

ENEA

AGENZIA NAZIONALE
PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA
E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

ATTIVITÀ DI FISICA DELLA FUSIONE COMPLEMENTARI A ITER



PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DELLA MACCHINA JT-60SA

Antonio Cucchiaro

ENEA/UTFUS-IBA

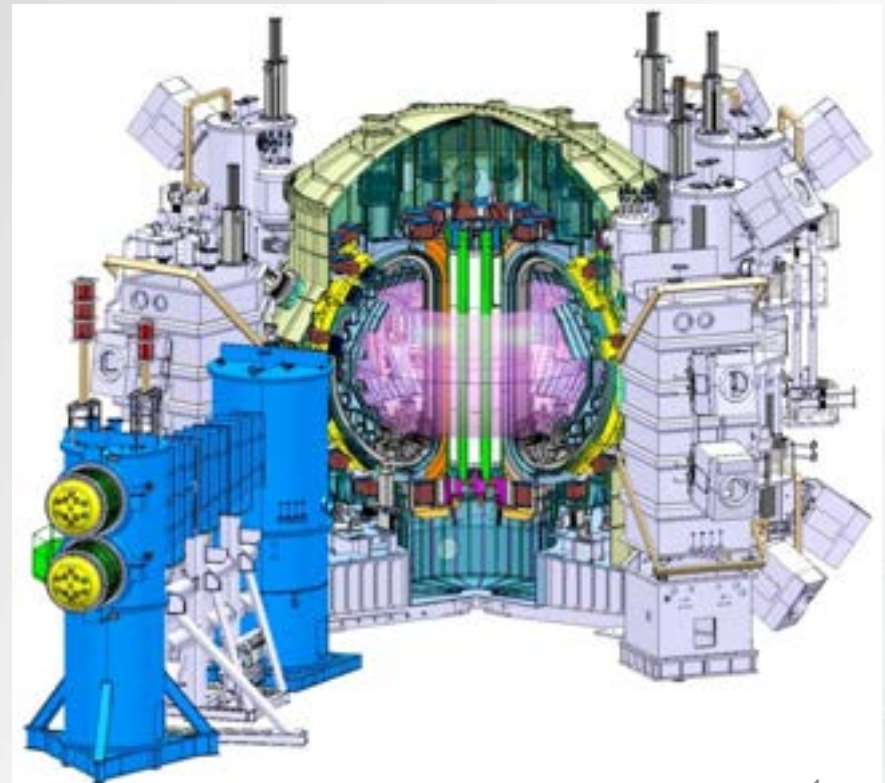
**Responsabile del laboratorio di
ingegneria del "Broader Approach"**

Ricerca di Sistema Elettrico

Roma, 19 giugno 2015

ENEA Sede Legale

Via Giulio Romano, 41 - Roma

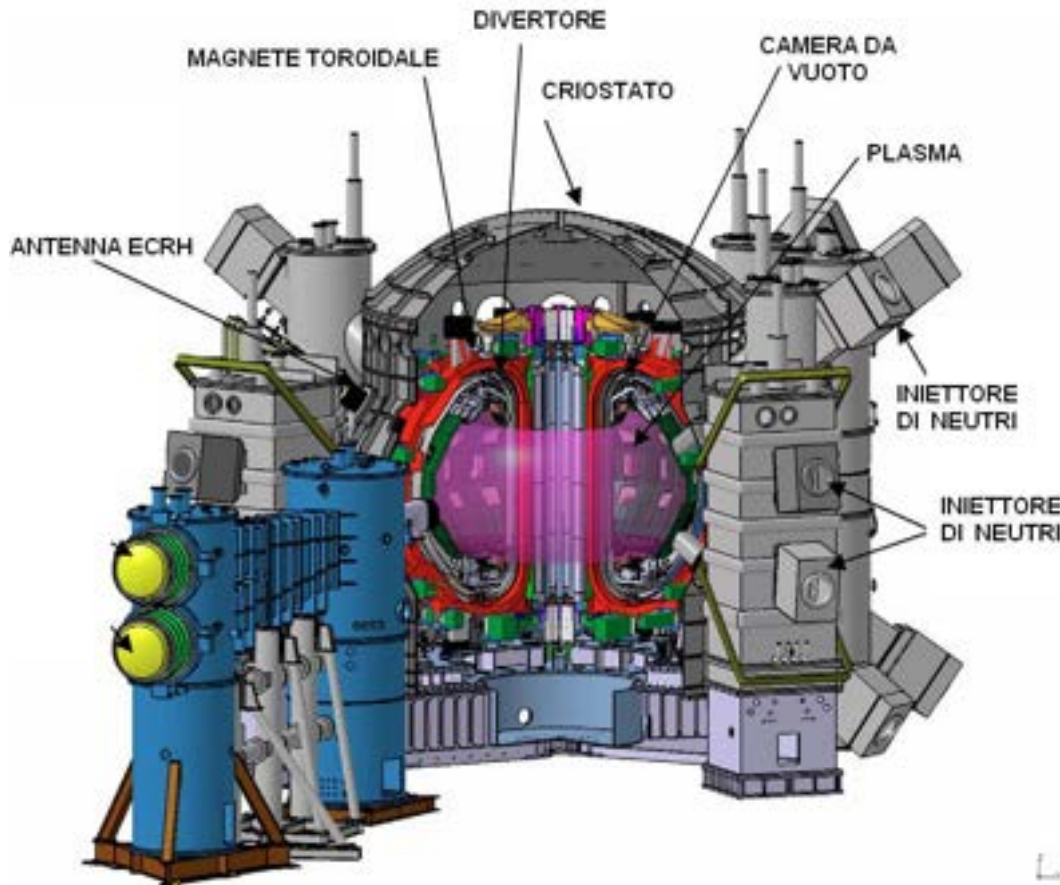


PROGRAMMA "BROADER APPROACH"

Europa e Giappone hanno ratificato un accordo di collaborazione 'Broader Approach' (BA) ripartendo il costo in parti uguali.

L'Italia ha affidato ad ENEA la costruzione, in collaborazione col CEA, del magnete superconduttore di JT-60SA con incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche.

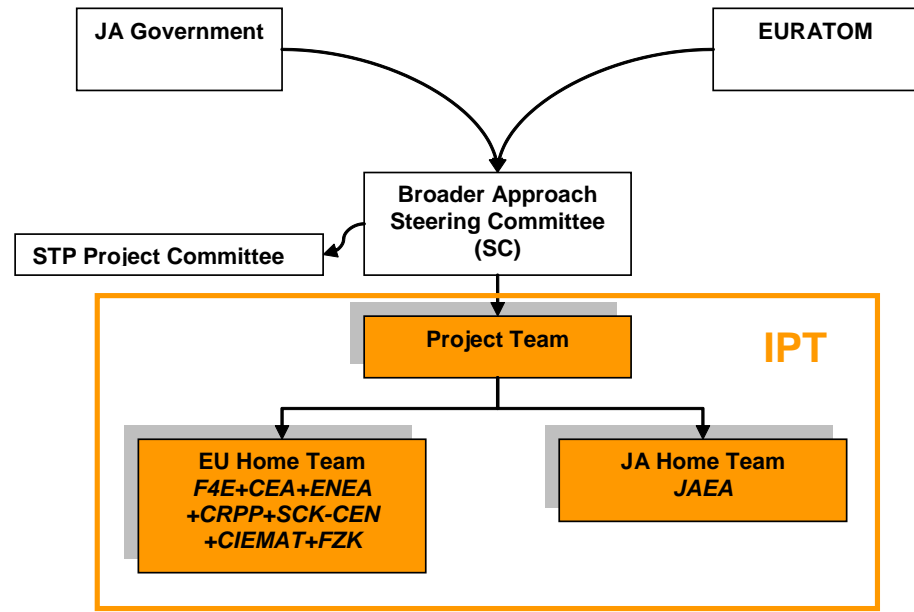
Il Tokamak JT-60SA sarà installato a Naka nella Torus Hall del Tokamak JT-60U.



Plasma Current	5.5 MA
Toroidal Field, B_t	2.25 T
Major Radius, R_p	2.96
Minor Radius, a	1.18
Elongation, κ_x	1.95
Triangularity, δ_x	0.53
Aspect Ratio, A	2.5
Shape Parameter, S	6.7
Safety Factor, q_5	~3
Flattop Duration	100 s
Heating & CD Power	41 MW
N-NBI	10 MW
P-NBI	24 MW
ECRF	7 MW
Divertor wall load	15 MW/m ²

Attività condotte da un gruppo di progetto integrato, un gruppo Europeo (Garching) ed un gruppo Giapponese (Naka), regolate da:

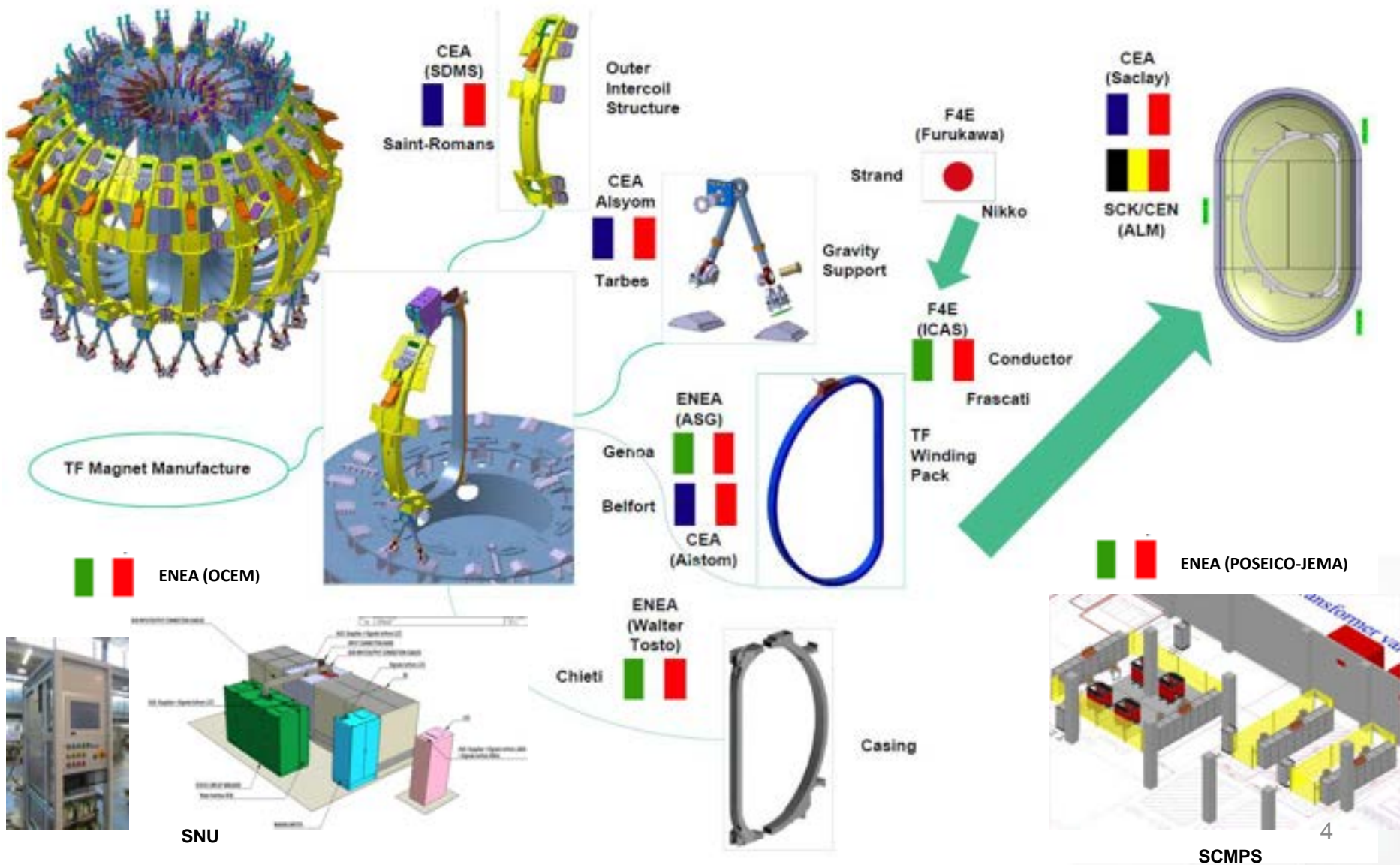
- ❑ 'Procurement Arrangements' fra Implementing Agencies per collaborazione di fornitura fra EU e JAEA.
- ❑ 'Agreement of Collaboration' con F4E che impegnano i vari paesi a fornire il proprio contributo.
- ❑ MIG, tra costruttori magneti (ENEA-CEA); TCM, ospitato dai paesi che partecipano al BA; Project Committee supporto allo Steering Committee.



TCM-22; 22 April 2015



COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI



Caratteristiche superconduttore Ni Ti

Rapporto di aspetto; Cu/nCu; frazione vuoto; temperatura critica;

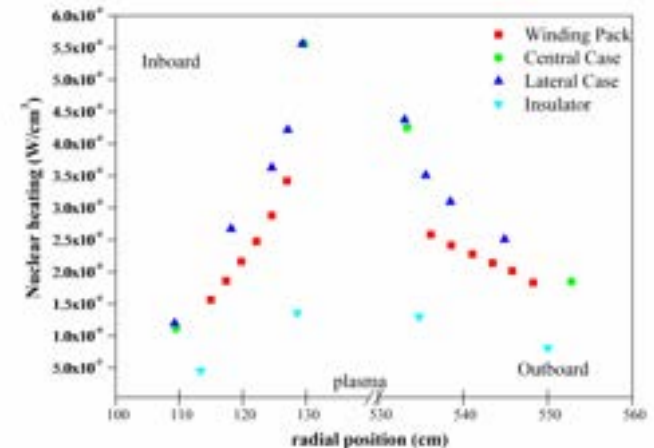
Geometria dell'avvolgimento della bobina toroidale e del modulo magnetico.

Calcolo campo magnetico sulla bobina; valutazione correnti indotte da disruzione; valutazione delle AC losses; analisi strutturale con ANSYS della sezione interna del magnete.

Analisi neutroniche per carichi criogenici

Il modello MCNP in 3D tiene conto della CdV con acqua borata

		ENEA alternative	CDR
Number of turns	72	70	90
Number of double pancakes	6	5	5
Number of layers	6	7	9
Conductor int. dimensions (mm ²)	18 x 22	15 x 27	25.1 x 25.1
Jacket thickness (mm)	2.0	2.2	2.2
Winding pack dimensions (mm ²)	160 x 357	165.8 x 354	299.5 x 335



Analisi termica del magnete

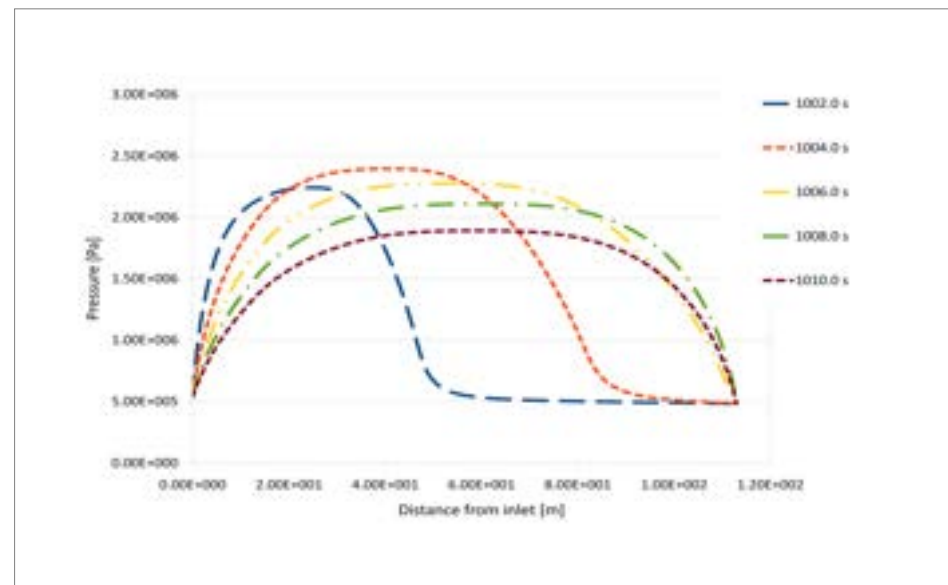
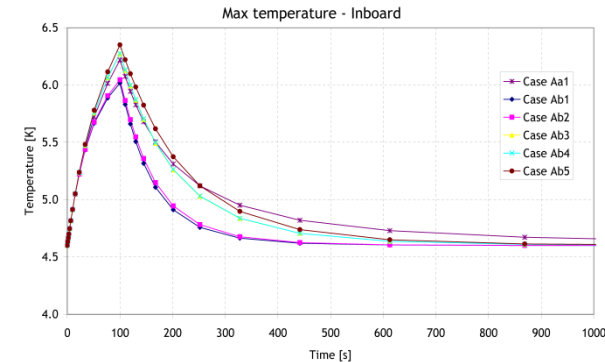
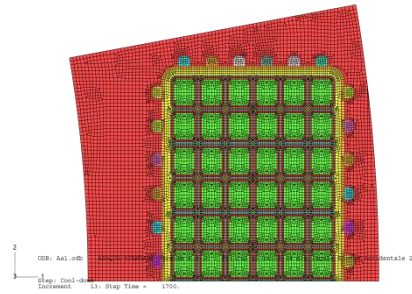
Raffreddamento bobina e magnete con canali dedicati;

Analisi termoidraulica con il codice Gandalf per valutare gli effetti current quench (incremento di temperatura e di pressione He).

Studi per la identificazione del quench.

Camera da vuoto

Valutazione costanti di tempo camera, correnti indotte da disruzione; analisi di interferenza dei port nelle condizioni di baking e di disruzione



L'ENEA partecipa al programma del BA con la fornitura "in kind" a Naka del magnete superconduttore di JT-60SA con incluse le casse di contenimento e le alimentazioni elettriche.

L'Italia partecipa al programma con una spesa complessiva di 50 M€.

In aggiunta alle competenze interne l'ENEA ha selezionato ditte di comprovata esperienza stipulando contratti di fornitura pluriennali (2011 ÷ 2017) suddivisi in fasi corrispondenti a compiuti oggetti contrattuali.

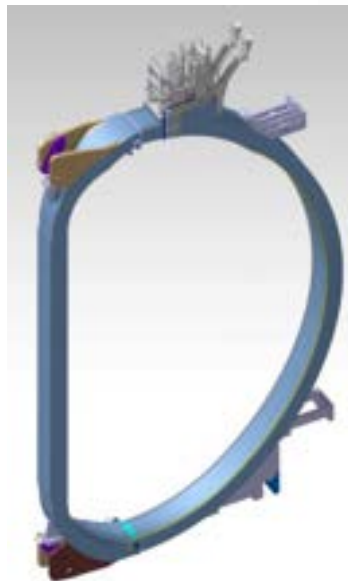
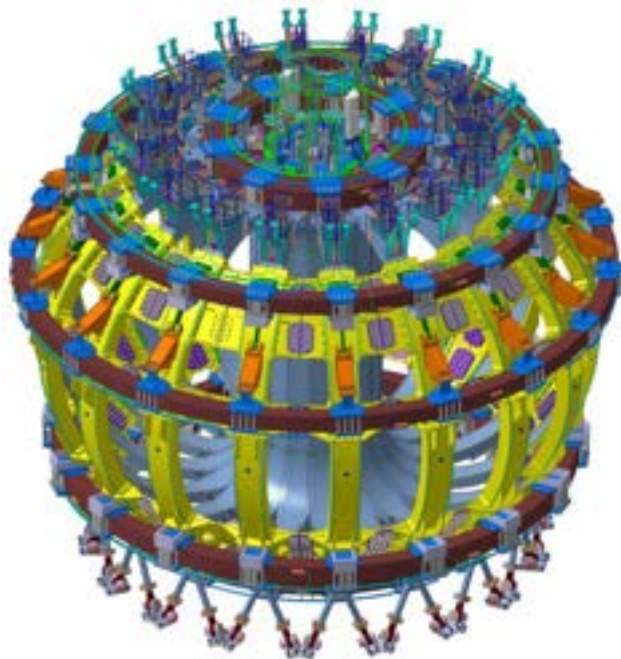
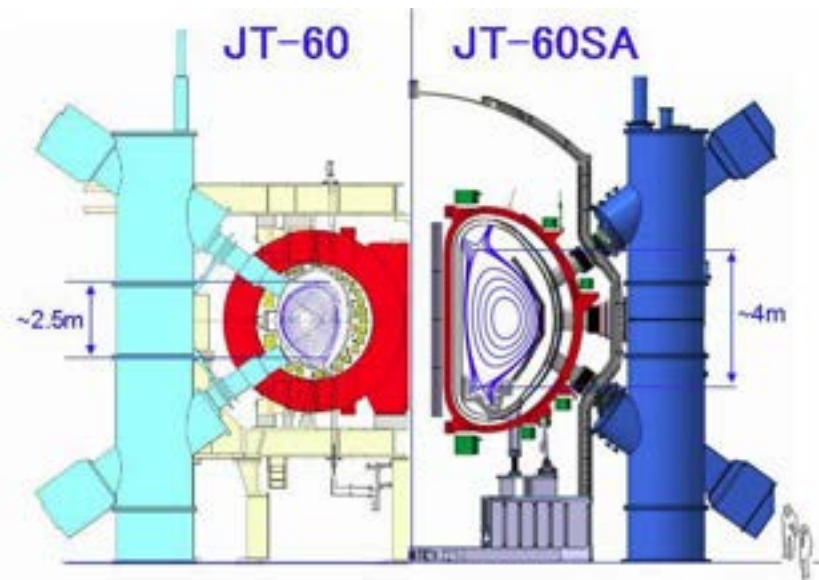
Il Ministero dello sviluppo economico ed ENEA hanno stipulato un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle attività di ricerca affidate all'ENEA nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale.

Le attività oggetto degli Accordi di collaborazione con F4E (AoC) sono ripartite nei Piani Annuali di Realizzazione (PAR) dell'ENEA; i piani sono definiti dal Decreto ministeriale di finanziamento del Piano Operativo Annuale (POA) per la Ricerca di Sistema Elettrico.

Le attività definite nella annualità relativa al PAR è oggetto di esame di preventivo e consuntivo da parte di un gruppo di esperti nominati dalla CCSE (Cassa conguaglio per il settore elettrico).

Sistema magnetico di JT-60SA:

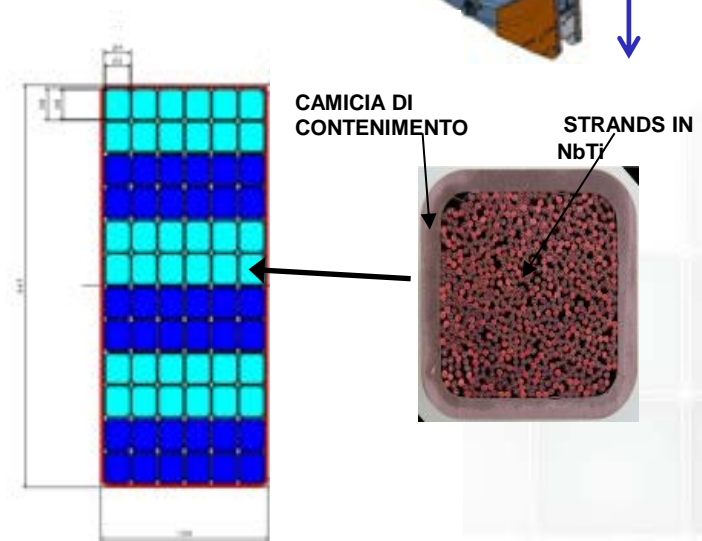
- 18 magneti superconduttori (NbTi) di campo toroidale (TF) con forma a D;
- 4 moduli del solenoide centrale (CS) in Nb₃Sn;
- 6 magneti in NbTi che generano il campo poloidale.
- raffreddato da un flusso forzato di elio supercritico alla temperatura di 4.4 gradi Kelvin.



La stabilità strutturale è assicurata da:

- Forze centripete contrastate da un effetto cuneo sulle superfici laterali della gamba dritta;
- Forze fuori piano sostenute da attrito gamba dritta e zone bullonate di estremità e segmenti posti sull'esterno della bobina uniti toroidalmente

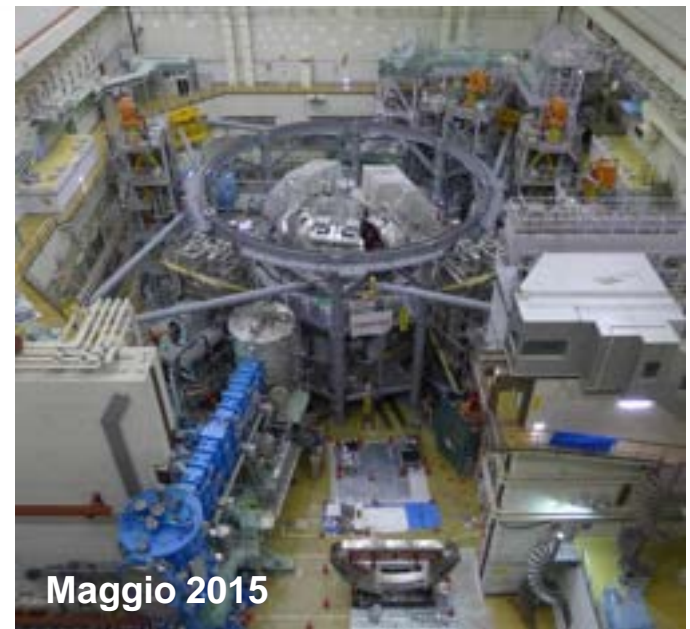
- ❑ Avvolgimento di bobina realizzato con conduttore 22x26 (camicia 2mm) attraversato da corrente di 25.7kA, formato da 6 doppi pancake 6x2 collegati in serie da giunti elettrici per la continuità elettrica;
- ❑ Collettori provvedono alla distribuzione del flusso di elio; l'ingresso di elio è sul lato ad alto campo, i giunti sono sull'esterno a basso campo.
- ❑ L'avvolgimento di bobina è contenuto in una cassa in AISI che costituisce il principale componente strutturale del sistema magnetico. L'impregnazione in cassa (embedding) rende la bobina corpo unico con la cassa.



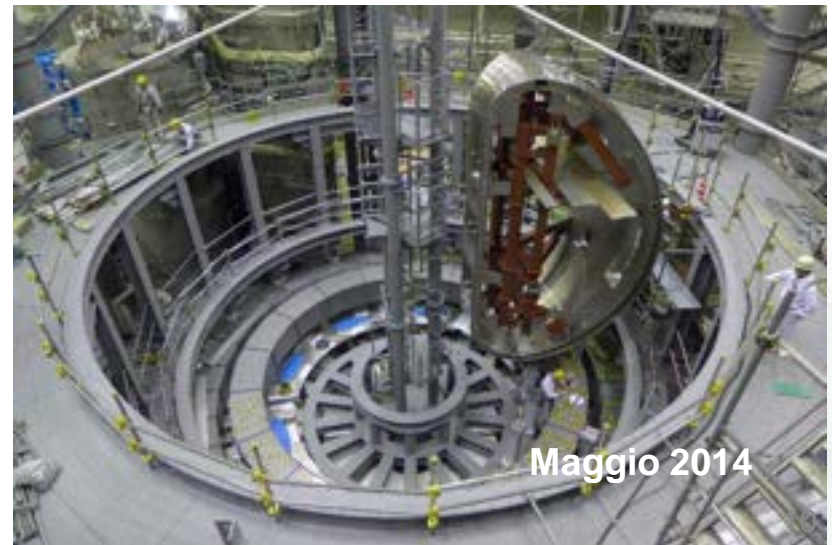
AVANZAMENTI COSTRUZIONE A NAKA



Gennaio 2014

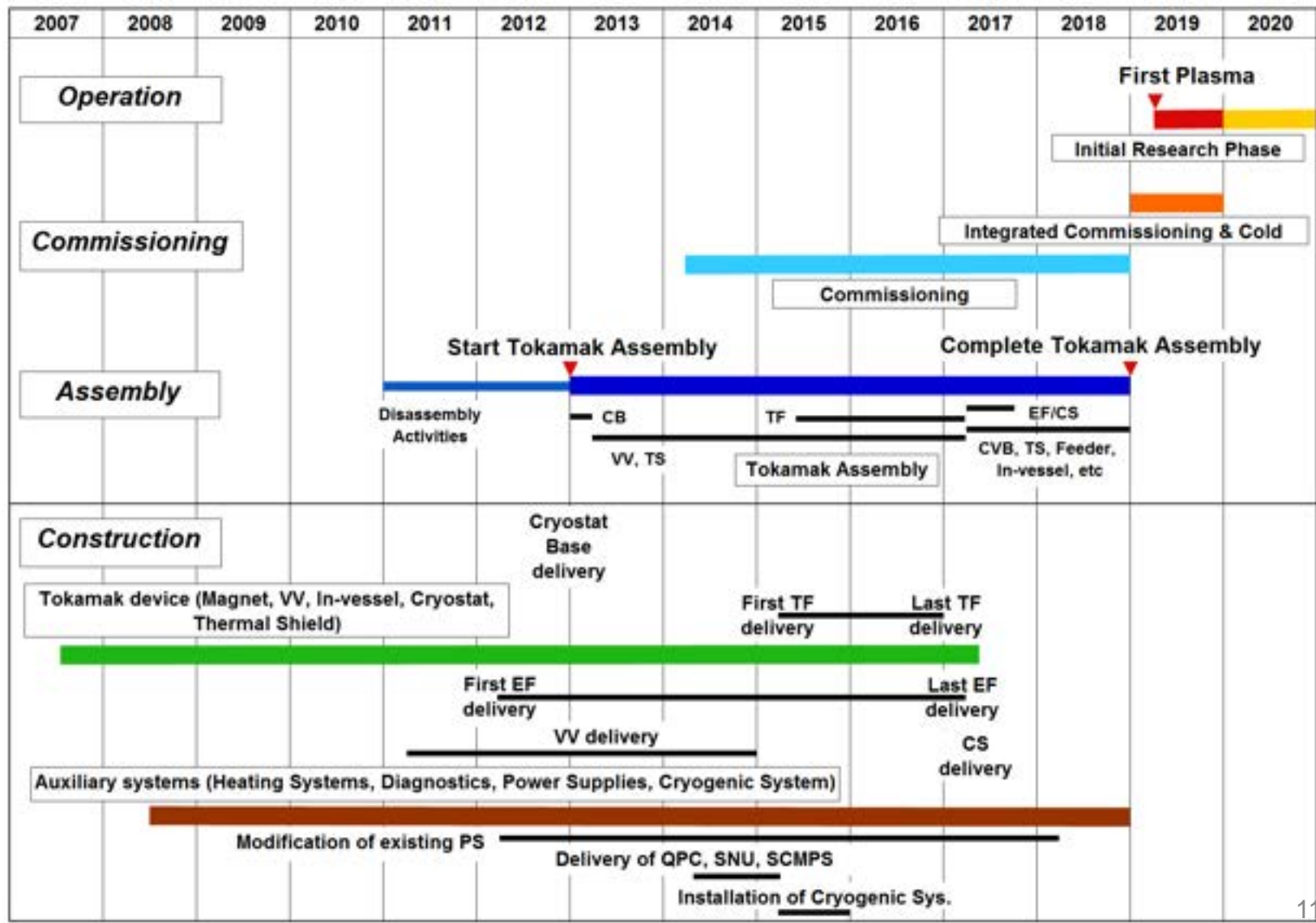


Maggio 2015

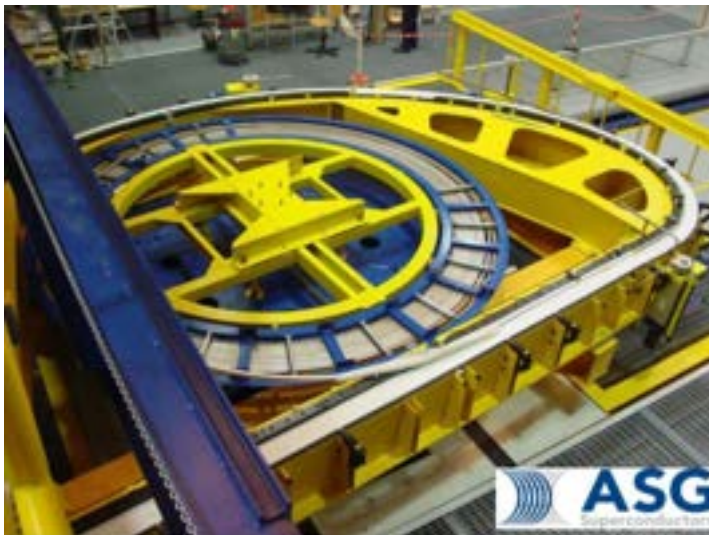
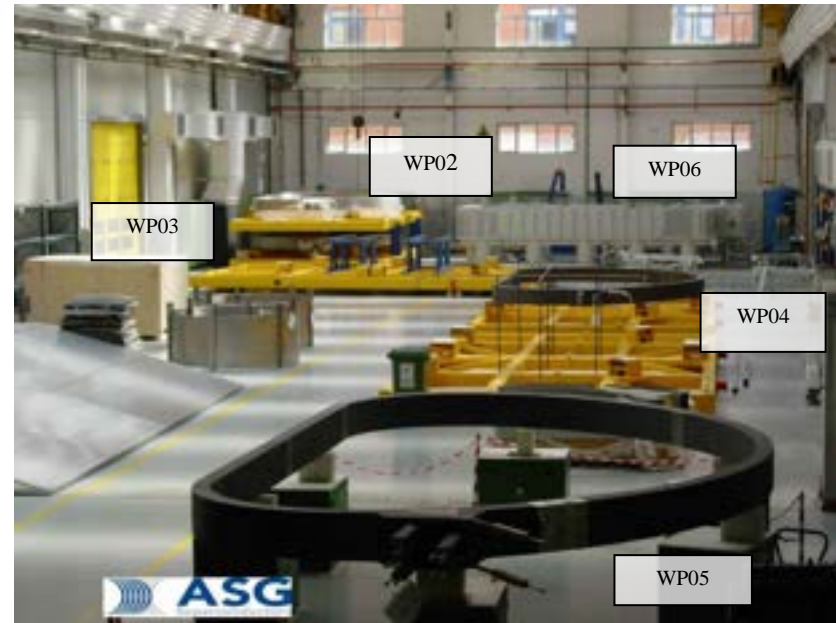


Maggio 2014

PIANIFICAZIONE TOKAMAK JT-60SA



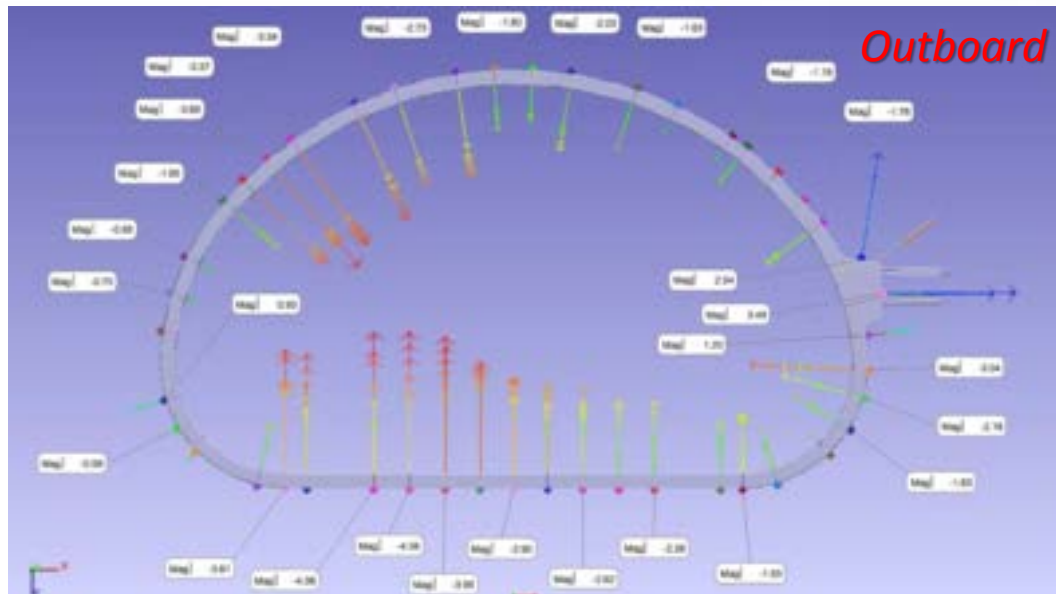
- ❑ Contratto con ASG (Settembre 2011) per la realizzazione di 9 bobine superconduttrici.
- ❑ In funzione impianti ed attrezzature, completato il programma di qualifica dei processi speciali.
- ❑ Entro il 2015 completi 9 avvolgimenti bobine e terminato il 1° modulo di magneti:
 - WP01 -> inserimento in cassa per modulo magneti;
 - WP02 ÷ WP06 -> pronti per inserimento in cassa;
 - WP07 -> prove di accettazione;
 - WP08 -> processo di impregnazione;
 - WP09 -> impilaggio doppi pancake.



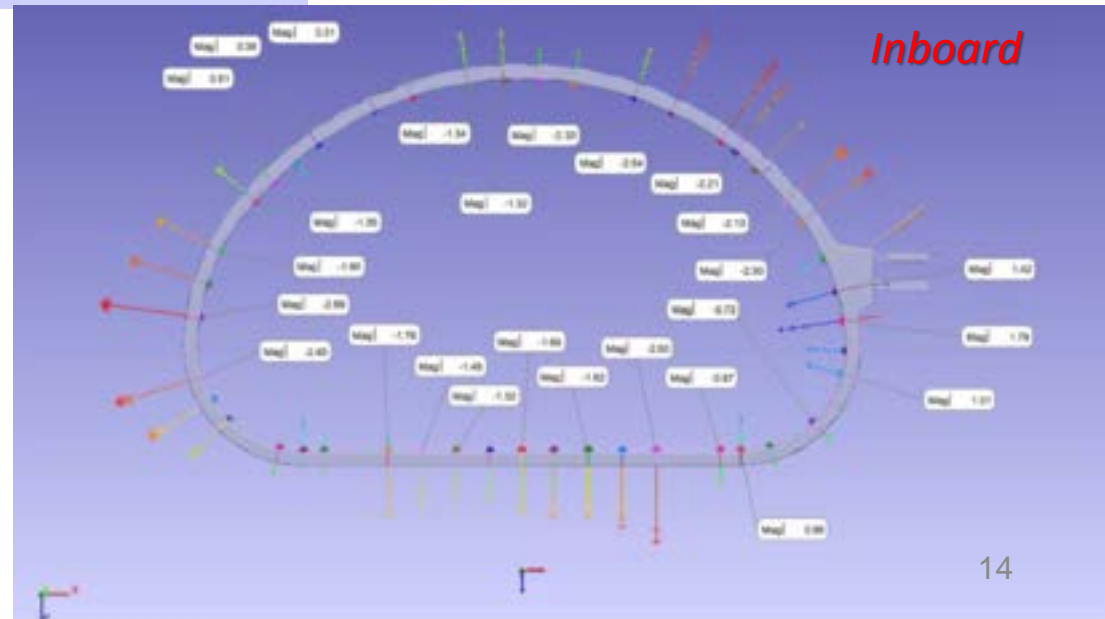
REALIZZAZIONE BOBINA JT-60SA



REALIZZAZIONE BOBINA JT-60SA



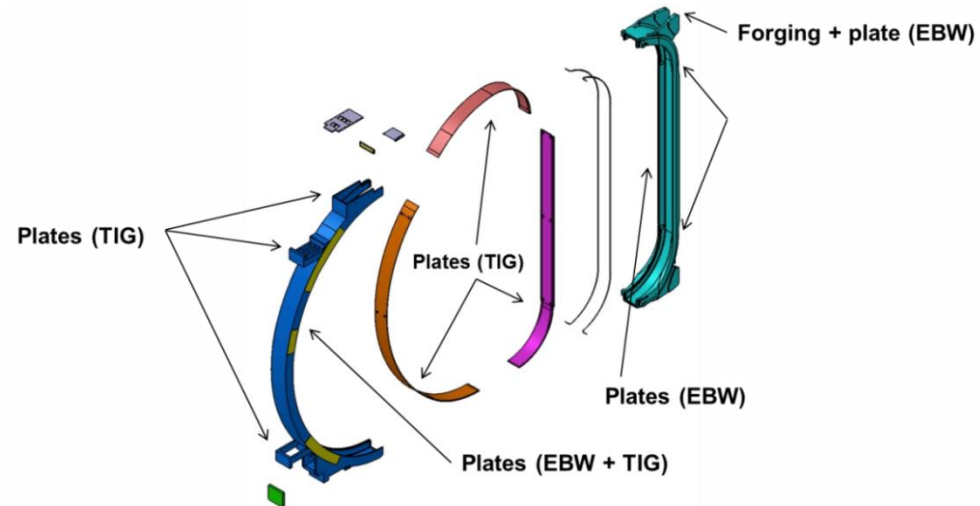
Errore di forma dell'ordine del millimetro; la center line della gamba dritta è compresa in un cilindro di diametro massimo di 2 mm.



REALIZZAZIONE MODULO DI MAGNETE JT-60SA



- ❑ Contratto con WT (luglio 2012) per la realizzazione componenti per 18 casse di contenimento. Le prime 8 casse consegnate entro 2015.
- ❑ Elevate precisioni dimensionali; saldature innovative (EB), controlli Laser Tracker intermedi nel ciclo di lavorazione; Reverse Engineering per accoppiamenti.
- ❑ La prima cassa di contenimento è stata consegnata al CEA/Alstom i primi di aprile, in corso l'integrazione.



F4E in visita a WTO (Marzo 2015)



JAEA in visita a WTO (Marzo 2015)



CEA/Alstom di fronte alla gamba dritta (Marzo 2015).

REALIZZAZIONE STRUTTURE DI CONTENIMENTO

La cassa ASG è stata consegnata i primi di maggio.



ASG



2° gamba curva in prefinitura



3° gamba curva in fase di assemblaggio

ALSTOM



2° gamba curva in lavorazione



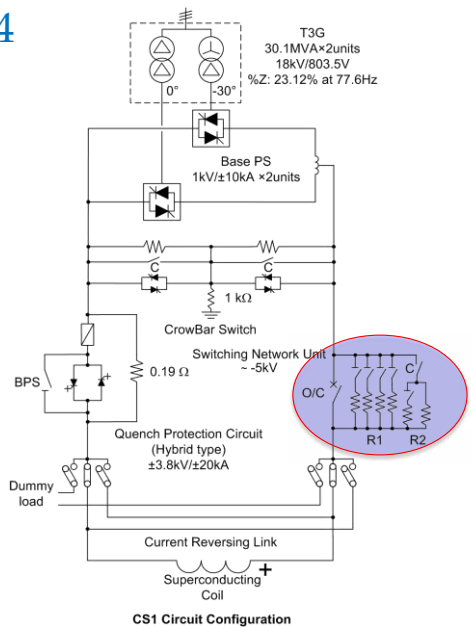
3° gamba curva in preparazione

REALIZZAZIONE DI 4 SWITCHING NETWORK

- Contratto con OCEM-ET (ottobre 2012) per la realizzazione di 4 Switching Network Units.
- Completata la realizzazione della SNU prototipo provata con successo nel Centro ENEA di Frascati nelle condizioni operative di lavoro dell'impianto JT-60SA (20 kA; 5 kV).



Tests SNU in ENEA Frascati (Settembre 2015)



CS1 Circuit Configuration
Alimentazione di CS con SNU



Local Control cubicle della SNU



Parte della SNU prototipo



Prototipo di SNU

- ❑ Realizzati ulteriori 3 interruttori elettronici static circuit breaker (SCB) delle altre 3 SNU.
- ❑ 3 Making Switch sono quasi completi.
- ❑ 3 By Pass Switch e 6 resistori di breakdown saranno completati per Luglio.
- ❑ I test di accettazione saranno eseguiti entro settembre.



3 cubicoli aperti per mostrare gli SCB



Raffreddamento dei semiconduttori con
acqua demineralizzata.

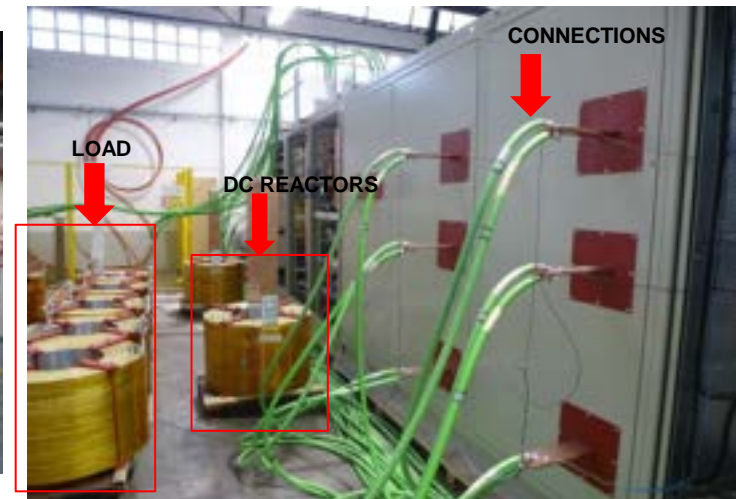


Dettaglio di un singolo SCB

- ❑ Contratto con Poseico-Jema (agosto 2013) per la realizzazione di 8 Power supplies system: 4 per il Solenoide Centrale, 2 per le bobine esterne di equilibrio (EF1 EF6) e 2 per controllo FPPC
- ❑ I trasformatori per convertitori per FPPC sono stati provati con prova di corto circuito (prove a CESI e SEA luglio e settembre 2014)
- ❑ I convertitori per FPPC sono stati realizzati (prove San Sebastian marzo 2015)



Test di corto circuito del trasformatore del convertitore di FPPC



- ❑ Realizzazione dei convertitori per FPPC dotati di sistema di comando e controllo, completi di prove di accettazione (novembre 2014)
- ❑ Realizzazione del prototipo del sistema di Crowbar di un convertitore per CS ed esecuzione delle prove. (Prove sismiche maggio 2015)
- ❑ Realizzazione dei trasformatori CS2, CS3 ed esecuzione delle relative prove di accettazione. (Prove previste in settembre 2015)



FPPC PS LCC Cabinet Front side



FPPC Thyristor assembly

- ❑ Le attività di ricerca di questo progetto si integrano con quelle svolte nell'ambito del programma Europeo sulla Fusione
- ❑ 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.
- ❑ I 9 avvolgimenti di bobina saranno completati entro la fine del 2015 in linea con quanto programmato.
- ❑ Il primo modulo del sistema magnetico sarà pronto entro la fine del 2015 e la fornitura sarà completata entro il 2017.
- ❑ I principali sottoassiemi degli apparati elettrici sono stati testati, e la loro realizzazione procede secondo i programmi.