



## Ricerca di Sistema elettrico

Completamento di ulteriori tre moduli di  
magnete toroidale completi di prove di  
accettazione finale come da  
documentazione tecnica

G.M. Polli, A. Cucchiario, P. Rossi

COMPLETAMENTO DI ULTERIORI TRE MODULI DI MAGNETE TOROIDALE COMPLETI DI PROVE DI ACCETTAZIONE FINALE COME DA DOCUMENTAZIONE TECNICA

G.M. Polli, A. Cucchiaro , P. Rossi (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: B.3.2 – Attività di Fisica della Fusione Complementari a ITER

Obiettivo: Macchina JT-60SA – subtask a1 Fornitura di 9 moduli di magneti di campo toroidale

Responsabile del Progetto: A. Pizzuto, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 INTEGRAZIONE DEGLI AVVOLGIMENTI NELLE RELATIVE CASSE DI CONTENIMENTO .....	5
3 CONCLUSIONI.....	9
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	9

## Sommario

Il presente documento riporta i risultati previsti dall'obiettivo "Macchina JT-60SA" *subtask* a.1 del PAR 2016 che riguardano il completamento di ulteriori tre moduli di magneti toroidale della macchina sperimentale JT-60SA. Questa attività si inserisce nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra Europa e Giappone denominato *Broader Approach* e prevede la fornitura sotto la responsabilità di ENEA di nove moduli di magneti e di un modulo *spare*. I tre moduli previsti per l'annualità in esame sono stati completati all'interno delle previsioni contrattuali e trasportati al centro di ricerche del CEA a Saclay per essere sottoposti ai test criogenici di accettazione. Completati i test, i moduli sono stati trasportati in Giappone e assemblati nel tokamak. Oltre a descrivere le fasi di lavorazione che hanno caratterizzato i tre moduli, nel seguito vengono riportati i principali risultati operativi misurati nel corso delle prove di accettazione confrontati con gli analoghi risultati ottenuti dai moduli precedentemente completati.

## 1 Introduzione

La realizzazione di dieci moduli di magneti toroidali della macchina sperimentale a fusione JT-60SA costituisce una delle forniture che l'Italia, attraverso l'ENEA, si è impegnata a garantire nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra Europa e Giappone denominato *Broader Approach*. Il magnete toroidale di JT-60SA è costituito di diciotto moduli la cui fornitura è stata equamente divisa tra Italia e Francia; per minimizzare i rischi di gestione l'originale fornitura è stata aumentata di due moduli aggiuntivi (o *spare*) mantenendo l'uguale distribuzione tra Italia e Francia. L'attività costruttiva, preceduta da un'intensa fase di progettazione, è formalmente cominciata nel settembre 2011 con l'assegnazione all'impresa ASG Superconductors di Genova del contratto di fornitura da parte di ENEA. A sua volta la costruzione è stata divisa in tre fasi: *i*) costruzione e approvvigionamento attrezzature di avvolgimento e impregnazione; *ii*) realizzazione degli avvolgimenti di bobina; *iii*) integrazione degli avvolgimenti nelle relative casse di contenimento. La costruzione dei primi nove avvolgimenti è stata conclusa nel 2015 e parallelamente è cominciata la fase di integrazione nelle relative casse di contenimento di fornitura ENEA. Il 2016 è stato segnato dal completamento dell'avvolgimento per il modulo *spare*, e dalla spedizione di quattro moduli alla *Cold Test Facility* presso il CEA di Saclay, dove sono state condotte le prove criogeniche di accettazione. Nel 2017 ulteriori quattro moduli sono stati spediti e testati presso il CEA di Saclay. Dei rimanenti due moduli, uno, al momento in cui si scrive, è stato spedito ed è pronto per i test criogenici, l'altro, ed ultimo modulo della fornitura (o bobina *spare*), ha invece terminato le lavorazioni meccaniche necessarie per raggiungere le tolleranze richieste all'assemblaggio e si prevede che verrà spedito e testato entro la primavera 2018.

Nel seguito dopo una presentazione delle attività di manifattura che hanno caratterizzato i tre moduli, si riportano i risultati dei test di accettazione in confronto ai risultati precedentemente ottenuti.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Integrazione degli avvolgimenti nelle relative casse di contenimento

Sono oggetto di descrizione del presente rapporto i tre moduli di magneti completati nell'ambito del PAR 2016 e successivamente spediti alla *Cold Test Facility* per essere sottoposti ai test criogenici. Come già anticipato nell'introduzione i 9 moduli toroidali previsti dalla fornitura sono stati completati. L'ultimo modulo (o bobina *spare*) verrà spedito nella primavera 2018.

L'integrazione dei moduli nelle relative casse di contenimento è un processo che occupa un arco temporale di circa sei mesi dalla ricezione dei componenti della cassa di fornitura ENEA. E' composto dalle seguenti fasi:

- I. Inserimento dell'avvolgimento nei componenti della cassa;
- II. Saldatura di unione dei componenti della cassa;
- III. Impregnazione di *embedding* per chiudere le intercapedini rimaste tra avvolgimento e cassa;
- IV. Lavorazione meccanica delle superfici di interfaccia;
- V. Montaggio del circuito idraulico di adduzione dell'Elio;
- VI. Collaudi finali.

La Figura 1 mostra i tempi effettivamente impiegati per il completamento delle fasi precedentemente elencate. Si noti la significativa accelerazione registrata a partire dal modulo TFC-06 in particolare nella fase denominata "*Machining*" che consiste nelle lavorazioni di macchina condotte al di fuori della linea di integrazione. Sugli ultimi moduli rappresentati in particolare si può riconoscere il completamento in 180 giorni che rappresenta il *target* descritto in precedenza.

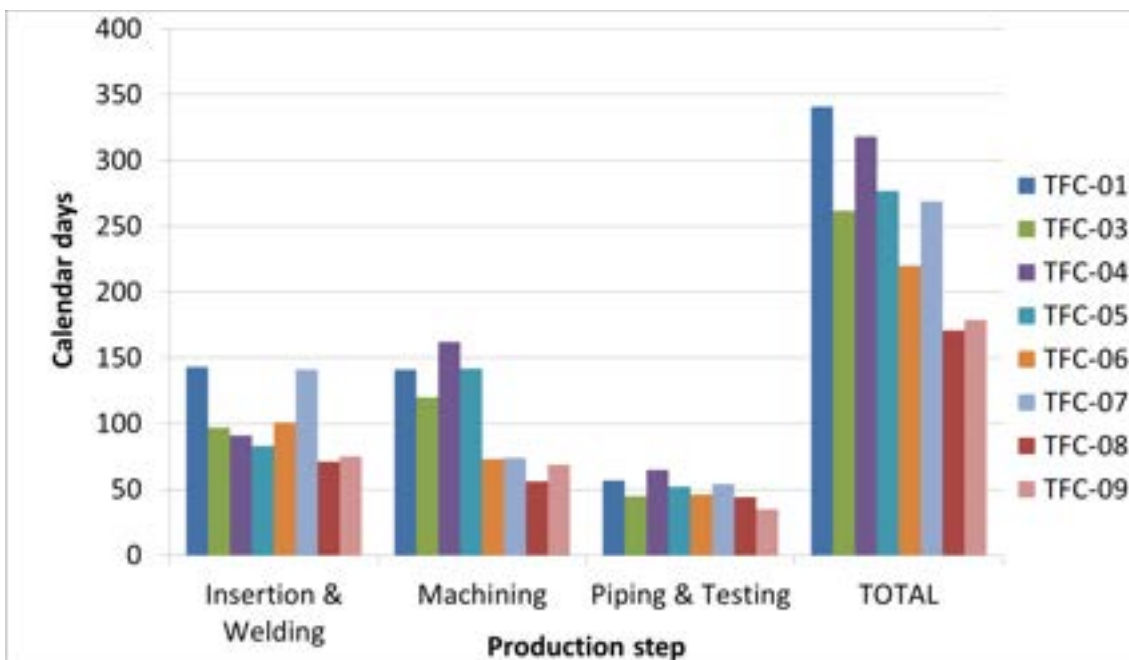


Figura 1 Tempi di realizzazione delle fasi di integrazione dei moduli

Con riferimento alla fase di saldatura dei componenti della cassa è interessante notare, nella seguente Figura 2, che i controlli eseguiti al termine delle saldature trasversali e longitudinali di unione delle casse sono stati caratterizzati da un numero decrescente di difetti, successivamente riparati, con l'avanzamento della produzione dei moduli. Ciò permette di giustificare il miglioramento della tempistica rappresentato nella precedente figura che si interpreta come un processo di apprendimento.

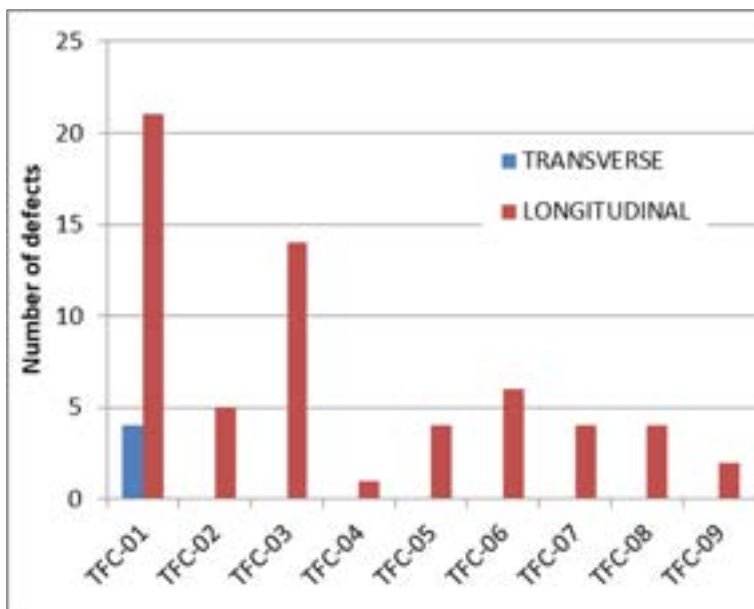


Figura 2 Numero di difetti di saldatura identificati e successivamente riparati nei diversi moduli prodotti

Le immagini seguenti (Figura 3-Figura 5) mostrano i tre moduli, TFC-04, TFC-05 e TFC-06, oggetto del presente report, al termine delle operazioni di integrazione. Si riconosce in tutti e tre i casi mostrati il sistema di piping montato per la distribuzione e recupero dell'Elio.



Figura 3 TFC-04



Figura 4 TFC-05



Figura 5 TFC-06

A testimonianza dello stato di avanzamento delle attività di montaggio del sistema magnetico toroidale di JT-60SA si riporta un'immagine del tokamak in Figura 6 con l'indicazione dei moduli già assemblati. Si noti che i moduli dal TFC-01 al TFC-08 sono quelli di fornitura ENEA, i restanti sono stati prodotti dal CEA francese.

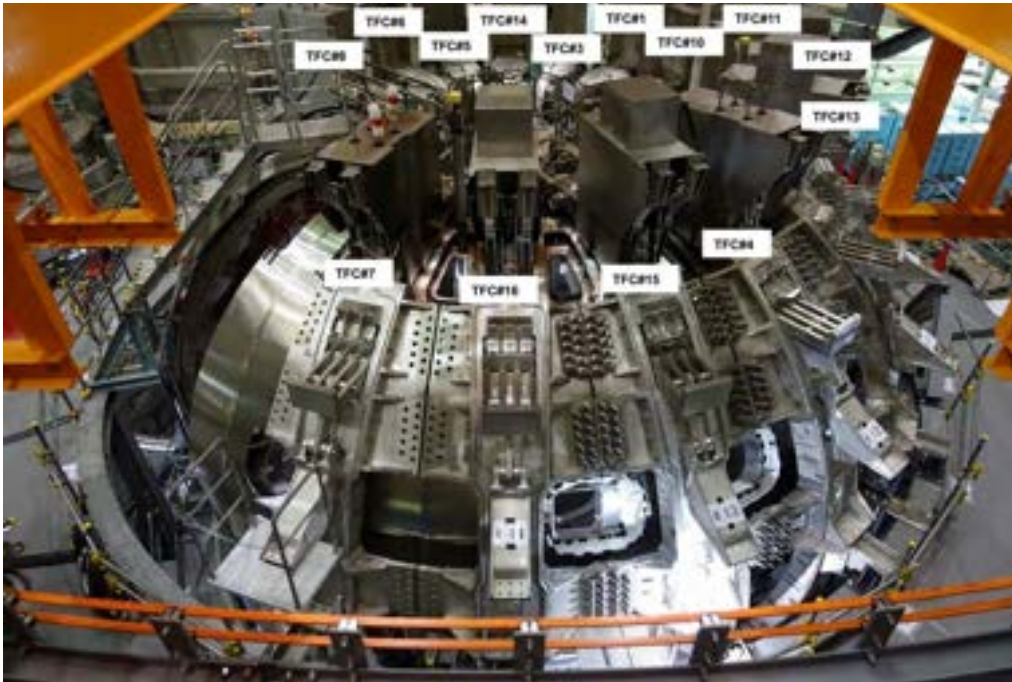


Figura 6 Stato di assemblaggio delle bobine di campo toroidale a Febbraio 2018

Con riferimento ai risultati dei controlli eseguiti al termine della fabbricazione, la Figura 7 mostra la deviazione, rispetto al nominale, della posizione delle mire della gamba dritta dei vari moduli prodotti. Si osservi che la tolleranza di progetto prevedeva uno scostamento di 2 mm, tale valore è stato superato a causa della deformazione indotta dalla saldatura longitudinale dei coperchi che ha determinato un'ovalizzazione dei moduli.

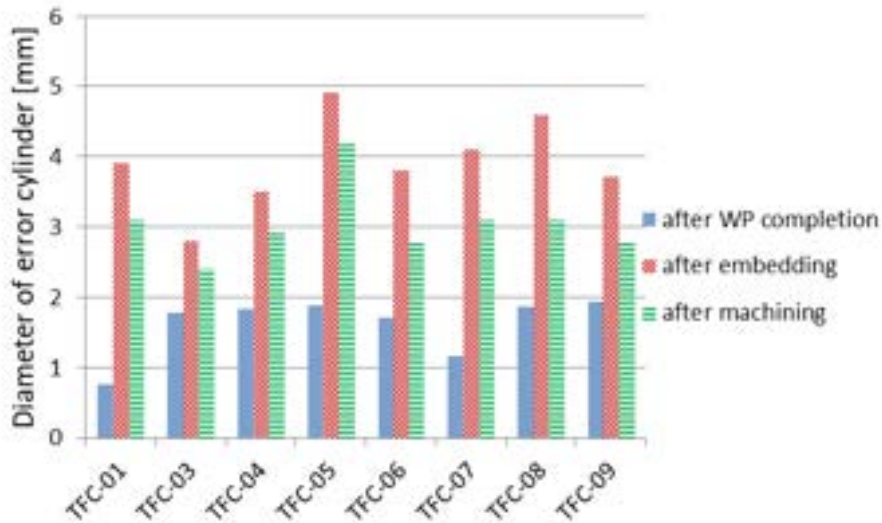


Figura 7 Spostamento delle mire della gamba dritta per i diversi moduli prodotti nelle varie fasi di produzione

Nella figura è possibile riconoscere l'evoluzione di questo parametro geometrico nelle diverse fasi di produzione. In particolare, prima dell'inserimento nella cassa di contenimento, lo scostamento era mantenuto all'interno dei valori di tolleranza. Dopo la saldatura e la successiva impregnazione di *embedding*, si nota un aumento che viene in parte compensato dalle lavorazioni meccaniche.

Con riferimento alle terminazioni elettriche attraverso cui vengono alimentati i moduli, la Figura 8 mostra la deviazione dei vertici delle scatole delle terminazioni rispetto alla posizione nominale. Si noti che ad eccezione dei primi moduli, caratterizzati da uno scostamento maggiore in alcuni punti, gli altri hanno

presentato deviazioni limitate che non hanno in nessun caso compromesso né l'esecuzione dei test criogenici né il montaggio nel tokamak.

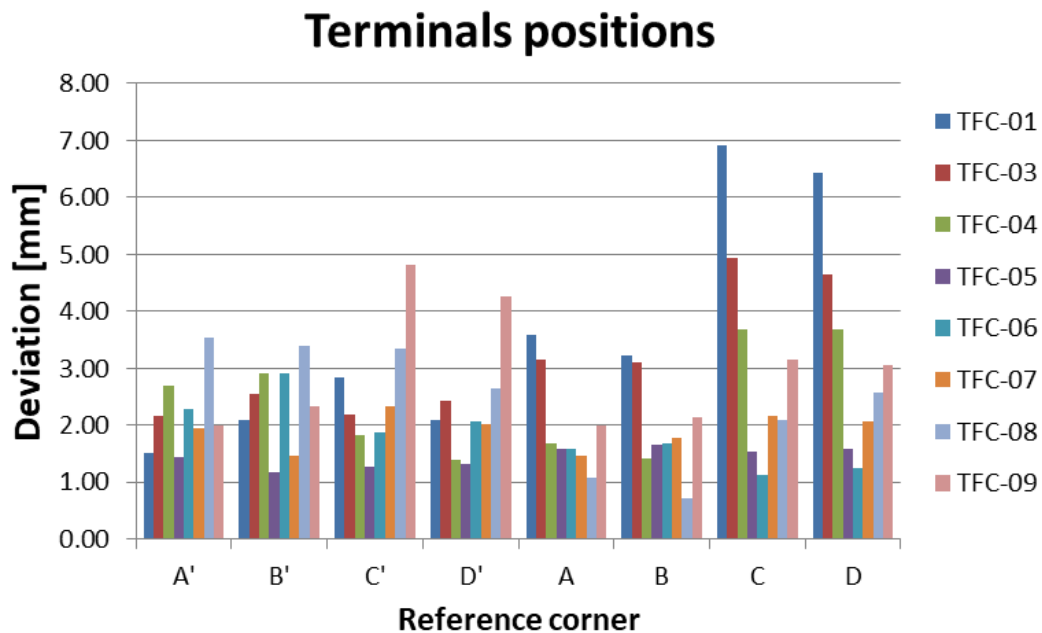


Figura 8 Deviazione dal nominale delle terminazioni elettriche per i diversi moduli prodotti.

### 3 Conclusioni

La fabbricazione dei nove moduli di magneti toroidali della macchina JT-60SA è stata completata con la loro consegna. L'ultimo modulo (o bobina spare) ha terminato con successo le lavorazioni meccaniche e deve essere corredato dell'impianto di adduzione dell'Elio per essere consegnato nella primavera del 2018. Dall'analisi dei risultati ottenuti si è osservata un'accelerazione dei tempi di completamento e un miglioramento delle prestazioni geometriche determinato da una fase di apprendimento nei vari processi.

### 4 Riferimenti bibliografici

1. Polli, G.M., Cucchiario, A., Cocilovo, V., Rossi, P., Drago, G., Barutti, A., Pesenti, P., Terzi, F., Di Pietro, E., Tomarchio, V., "Status of ENEA's Procurement of 9 TF Coils of JT-60SA Tokamak", (2018) IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 28 (3), art. no. 8239851.
2. Davis, S., Abdel Maksoud, W., Barabaschi, P., Cucchiario, A., Decool, P., Pietro, D., Disset, G., Hajnal, N., Kizu, K., Mayri, C., Masaki, K., Marechal, J.-L., Murakami, H., Polli, G.M., Rossi, P., Tomarchio, V., Tsuchiya, K., Tsuru, D., Verrecchia, M., Wanner, M., "JT-60SA Magnet System Status", (2018) IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 28 (3), art. no. 8103065, .
3. Rossi, P., Cucchiario, A., Polli, G.M., Gabriele, M., Tacconelli, M., Tomarchio, V., Davis, S. Status of casing manufacturing for JT-60SA toroidal field coils, (2017) Fusion Engineering and Design, 124, pp. 127-130.
4. Polli, G.M., Cucchiario, A., Cocilovo, V., Corato, V., Rossi, P., Drago, G., Pesenti, P., Terzi, F., Di Pietro, E., Tomarchio, V., JT-60SA TF coils procured by ENEA: An intermediate assessment, (2017) Fusion Engineering and Design, 124, pp. 123-126.