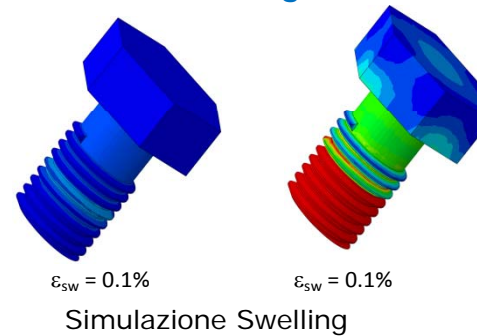
**Le attività sono in via di ultimazione ( Novembre 2011).**

**Sistemi di manipolazione**



Nuovo braccio robotico ( **installazione prevista 20/11/11** )

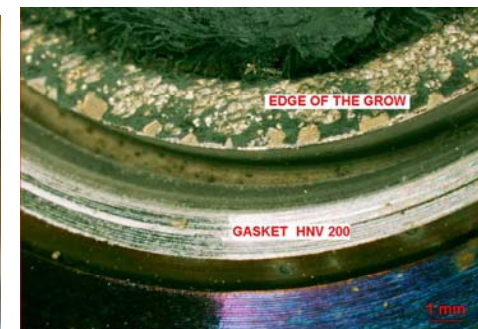
**Prove di tecnologia**



Qualifica Guarnizione

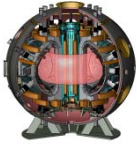
**Aggiornamento della DRP**

- integrazione braccio robotico
- Integrazione nuova matrice per gestione telecamere

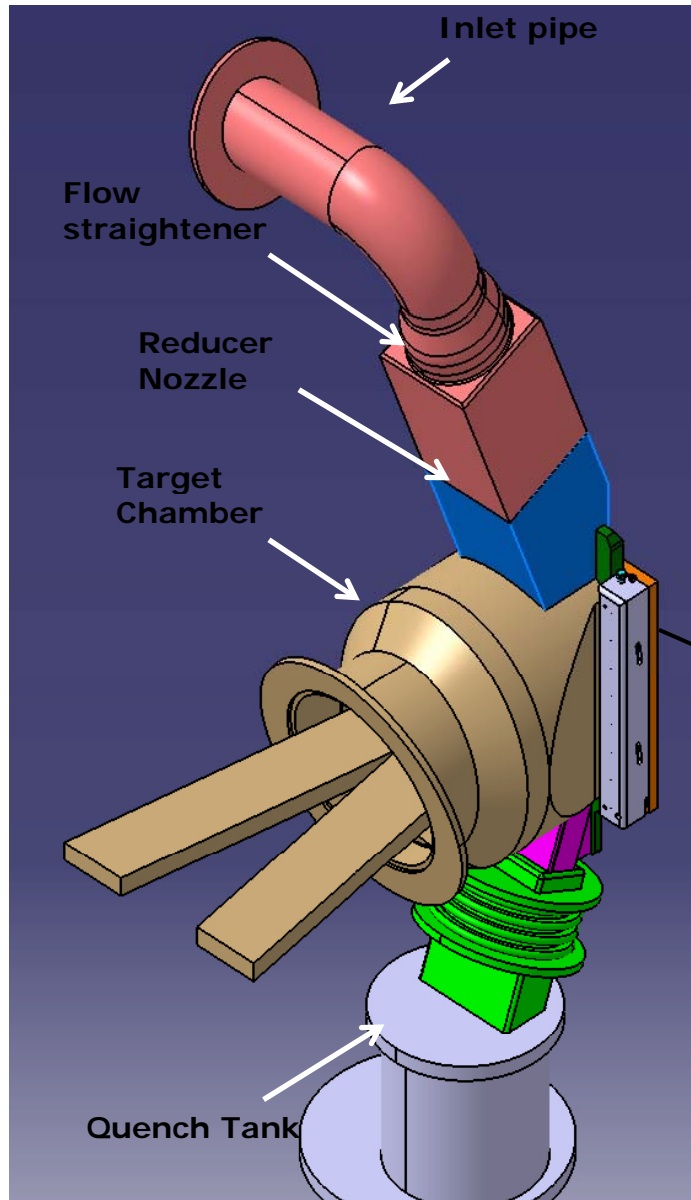


PM 11809 [ 1 A ] Test Rig 1 post prova in litio

Immagine Stereoscopica guarnizione



## B5: Progettazione completa del Target a Li per IFMIF

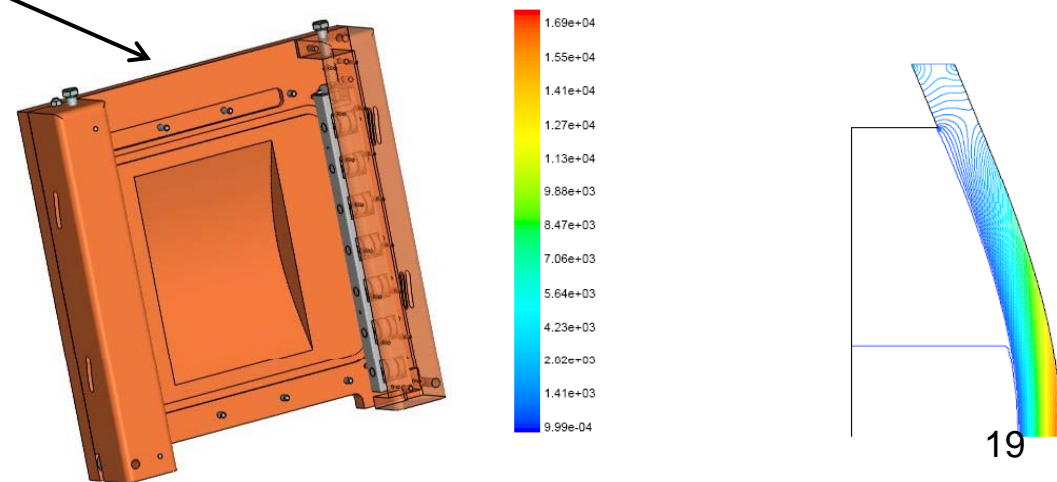


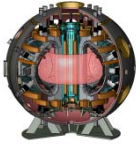
### Risultati PAR 2010

Questa attività comprende le attività progettuali del target smontabile sviluppato in ENEA:

- progettazione meccanica
- analisi termo idraulica
- analisi neutronica
- analisi termo meccanica
- stima del tempo di vita del TA

**Stato attività : il progetto preliminare è stato completato.**

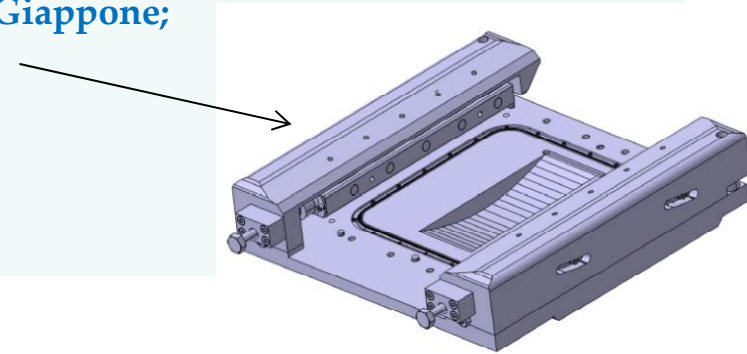




## Attività Previste PAR 2011

### B1: Partecipazione ENEA alle attività ELITE –OARAI (JP)

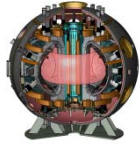
- Installazione e commissioning dei dispositivi di cavitazione e del Resistivity meter;
- Partecipazione alla campagna sperimentale dell'ELITE in Giappone;
- Realizzazione della backplate ( concetto ENEA)  
da installare in Giappone



### B2-B3: Sperimentazione Corrosione Erosione e Qualifica Sistema di Purificazione Litio per IFMIF

- Completamento assemblaggio impianto LiFus VI e commissioning;
- Prove sperimentali di corrosione/erosione( durata prima prova 2000 h) e misura efficienza sistema di purificazione
- analisi dei campioni per determinazione del tasso di corrosione/erosione
- Valutazione dell'efficienza del nuovo sistema di purificazione





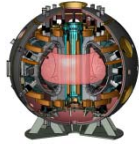
## Attività Previste PAR 2011

### **B5: Sviluppo Sistema Manipolazione Remotizzata per il Target di IFMIF**

- **realizzazione prototipo in scale reale del target di IFMIF per validazione procedure di manutenzione remotizzata**
- **sviluppo delle procedure di manutenzione remotizzata**
- **sviluppo software per la gestione del nuovo braccio robotico e del sistema gestione telecamere**
- **prove preliminari di manutenzione remotizzata**

### **B5: Progettazione completa del Target a Li per IFMIF**

- **Continuazione con le attività di progettazione del target di IFMIF ( concetto ENEA)**
- **Progettazione concettuale dei dispositivi per la manutenzione del target di IFMIF**



## Contributo ENEA alle attività IFERC

### C1 - Caratterizzazione delle proprietà fisiche composito ceramico Si/C

La grandezza che determina il trasferimento di calore è la diffusività termica data dall'equazione seguente:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}$$

$$\alpha = \text{thermal diffusivity } [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$\lambda = \text{thermal conductivity } [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$C_p = \text{specific heat } [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\rho = \text{density } [kg \cdot m^{-3}]$$

La conducibilità termica è stata valutata indirettamente mediante la misura delle 3 grandezze: diffusività termica, calore specifico e densità.

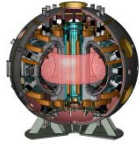
Abbiamo realizzato dei campioni SiC<sub>f</sub>/SiC per la misura di diffusività termica, calore specifico e densità usando la tecnologia CVI (chemical Vapor Infiltration) con disposizione delle fibre in 2D e 3D.



2D Textile Architecture



3D Textile Architecture

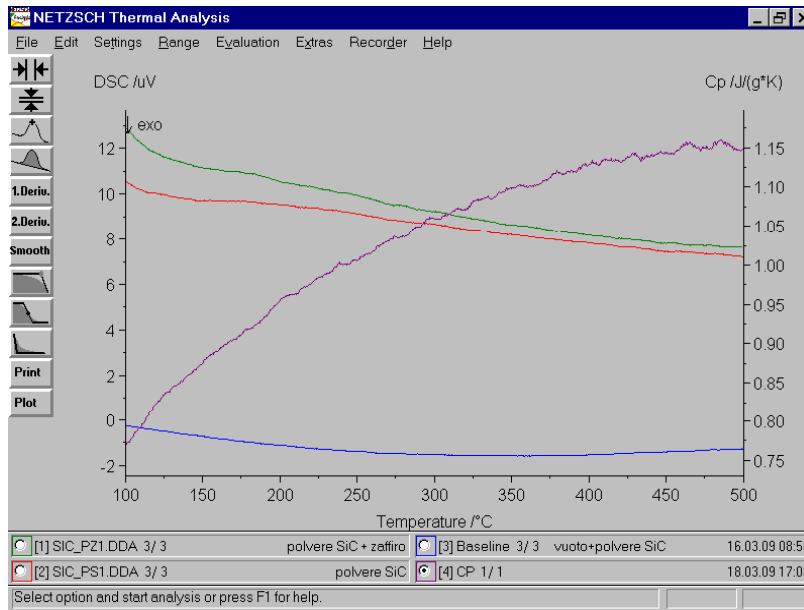


## Contributo ENEA alle attività IFERC

### Thermal Diffusivity

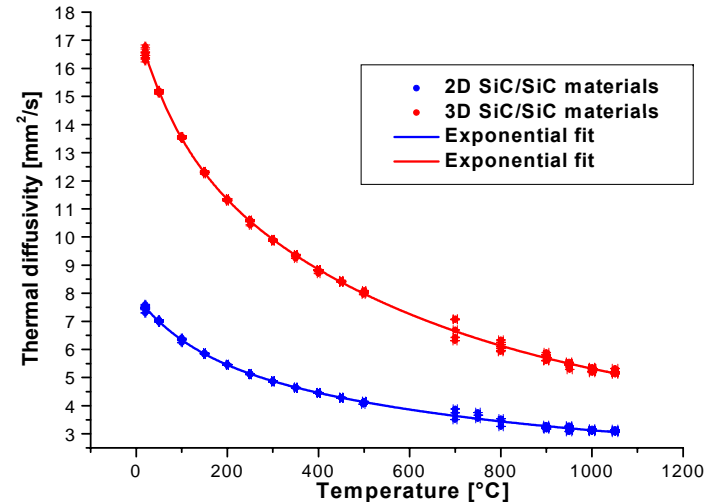
The thermal diffusivities of the 3D textile architecture is around the double of that 2D in the whole arc of the temperatures.

### Specific Heat

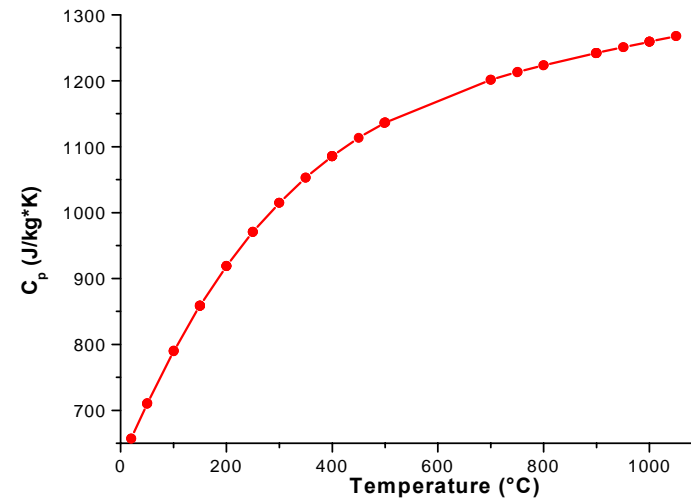


Specific heat (violet curve) vs. temperature with the ENEA DTA

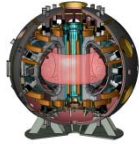
Thermal diffusivity vs. temperature for SiC/SiC materials



Specific heat of silicon carbide material



With our apparatus was possible to perform coherent measurement up to 500 °C.



## Density

## Contributo ENEA alle attività IFERC

The estimated density of the material was calculated from the weight and the volume of the samples and was  $2.53 \text{ g/cm}^3$  for 2D and  $2.63 \text{ g/cm}^3$  for 3D textile architecture.

Density has been corrected then keeping in consideration of the coefficient of volumetric expansion, the influence of the temperature is extremely small however appraisable in an error of the 0.2%.

## Thermal Conductivity

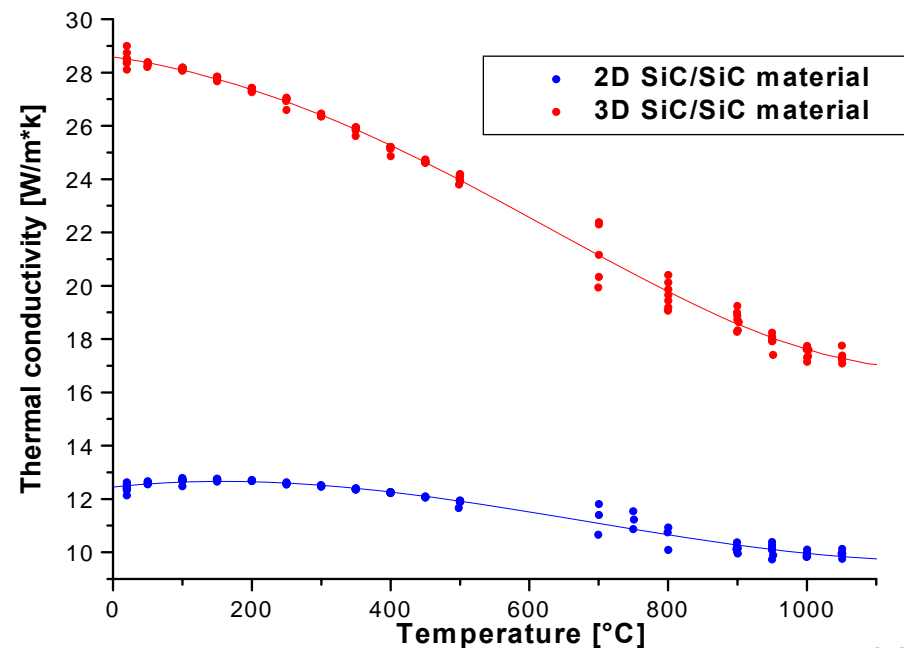
The thermal conductivity ( $\lambda$ ) is calculated from the measured thermal diffusivity ( $\alpha$ ), the measured specific heat ( $C_p$ ) and estimated density ( $\rho$ ) through the equation:

$$\lambda = \alpha \cdot C_p \cdot \rho$$

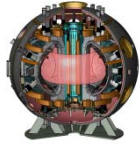
The thermal conductivity of the 3D textile architecture is around the double of that 2D in the whole arc of the temperatures.

The increase of the thermal conductivity in the architecture 3D in comparison to that 2D is imputable to two factors, the presence in the configuration 3D of fibers along the transversal direction and also from a smaller porosity in the configuration 3D.

Thermal conductivity vs. temperature for SiC/SiC materials







## Contributo ENEA alle attività IFERC

### C.2- Caratterizzazione del composito ceramico SiC/SiC in litio-piombo

#### Programma delle attività sperimentali

The erosion-corrosion of SiC and SiC/SiC (including fibres and interphase) in liquid metal (Pb-17Li) will be investigated

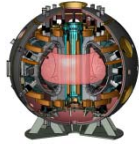
T up to 1100 ° C

relative velocity up to 1 m/s

duration 3000 h

Chemical analysis of Pb-17Li before and after exposure and post exposure examination of samples will be performed

The experiments will be carried out with a SiC or SiC/SiC rotating specimen target

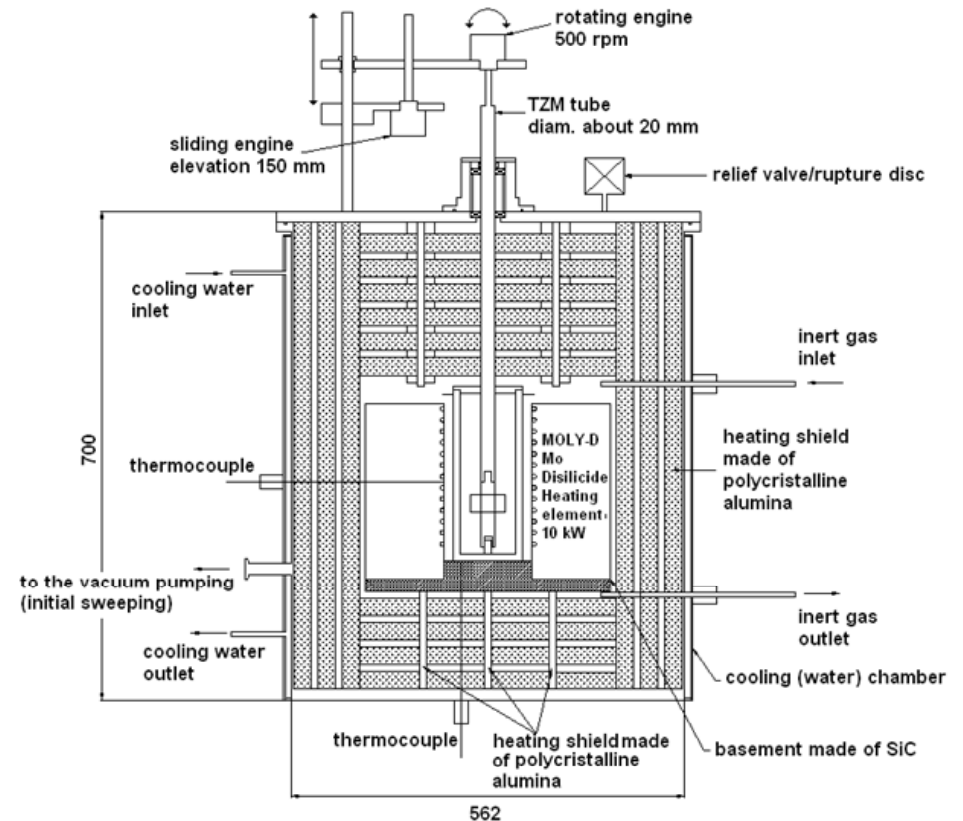


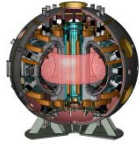
## Contributo ENEA alle attività IFERC

### Completamento del progetto

#### Main characteristics:

- operation under inert gas atmosphere (He or Ar) in order to avoid Li evaporation
- water cooled chamber made of stainless steel
- heating system by MOLY-D
- heating shielding made of polycrystalline alumina
- high density SiC crucible diam. 120 x height 250 mm
- rotary engine 500 rpm
- sliding engine elevation 150 mm
- SiC/SiC specimen sizes (dia. = 50 mm, H=25 mm)
- Rotary speed 500 rpm (i.e., about 1 m/s)
- SiC crucible sizes (ext. dia. = 120 mm, H=250 mm)
- relief valve (rupture disc)





## Contributo ENEA alle attività IFERC

2010 - 2011

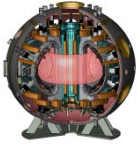
Test equipment construction:

- sliding and rotating engines,
- samples holder,
- insulation system.

2009

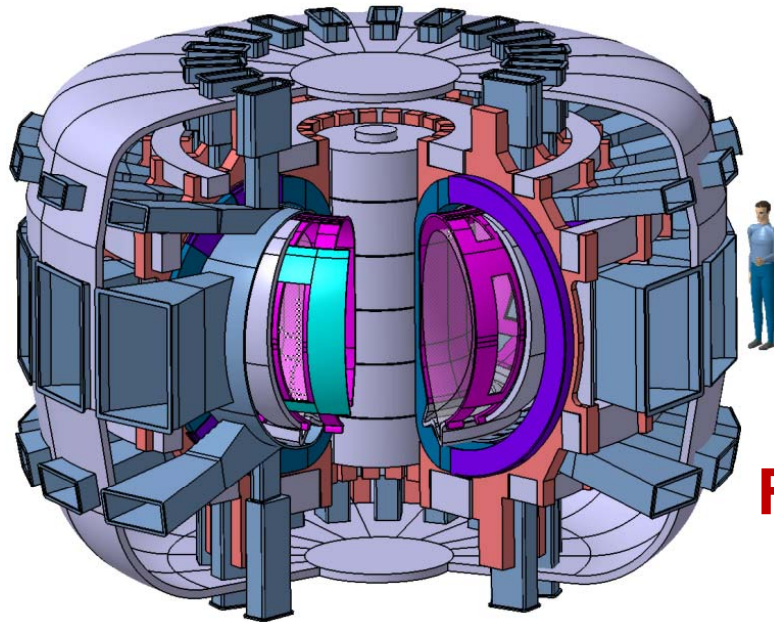
Construction of the oven chamber and support frame





## FAST- an ITER & DEMO Satellite experiment

### FAST main parameters



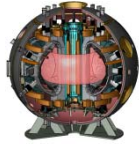
**FAST**

**FAST** operates **routinely** at **ITER** and **DEMO** relevant conditions.

**Today machines** can address **only separately** these conditions

**FAST** was recently included in the **Italian Road Map for Research Infrastructure**.

Plasma Current (MA)	$\leq 8$
$B_T$ (T)	$\leq 8.5$
Major Radius (m)	1.82
Minor Radius (m)	0.64
Elongation $k_{95}$	1.7
Triangularity $\delta_{95}$	0.4
Safety Factor $q_{95}$	2.7-5
$V_p$ (m <sup>3</sup> )	23
$\langle n \rangle$ (m <sup>-3</sup> )	$\leq 5.5 \times 10^{20}$
Pulse length (s)	13 -> 170
H&CD power (MW)	40
ICRH	30 (20)
ECRH	4
LH	6
NNBI	0 (10)
P/R (MW/m)	22



## Considerazioni Conclusive

- Le attività del BA complementano quelle svolte nell'ambito del programma italiano, parte integrante di quello europeo, che vede impegnati 600 tra ricercatori e tecnici in tutta Italia
- Le attività relative alla fusione del PAR 2011 sono in linea con le strategie del paese per lo sviluppo dell'energia da fusione.
- Si tratta di attività che 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.