



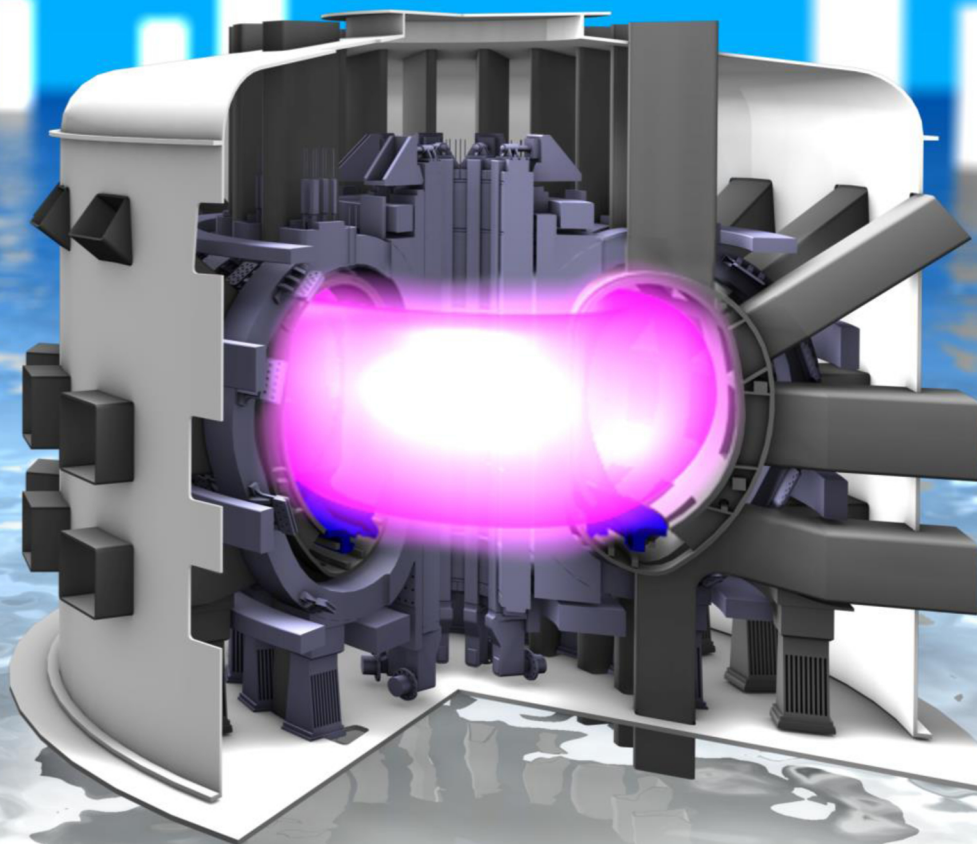
ENEA
Member of EUROfusion



DTT

*Divertor Tokamak Test facility
Proposta Progettuale*

Sommario



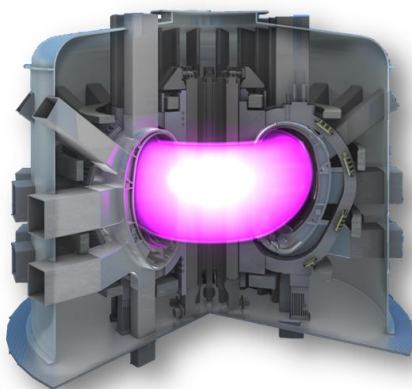


DTT

**Divertor Tokamak Test facility
Proposta progettuale**

SOMMARIO

*Una pietra miliare lungo il percorso
per la realizzazione dell'energia da fusione nucleare*



Luglio 2015



DTT

Divertor Tokamak Test facility – Proposta Progettuale - Sommario



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

A cura di Aldo Pizzuto, ENEA

ISBN: 978-88-8286-320-3

Stampato nel Luglio 2015 presso il Centro Ricerca ENEA Frascati
Via Enrico Fermi 45, 00044 Frascati (Roma), Italy

Questa nota contiene una panoramica estremamente sintetica della proposta progettuale DTT, Divertor Tokamak Test facility, riportata in forma analitica nel volume "DTT Divertor Tokamak Test facility. Project Proposal" pubblicato da ENEA nel luglio 2015, ISBN: 978-88-8286-318-0. Per ogni dettaglio si rinvia alla pubblicazione integrale, disponibile in formato elettronico alla pagina web http://fsn-fusphy.frascati.enea.it/DTT_ProjectProposal_July2015.pdf e in formato cartaceo su richiesta.

Obiettivo della nota è fornire i dati salienti di un progetto complesso e articolato che ha coinvolto circa cento ricercatori di università e laboratori italiani e stranieri, coordinati da R. Albanese (Università degli Studi di Napoli Federico II e CREATE), F. Crisanti (ENEA), R. Martone (Seconda Università degli Studi di Napoli e CREATE) e A. Pizzuto (ENEA). All'impegno, alla dedizione e alla qualificazione del gruppo di progetto si deve la messa a punto di una proposta innovativa e approfondita che si candida a rappresentare un passo significativo nella Road Map verso la realizzazione dell'energia da fusione termonucleare controllata.

Il finanziamento europeo dell'iniziativa nel quadro del Piano Europeo di Investimenti Infrastrutturali, consentirà di trasformare la proposta in un programma sperimentale che, nell'arco di pochi anni, fornirà risposte scientifiche, tecniche e tecnologiche cruciali per la ricerca scientifica nel settore delle fonti energetiche innovative e un formidabile impulso alla industria più avanzata e, indirettamente, ai livelli occupazionali.

Il gruppo di coordinamento.

R. Albanese, F. Crisanti, R. Martone, A. Pizzuto.

Luglio 2015

Ringraziamenti

Questa proposta è sinergica con le attività sviluppate da EUROfusion nell'ambito dei seguenti work package:

"WPDTT1 - Assessment of alternative divertor geometries and liquid metals PFCs", Project Leader H. Reimerdes;

"WPDTT2 - Definition and Design of the Divertor Tokamak Test Facility", Project Leader R. Albanese.

Si ringraziano

- *il Chairman della EUROfusion General Assembly, J. Pamela, l'EUROfusion Programme Manager, A.J.H. Donné, e l'ex EFDA Leader, F. Romanelli, per il loro supporto alla iniziativa DTT;*
- *il DTT2 Project Board ed in particolare il suo Chairman, B. Saoutic per gli utili suggerimenti e per il supporto alle attività di pre-conceptual design del DTT;*
- *l'intero DTT2 Team e, in particolare, il Responsible Officer e gli Activity Manager, che non hanno operato direttamente sulle attività di pre-conceptual design del DTT, ma che tuttavia hanno fornito una base importante per la preparazione di questo documento: M. Ariola di ENEA-CREATE, G. Galant di IPPLM, D. Hancock di CCFE, S. McIntosh di CCFE, R. Stankiewicz di IPPLM, F. L. Tabarés di CIEMAT, M. Turnyanskiy di EUROfusion PMU;*
- *il Department of Power Plant Physics and Technology (EUROfusion PM Unit) e, in particolare, G. Federici, R. Wenninger e C. Bachmann per i suggerimenti in funzione della utilizzazione di DTT in vista di DEMO;*
- *l'EUROfusion ITER Physics Department e, in particolare, X. Litaudon e D. McDonald per le utili discussioni sui requisiti di DTT;*
- *M. Cavinato, A. Neto, A. Portone, R. Ranz Santana, F. Sartori di F4E e F. Piccolo, ITER Machine Operation Officer, per i preziosi commenti e suggerimenti forniti sul sistema magnetico e sul sistema di acquisizione dati;*
- *M. Evangelos Biancolini e F. Giorgetti dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata per il supporto nel progetto dei magneti;*
- *K. Lackner e E. Salpietro per le discussioni e gli utili suggerimenti sul layout del DTT;*
- *Jiangang Li per gli interessanti suggerimenti sulla proposta progettuale del DTT;*
- *A. Albanese, F. Ledda, M. Nicolazzo e F. Pizzo di ENEA-CREATE per il contributo nella gestione del sito web e nella compilazione del DTT Report;*
- *S. Papa e G. Di Gironimo di ENEA-CREATE per la ideazione del logo di DTT;*
- *A. Tarallo e G. Di Gironimo di ENEA-CREATE per la realizzazione della copertina del DTT report;*
- *P. Bayetti, M. Bécoulet, S. Brémond, J.M. Bernard, J. Bucalossi, D. Ciazynski, L. Doceul, D. Douai, J. L. Duchateau, M. Firdaouss, P. Garin, R. Gondé, A. Grosman, G.T. Hoang, P. Magaud, D. Mazon, M. Missirlian, P. Mollard, Ph. Moreau, R. Magne, E. Nardon, B. Peluso, C. Reux, F. Saint-Laurent, A. Simonin, M. Soldaini, E. Tsitrone, D. van Houtte, E. Villedieu e L. Zani del CEA per la importante attività di revisione tecnico-scientifica del DTT Report.*

Questo documento non rappresenta l'opinione di CEA, CRPP - EPFL, FOM-DIFFER, IPPL, e altri partner non italiani di EUROfusion.

Contributori

ENEA, Italy

L. Affinito
A. Anemona
M. L. Apicella
P. Batistoni
G. Calabrò
A. Cardinali
S. Ceccuzzi
C. Centioli
V. Corato
P. Costa
F. Crisanti
A. Cucchiario
A. Della Corte
G. De Marzi
A. Di Zenobio
C. Fiamozzi Zignani
L. Gabellieri
A. Lampasi
G. Maddaluno
G. Maffia
D. Marocco
G. Mazzitelli
G. Messina
F. Mirizzi
M. Moneti
L. Muzzi
A. Pizzuto
G. Ramogida
G. L. Ravera
R. Righetti
S. Roccella
F. Starace
G. Tomassetti
A. Tuccillo
O. Tudisco
S. Turtù
S. Villari
B. Viola
V. Vitale
G. Vlad
P. Zito
F. Zonca

ENEA - CNR - IFP, Italy

A. Bruschi
D. Farina
L. Figini
S. Garavaglia
G. Granucci
M. Lontano
D. Micheletti
S. Nowak
C. Sozzi

ENEA - CREATE, Italy

R. Albanese
R. Ambrosino
L. Barbato
S. Ciattaglia
D. Coccoresse
V. Coccoresse
M. de Magistris
G. Di Gironimo
V. P. Loschiavo
R. Martone
D. Marzullo
S. Mastrostefano
S. Minucci
R. Mozzillo
R. Palmaccio
V. Pericoli-Ridolfini
A. Pironti
G. Rubinacci
A. Tarallo
S. Ventre
F. Villone

ENEA - Politecnico di Torino, Italy

R. Maggiore
D. Milanese

ENEA - RFX, Italy

P. Agostinetti
T. Bolzonella
L. Carraro
A. Fassina
P. Franz
E. Gaio
F. Gnesotto
P. Innocente
A. Luchetta
G. Manduchi
L. Marrelli
P. Martin
S. Peruzzo
R. Piovan
M. E. Puiatti
G. Spizzo
P. Scarin
P. Sonato
M. Spolaore
V. Toigo
M. Valisa
L. Zanutto

Univ. degli Studi di Milano - Bicocca, Italy

G. Gorini

CEA, IRFM, France

G. Giruzzi

CRPP - EPFL, Switzerland

B. Duval

H. Reimerdes

FOM-DIFFER, The Netherlands

M. de Baar

IPPLM, Poland

R. Zagórski

Sinossi

La recente costituzione del Consorzio EUROfusion rappresenta un notevole passo avanti nel programma europeo (EU Fusion Road Map) per la realizzazione di un impianto dimostrativo (DEMO), una centrale nucleare a fusione in grado di fornire energia elettrica alla rete entro il 2050.

Una delle principali sfide nella Road Map è costituita dal problema dello smaltimento dei carichi termici del plasma attraverso il cosiddetto divertore. Pertanto, in parallelo con il programma finalizzato ad ottimizzare le modalità operative previste nel reattore sperimentale ITER, EUROfusion ha fatto partire un altro programma per studiare soluzioni alternative al problema dei carichi termici in DEMO, con il progetto di una macchina denominata "Divertor Tokamak Test facility" (DTT), in grado di fornire soluzioni integrate con tutti gli aspetti fisici e tecnologici. Le soluzioni alternative da sottoporre a specifici test in DTT comprenderanno le configurazioni magnetiche avanzate ed i divertori basati sui metalli liquidi.

DTT dovrà operare in scenari integrati, con carichi termici rilevanti, divertori flessibili, condizioni di plasma (all'interno ed al bordo) simili a quelle previste per DEMO, quanto meno in termini di grandezze adimensionali. Il compromesso tra prestazioni richieste e la necessità di rispettare la scala dei tempi dettata dalla Road Map per DEMO ha portato alla scelta dei seguenti parametri: raggio maggiore $R=2.15$ m, rapporto di aspetto $A=3.1$ ($A=R/a$, dove 'a' è il raggio minore del tokamak), campo magnetico toroidale $B_T=6$ T, corrente di plasma $I_p=6$ MA, potenza aggiuntiva $P_{Tot}=45$ MW. La macchina potrà provare differenti concetti e tipologie di divertore, in condizioni rilevanti per un reattore. Saranno testati diversi materiali (tungsteno, metalli liquidi) con flussi termici fino a 20 MW/m². L'obiettivo principale è quello di individuare una soluzione integrata per il problema dei carichi termici previsti in DEMO. Le attività di ricerca correlate costituiranno una notevole spinta per lo sviluppo di tecnologie innovative in vari settori, con rilevanti ricadute per le industrie europee.

In base alla Road Map, DTT dovrebbe essere operativo nel 2022. Pertanto, la realizzazione durerà circa 7 anni a partire dalla prima gara (2016) fino alla messa in servizio con il primo plasma nel 2022. Le operazioni ed il programma sperimentale dovrebbero poi coprire un periodo di oltre venti anni, fino all'inizio della costruzione di DEMO ed oltre.

L'impatto occupazionale previsto è rilevante, almeno 150 persone coinvolte nelle operazioni (50 % ricercatori e personale qualificato, 50 % personale di supporto). E' inoltre previsto un notevole numero di lavoratori coinvolti nelle fasi di costruzione ed operazione, senza contare le opportunità per spin-off e sub-appalti.

Anche l'impatto economico previsto sul territorio è significativo nelle fasi di costruzione ed in quelle successive (edifici, rete elettrica, manutenzione, ecc.). Inoltre, la presenza continuativa richiesta durante le operazioni darà luogo a ricadute sul territorio legate al soggiorno di un team internazionale con le relative famiglie (alloggi, trasporti, ristoranti, scuole, ecc.).

EUROfusion ha stanziato circa 60 MEUR in Horizon 2020, mentre il costo previsto per la realizzazione di DTT è valutato intorno alla cifra di 500 MEUR. Recentemente, vedendo nel progetto DTT un'occasione per dare un contributo al problema energetico ecocompatibile per i prossimi decenni ed al tempo stesso investire nella ricerca con la prospettiva di un elevatissimo ritorno economico, e di un forte stimolo per la formazione di giovani nel settore della ricerca applicata, il governo italiano ha offerto alla comunità scientifica europea l'opportunità di ottenere i finanziamenti necessari a costruire DTT in Italia. La proposta è fra i progetti presentati per il finanziamento tramite i 315 miliardi di Euro previsti dall'Agenda Juncker (EFSI: European Fund for Strategic Investments).

Questo rapporto presenta la proposta DTT basata sul lavoro di un qualificato team europeo ed il suo contenuto è stato sottoposto al vaglio di esperti cinesi, che a valle di una revisione indipendente hanno espresso una raccomandazione positiva. La proposta dimostra la possibilità di realizzare una macchina sperimentale in grado di superare il gap tecnologico nel settore dei carichi termici tra i dispositivi attuali e ITER/DEMO, nel quadro della Road Map Europea per la fusione, che gioca un ruolo fondamentale per lo sviluppo di una delle tecnologie più promettenti per fornire una sorgente di energia alternativa sicura, pulita ed inesauribile.

1. Introduzione

Una delle principali sfide nel programma europeo (EU Fusion Road Map [1]) in vista della realizzazione di un impianto dimostrativo (DEMO, una centrale nucleare a fusione in grado di fornire energia elettrica alla rete entro il 2050), è costituita dal problema dei carichi termici sul divertore (il principale componente dell'impianto per lo smaltimento della potenza termica del plasma in una centrale a fusione). In ITER [2], [3] (l'esperimento internazionale sulla fusione a confinamento magnetico di tipo tokamak attualmente in costruzione a Cadarache, Francia) si prevede di testare le reali potenzialità di un divertore "convenzionale" funzionante in condizioni di plasma completamente "distaccato" dalla parete. Purtroppo questa soluzione potrebbe non essere estrapolabile alle condizioni operative di DEMO e dei futuri reattori; quindi il problema dei carichi termici sul divertore potrebbe rimanere particolarmente critico nella strada verso la realizzazione del reattore.

Per questi motivi, all'interno della Fusion Road Map europea, è stato avviato un programma specifico finalizzato alla definizione ed al progetto di un tokamak denominato "DTT (Divertor Tokamak Test)". Questo dispositivo dovrà effettuare esperimenti in scala in grado di cercare alternative per il divertore in grado di integrarsi con le specifiche condizioni fisiche e le soluzioni tecnologiche previste in DEMO. DTT dovrà consentire di sperimentare diverse configurazioni magnetiche, con componenti basati sull'utilizzo di metalli liquidi ed altre soluzioni idonee per il problema dei carichi termici sul divertore.

Nella proposta progettuale i parametri sono scelti in modo da riprodurre le condizioni sulla frontiera di plasma simili a quelle di DEMO in termini di grandezze adimensionali caratterizzanti la fisica sia del SOL (lo Scrape-Off Layer, cioè la parte di plasma che interagisce con la parete) che del divertore, pur mantenendo la piena compatibilità delle caratteristiche del plasma con quelle di DEMO (sempre in termini di grandezze adimensionali). I parametri principali della macchina sono stati scelti in modo da garantire la massima flessibilità, pur nei limiti di un budget e di un programma temporale coerenti con la Road Map europea.

2. La fusione a confinamento magnetico come sorgente di energia

La fusione nucleare è il processo che alimenta il sole e le stelle, rendendo possibile la vita sulla Terra. Si chiama "fusione" perché l'energia è prodotta combinando nuclei leggeri, come isotopi di idrogeno, portati a temperature estremamente elevate (15 milioni di gradi nel sole, più di 100 milioni di gradi nei dispositivi realizzati nei laboratori). In questo processo parte della massa dei reagenti viene convertita in energia cinetica dei prodotti di reazione (un nucleo di elio ed un neutrone per la reazione deuterio - trizio), che a loro volta possono essere utilizzati per produrre energia elettrica tramite tecniche convenzionali in una turbina a vapore.

In prospettiva la fusione nucleare è inclusa fra le principali fonti di energia in grado di garantire la sostenibilità senza produzione di CO₂ (e quindi senza contribuire direttamente all'effetto serra). Potrà pertanto essere utilizzata per soddisfare la rapida crescita della domanda globale di energia, che dovrebbe più che raddoppiare entro il 2050 per l'effetto combinato degli aumenti della popolazione e del fabbisogno energetico nei paesi in via di sviluppo.

La fusione termonucleare controllata potrà fornire energia:

- *Eco-compatibile*: i prodotti della reazione di fusione più promettente (D-T, cioè deuterio-trizio) sono solo elio e neutroni. Non vengono prodotte scorie radioattive e, con una corretta scelta dei materiali, la radioattività indotta nei componenti strutturali decade in un tempo relativamente breve, paragonabile a quello delle centrali a carbone.
- *Intrinsecamente sicura*: non sono possibili reazioni a catena in quanto è presente solo una quantità assai limitata di reagenti nella camera da vuoto; in caso di danni, incidenti, o perdita di controllo, la reazione di fusione con conseguente generazione di calore decadrà assai rapidamente spegnendosi automaticamente.
- *Sostenibile*: deuterio e litio (il trizio è prodotto nel reattore) sono largamente diffusi e praticamente inesauribili in natura (il deuterio è presente in gran quantità nell'acqua del mare ed il litio può essere estratto sia dalle rocce sia dagli oceani).
- *Senza emissioni di gas serra*: non si ha produzione di CO₂.

Alla temperatura estremamente elevata necessaria per ottenere la fusione, la miscela reagente è allo stato di plasma, una condizione nella quale gli atomi sono tutti dissociati in ioni ed elettroni. Il confinamento di un tale plasma non è realizzabile con camere convenzionali. Per risolvere questo problema sono disponibili due opzioni.

La prima consiste nel comprimere e riscaldare la miscela reagente per mezzo di potenti raggi laser che, in tempi rapidissimi, costringono i nuclei a distanze talmente brevi da innescare le reazioni di fusione. Tale tecnica è denominata "fusione inerziale".

L'altra tecnica, detta "a confinamento magnetico", utilizza un campo magnetico per distaccare il plasma dalla parete. Ioni ed elettroni sono intrappolati dal campo magnetico, che si oppone al loro movimento trasversale. Tuttavia le particelle cariche elettricamente possono muoversi liberamente nella direzione parallela al campo. Se il campo magnetico è progettato in modo da formare superfici magnetiche concentriche, può essere utilizzato come un contenitore particolare, in grado di evitare il contatto di tali particelle con le pareti solide. Fra i dispositivi per fusione basati sul confinamento magnetico, quelli che finora hanno consentito di ottenere le migliori prestazioni sono i "tokamak" (Figura 1).

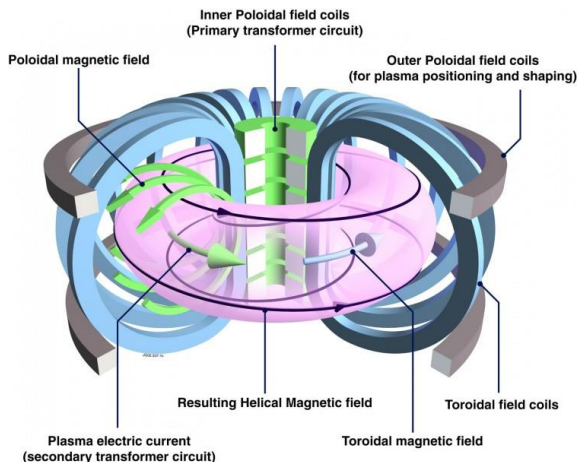


Figura 1: Il tokamak: avvolgimenti e campo magnetico risultante in grado di confinare il plasma.

3. Il problema dei carichi termici nella Road Map verso la fusione

Nel 2012, EFDA (European Fusion Development Agreement) ha pubblicato il rapporto "Fusion Electricity – A roadmap to the realisation of fusion energy" [1], che definisce un programma per la generazione di energia elettrica con un reattore a fusione nucleare dimostrativo (DEMO) entro il 2050.

La Road Map definisce otto missioni strategiche critiche da superare per raggiungere l'ambizioso obiettivo. In particolare, sono stati lanciati due progetti nell'ambito della missione n. 2 della Road Map ("Heat-exhaust system") con l'obiettivo di realizzare soluzioni alternative per il problema dello smaltimento dei carichi termici:

- "WPDTT1 - Assessment of alternative divertor geometries and liquid metals PFCs (Plasma Facing Components)"
- "WPDTT2 -Definition and Design of the Divertor Tokamak Test (DTT) Facility".

Il confinamento in un tokamak [3] è possibile grazie alle linee del campo magnetico che formano un insieme di superfici magnetiche chiuse. Sul bordo del plasma è presente una regione dello spessore di pochi centimetri (SOL: Scrape-Off Layer) con linee di campo aperte, in cui le particelle cariche (e l'energia ad esse associata) provenienti dal nucleo del plasma sono guidate attraverso la separatrice (l'ultima superficie chiusa) sulle piastre del cosiddetto "divertore". Il flusso termico parallelo alle linee di campo nel SOL di ITER e DEMO dovrebbe risultare addirittura superiore di quello che si manifesta sulla superficie del sole (Figure 2, 3, 4).

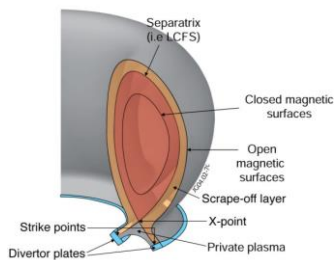
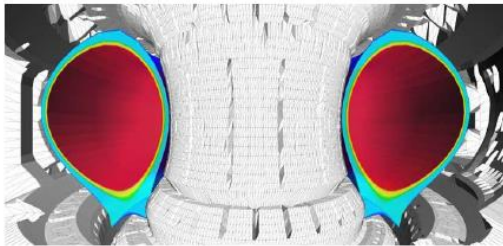
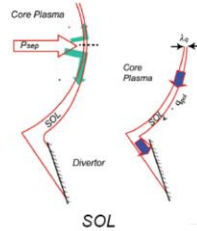


Figura 2: Il bordo del plasma: geometria dello Scrape-Off Layer (SOL) e delle piastre del divertore.

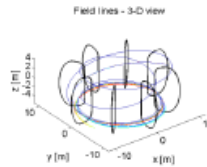
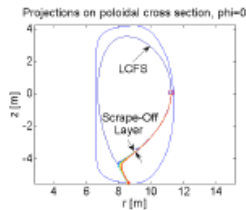


(cortesia di JET-EUROfusion)



$$q_{pol} \sim \frac{P_{SOL} / 2}{2\pi R \lambda_q}$$

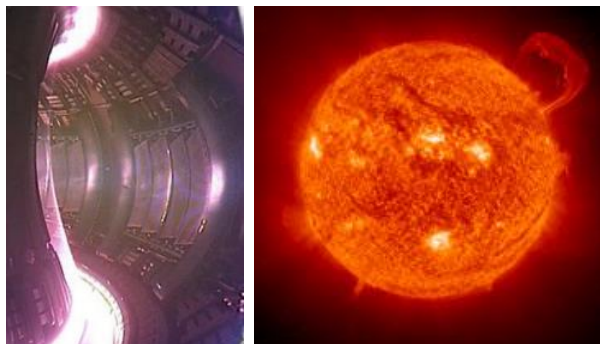
$$q_{||} \sim \frac{P_{SOL} / 2}{2\pi R \lambda_q} \frac{B}{B_\theta}$$



Magnetic field lines in ITER

	P_{SOL} (MW)	λ_q (mm)	R (m)	$q_{ }$ (GW/m ²)	q_{pol} (GW/m ²)
JET	~30	~3.5	~3	~0.7	~0.2
ITER	~90	~2	~6	~1.8	~0.6
DEMO*	~150	~1	~9	~5	~2

Figura 3: Il problema del carico termico sul divertore: P_{SOL} è la potenza totale che fluisce nel canale del SOL, λ_q la lunghezza di decadimento del flusso termico sul piano equatoriale, R il raggio maggiore, $q_{||}$ il flusso termico parallelo al campo magnetico, q_{pol} la componente poloidale del flusso termico.



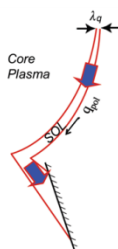
Condizione estreme:

- nel nucleo: $T > 100$ milioni di $^{\circ}\text{K}$
- nel SOL: $q_{\parallel} > 1 \text{ GW/m}^2$

La geometria lo riduce di un fattore 30:

- B toroidale $\gg B$ poloidale
- Espansione del flusso sul divertore
- Inclinazione della piastra

... ma il flusso termico sulle piastre è ancora superiore agli attuali limiti tecnologici ($5\text{-}10 \text{ MW/m}^2$)



$$q_{\text{pol}} \sim \frac{P_{\text{SOL}} / 2}{2\pi R \lambda_q}$$

$$q_{\text{th}} \sim \frac{P_{\text{SOL}} / 2}{2\pi R \lambda_q} \frac{B}{B_0}$$

Figura 4: Il problema del carico termico sul divertore: la geometria aiuta, ma da sola non è in grado di consentire la gestione di un flusso termico probabilmente superiore a quello che si manifesta sulla superficie del sole.

La strategia per affrontare il problema dei carichi termici sul divertore di DEMO e del reattore del futuro si basa principalmente sui seguenti fattori:

- sviluppo di componenti in grado di resistere ad elevati flussi termici ($>5 \text{ MW/m}^2$) basati su materiali di interesse reattoristico;
- scelta della geometria del divertore ed espansione delle linee di campo tali da ridurre il flusso termico perpendicolare alle piastre e, quindi, da distribuire il carico termico su una superficie più ampia;
- rimozione dell'energia del plasma prima che entri in contatto con la parete tramite radiazione ottenuta aumentando la densità del plasma al bordo ed iniettando impurità (sostanze diverse da prodotti e

reagenti) nella regione del SOL; in questa maniera si riduce la frazione di energia che arriva sulla parete, arrivando a densità di potenza compatibili con la tecnologia attuale ($15 \div 20 \text{ MW/m}^2$);

- "riciclaggio" delle particelle rilasciate dalla parete ed aumento della densità vicino alle piastre, con conseguente "distacco" del plasma dalla parete (la temperatura scende al disotto della soglia di ionizzazione, le particelle diventano neutre e quindi non vincolate dalle linee di campo, e non c'è più flusso diretto dal plasma sulle piastre del divertore).

Nella strategia per la soluzione del problema dei carichi termici bisogna ricordare che:

- gli esperimenti attuali nei quali le condizioni di plasma "distaccato" sono effettivamente realizzate, si caratterizzano per condizioni della regione SOL assai differenti da quelle previste in ITER e DEMO;
- le simulazioni con gli attuali modelli, metodi e codici per lo studio del SOL non sono sufficientemente affidabili nelle condizioni di ITER e DEMO;
- la stabilità del fronte di "distacco" deve essere ancora verificata sperimentalmente nelle condizioni di ITER e DEMO;
- potrebbero sorgere vari problemi di integrazione di una soluzione convenzionale con il plasma e con gli altri sottosistemi del reattore; ad esempio:
 - contaminazione del nucleo del plasma con impurità e conseguente riduzione della efficienza del confinamento e, quindi, delle prestazioni generali del reattore;
 - compatibilità delle condizioni del nucleo del plasma con la frazione di radiazione richiesta ($> 90\%$);
 - compatibilità con il pompaggio delle particelle;
 - monitoraggio dell'erosione, della temperatura, ecc.

Inoltre, devono essere tenuti in debito conto gli aspetti nucleari che limitano l'uso di alcuni materiali (requisiti in termini di tempo di vita di sistemi e componenti e conseguente necessità di tener alta la temperatura del divertore con riduzione pressoché totale dei fenomeni di erosione, ecc.).

Per questi importanti motivi è stato avviato il programma specifico finalizzato alla definizione ed al progetto di del DTT (Divertor Tokamak



Test). Questo tokamak è chiamato ad effettuare esperimenti in scala in grado di ricercare soluzioni alternative per il divertore in grado di integrarsi efficacemente con le specifiche condizioni fisiche e le soluzioni tecnologiche previste in DEMO.

4. Ruolo ed obiettivi

Il ruolo del progetto DTT nella ricerca europea sulla fusione

Una delle principali tappe verso la realizzazione di un reattore nucleare a fusione è costituita dallo sviluppo di una soluzione affidabile al problema dello smaltimento del calore e delle particelle prodotte dalla reazione di fusione.

La soluzione di adottare un divertore convenzionale (che sarà testato in ITER) potrebbe essere non estrapolabile a DEMO. Allo scopo di mitigare questo rischio, occorre sviluppare soluzioni alternative.

Alcune soluzioni alternative, come ad esempio il *Cooled liquid Li limiter* in FTU [5], il *Super-X divertor* in MAST-U [6], lo *Snowflake divertor* in TCV [7], sono in fase di sperimentazione in macchine attualmente operative, ma l'estrapolazione dalle macchine attuali al reattore DEMO è considerata non affidabile [8].

Il progetto DTT è parte integrante del programma generale europeo di ricerca sulla fusione, unitamente a molte attività di R&S (esperimenti di fisica del plasma, strumenti di modellistica, sviluppi tecnologici di divertori a metalli liquidi, ecc.).

La missione di DTT è di contribuire a colmare il gap oggi esistente fra le attuali macchine sperimentali ed il reattore DEMO. In particolare essa è chiamata a portare le nuove soluzioni ad un sufficiente livello di robustezza ed integrazione fra aspetti fisici e tecnologici di interesse del reattore da fusione.

Gli obiettivi principali del progetto DTT

Con la macchina DTT sarà possibile provare la fattibilità fisica e tecnologica di vari concetti di divertore in condizioni estrapolabili con affidabilità alle condizioni caratteristiche di DEMO. In questo modo sarà possibile integrare le conoscenze su concetti di divertore alternativi sperimentati sulle macchine esistenti con quelle necessarie all'implementazione su DEMO.

I principali obiettivi di DTT, così come riportati in alcuni documenti ufficiali europei [1], [9], possono essere sintetizzati come segue:

- dimostrare che il sistema di rimozione del calore proposto per DEMO è capace di sopportare il forte carico termico che si avrebbe nel caso che frazione di potenza irradiata si rivelasse inferiore al previsto;
- arricchire le conoscenze sperimentali nel campo dello smaltimento del calore e delle particelle con quelle non ottenibili con le macchine esistenti;
- dimostrare che le possibili soluzioni alternative o complementari per il divertore (come ad es. le configurazioni magnetiche avanzate o i metalli liquidi) potranno essere adottate in DEMO.

In particolare sarà possibile valutare se:

- le configurazioni magnetiche alternative di divertore sono accettabili sia in termini di rimozione del calore, sia in termini di prestazioni del nucleo del plasma;
- le configurazioni magnetiche alternative di divertore sono compatibili con i vincoli ingegneristici delle bobine di campo magnetico poloidale;
- i vari possibili concetti di divertore sono compatibili con i vincoli tecnologici di DEMO;
- i divertori basati sull'utilizzo dei metalli liquidi sono compatibili con le caratteristiche della frontiera di un plasma termonucleare;
- i metalli liquidi sono applicabili a DEMO.

5. La proposta DTT

Le motivazioni ed il contesto del progetto DTT

EUROfusion, il Consorzio europeo per lo sviluppo dell'energia da fusione, gestisce le attività europee di ricerca sulla fusione per conto dell'EURATOM. Una parte significativa del programma EUROfusion è dedicato alle attività legate a DTT.

Ben due progetti (Work Package) del programma EUROfusion 2014-2018 sono dedicate allo studio di soluzioni alternative per il problema "power exhaust" in DEMO. I fondi stanziati per questi studi, nel quinquennio, ammontano ad oltre 60 Meuro.

L'Italia gioca un ruolo rilevante e molto apprezzato nella ricerca internazionale sulla fusione. Il suo ruolo è andato via via rafforzandosi grazie allo sforzo coordinato fra enti di ricerca, università ed industria, basato sulla attenzione per gli aspetti innovativi; tale cooperazione ha dato luogo ad un circolo virtuoso in grado di contribuire fortemente allo sviluppo del paese.

La ricerca sulla fusione in Italia è condotta sotto l'egida del MISE (Ministero dello Sviluppo Economico) e del MIUR (Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca).

Gli enti e centri di ricerca che principalmente contribuiscono alla ricerca italiana sulla fusione sono l'ENEA a Frascati, il Consorzio RFX a Padova, l'Istituto di Fisica del Plasma del CNR a Milano, il Consorzio CREATE a Napoli (che coordina alcune università del Sud Italia), l'INFN a Legnaro, oltre ad altre università italiane (Politecnici di Torino e Milano, Università di Milano Bicocca, Roma "La Sapienza", Roma "Tor Vergata" e Roma Tre; Cagliari, Catania, Palermo, Pisa e Tuscia). I gruppi di ricerca afferenti a detti enti hanno collaborato per molti anni nell'ambito dell'Associazione EURATOM-ENEA e di EFDA. A partire dal 2014 la collaborazione ha luogo nell'ambito dell'EUROfusion Consortium Agreement.

Dal punto di vista sperimentale, si segnalano i significativi risultati raggiunti a Frascati dalla macchina FTU (nata come evoluzione del precedente tokamak FT e che per molti ha detenuto il record mondiale sui parametri prestazionali dei tokamak e che ora costituisce uno dei pochi banchi di prova per l'utilizzo del litio nella prima parte della macchina) e a Padova dalla macchina RFX-mod (unico dispositivo in grado di studiare, grazie

all'uso di un sofisticato sistema di controllo in controreazione, configurazioni RFP con correnti di plasma fino a 2 MA).

Inoltre i ricercatori italiani hanno dato un contributo importante e continuativo alla progettazione e alle campagne sperimentali del JET a Culham e, sin dal suo avvio, alla progettazione e costruzione di ITER.

L'Italia è anche impegnata nella costruzione, a Padova, di un apparato sperimentale, in scala 1:1, per gli iniettori di neutri in ITER. I ricercatori italiani giocano anche un ruolo rilevante nella "Fusion Road Map" europea, con diretta responsabilità di leadership di progetti (Task e Work Package) del programma Horizon 2020.

Infine, occorre segnalare la forte integrazione fra i laboratori nazionali e l'industria italiana, grazie anche alla quale una larghissima parte delle commesse industriali (circa il 60%) per la costruzione di ITER sono state aggiudicate all'industria italiana.

In considerazione dell'ampiezza ed incisività della ricerca sulla fusione in Italia e del fatto che la rimozione del calore costituisce la sfida più importante per la realizzazione di un reattore a fusione a confinamento magnetico, il Governo Italiano ha proposto di dedicare fondi specifici per la costruzione di un esperimento dedicato a queste problematiche.

La proposta, con un budget di 500 MEUR, fa parte dell'insieme dei progetti selezionati per il cosiddetto piano Juncker (EFSI) da 315 miliardi di Euro (<http://www.eib.org/about/invest-eu/index.htm>; http://ec.europa.eu/priorities/jobs-growth-investment/plan/docs/project-list_part-1_en.pdf; http://ec.europa.eu/priorities/jobs-growth-investment/plan/index_en.htm).

La proposta DTT "Construction of a Divertor Tokamak Test Facility for fusion energy research" è nella lista "Knowledge, SMEs and the digital economy" presentata dall'ENEA e dal Ministero dello Sviluppo Economico.

A Marzo 2015 la General Assembly di EUROfusion ha accolto con favore l'opportunità di acquisire risorse aggiuntive per DTT, suggerendo che le attività di studio preliminare, la definizione degli obiettivi e l'attività progettuale abbia luogo in stretto coordinamento con lo sviluppo dei Work Package WPDTT1 e WPDTT2 del programma EUROfusion.

La rilevanza del progetto DTT è tanto più grande quanto più ci si avvicina ai parametri e alle dimensioni di DEMO. Tuttavia, le dimensioni e la conseguente realizzazione del progetto devono essere compatibili con i

vincoli temporali della Road Map. In questo documento si mostra come DTT possa raggiungere i propri obiettivi con un budget di 500 MEUR (fondi richiesti dal governo Italiano), oltre alle risorse finanziarie destinate al WorkPackage WPDTT2 di EUROfusion nel quinquennio 2014-2018 [11].

I parametri di DTT

Le scelte progettuali per la costruzione di una macchina in scala ridotta rispetto a DEMO devono privilegiare lo scopo principale del progetto, che è lo studio dei problemi connessi allo "Scrape Off Layer" (SOL) e alla regione del divertore. Questo approccio ha ispirato la definizione dei principali parametri della macchina.

Una macchina con un raggio maggiore di plasma di circa 2.15 m è in grado di garantire una regione di divertore sufficientemente ampia da consentire lo studio di diverse configurazioni magnetiche e la sperimentazione di diversi materiali, inclusi i metalli liquidi.

Il valore relativamente elevato del campo toroidale (6 T) darà la possibilità di ottenere prestazioni di plasma (misurate principalmente dal rapporto tra potenza e raggio maggiore di circa 15 MW/m) non lontane da quelle di DEMO.

Il progetto ingegneristico di dettaglio sarà frutto di una collaborazione internazionale alla quale è atteso il contributo di vari laboratori europei.

6. Programma Scientifico

Il programma scientifico di DTT è descritto in dettaglio nel Cap. 3 del report "*DTT Divertor Tokamak Test facility. Project Proposal*" pubblicato da ENEA nel luglio 2015, ISBN: 978-88-8286-318-0 (nel seguito anche indicato come "*DTT Report*"). Una prima fase sarà finalizzata alla realizzazione e all'installazione dei vari componenti della macchina. In una successiva fase di circa un anno e mezzo, la macchina dovrà raggiungere l'operatività in modalità *robust H-mode* (cioè regimi operativi caratterizzati da configurazioni di tipo divertore a singolo nullo, alle massime prestazioni e con tutta la potenza addizionale installata). Le fasi successive saranno riservate al test di soluzioni alternative di divertore, incluse le configurazioni magnetiche innovative e le tecnologie a metallo liquido.

Il DTT prevede un insieme di avvolgimenti di campo poloidale capaci di garantire un'ampia gamma di configurazioni magnetiche, tra le quali le configurazioni di tipo XD [17], le Snowflake (SF) [18] e quelle a doppio punto di nullo (Figura 5).

Il sistema magnetico poloidale prevede anche alcuni avvolgimenti interni alla camera da vuoto che tra l'altro consentono di modificare localmente le configurazioni magnetiche nella zona del divertore.

La Figura 6 mostra la sezione poloidale della macchina, compreso il sistema poloidale; il plasma è caratterizzato da un equilibrio "*Single Null*", ad alto β , con corrente di plasma $I_p=6$ MA. Variando la corrente dei piccoli avvolgimenti inferiori (ciascuno con corrente massima di circa 50kA) si ottengono le configurazioni riportate al centro e a destra. In Figura 6b si vede una configurazione "quasi-SF" con caratteristiche XD; la Figura 6c mostra invece una particolare configurazione caratterizzata da una ampia zona a valore di campo magnetico poloidale basso e uniforme.

Il progetto lascia un ampio spazio nella parte inferiore della macchina per poter installare agevolmente divertori realizzati con la tecnologia del metallo liquido [20].

Il sistema poloidale è progettato per avere plasmi anche con configurazioni a doppio *punto di nullo*.

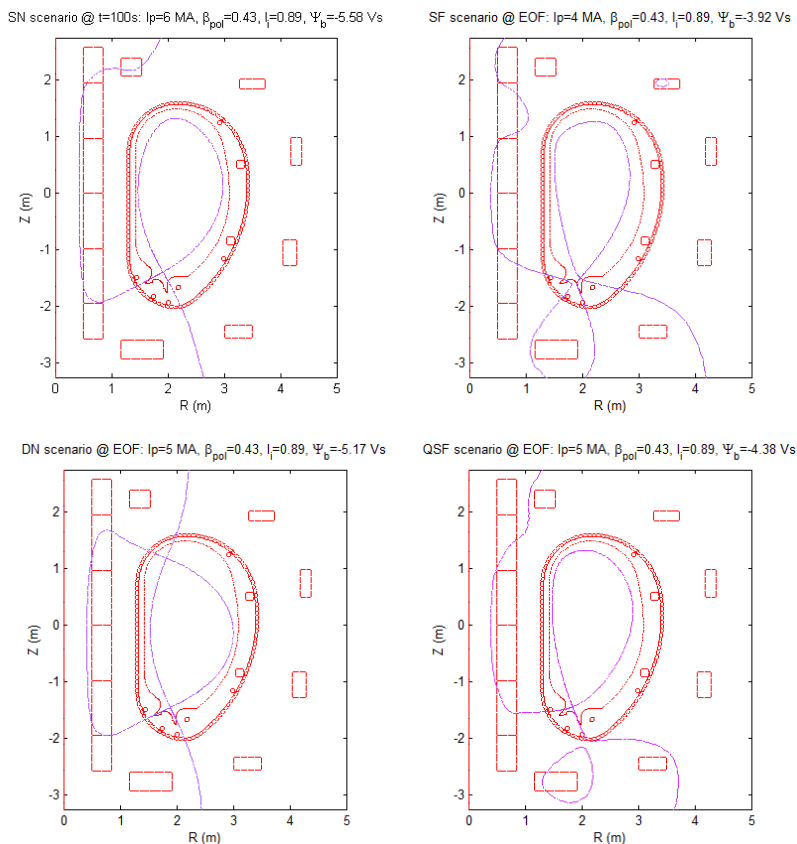
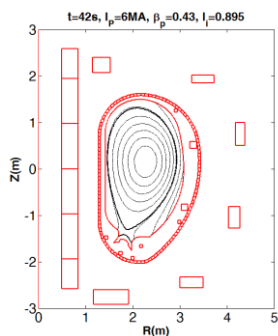


Figura 5: Configurazioni magnetiche convenzionali ed alternative che possono essere realizzate con gli avvolgimenti di campo poloidale del DTT.

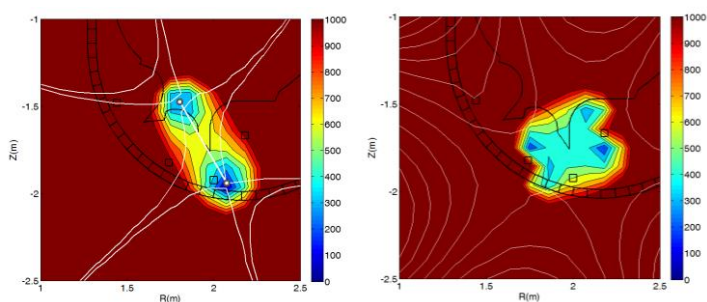
Tutti gli avvolgimenti esterni (compresi quelli di campo toroidale) utilizzano la tecnologia a superconduttore; questo consente di avere scariche di durata dell'ordine dei 100 s, limitate esclusivamente dal consumo di flusso resistivo nel plasma (nell'ipotesi di non ricorrere al supporto di "current drive"). Il sistema di riscaldamento aggiuntivo utilizza un insieme integrato di varie tecnologie; una possibile soluzione operativa può prevedere circa 15MW ECRH (Electron Cyclotron Radiofrequency Heating) a 170 GHz; circa 15MW ICRH (Ion Cyclotron Radiofrequency Heating) a 60-90 MHz; ≈ 15 MW NBI (Neutral Beam Injection) a 300 keV. La decisione

finale è rinviata ad una fase avanzata del programma scientifico (ulteriori dettagli sono forniti nel Cap. 3 del citato *DTT Report*).

L'ambizioso programma del DTT si sviluppa in un arco di vari anni. Durante la prima fase di operazioni sarà disponibile una potenza addizionale di 15 MW di ICRH e di 10 MW di ECRH. Ulteriori livelli di potenza, fino ad un ammontare complessivo di 45 MW, saranno installate traendo vantaggio dalle tecnologie disponibili nelle varie fasi del progetto. Il progetto prevede il testing di diversi concetti di divertore affinché si possa determinare la configurazione magnetica ottima con relativo disegno del divertore, con l'ulteriore obiettivo di ottimizzare la soluzione basata sulla tecnologia del metallo liquido.



(a)



(b)

(c)

Figura 6: a) Equilibrio standard di tipo "Sinle Null" (SN, con un solo X point); b) Configurazione con due nulli vicini e relativa configurazione XD (con flusso magnetico che si espande sulle piastre del divertore); c) configurazione tipo "Snowflake" (SF) con ampia zona a basso valore del campo magnetico polidale

7. Basi del Progetto e Capacità Operativa

La Figura 7 mostra una rappresentazione qualitativa del DTT.

Tutte le configurazioni di plasma previste dal programma scientifico (sia quelli standard a singolo nullo e sia quelle avanzate) rispettano i seguenti vincoli:

- distanza minima di 40 mm tra l'ultima superficie chiusa di plasma e prima parete per minimizzare l'interazione tra plasma e camera da vuoto; difatti (si veda il Cap. 3 del citato *DTT Report*) la lunghezza di decadimento della potenza a 6 MA nella parte equatoriale esterna è circa 2 mm;
- parametri di forma del plasma analoghi a quelli di DEMO: rapporto di aspetto $R/a \approx 3.1$, elongazione $k \approx 1.76$, triangolarità $\langle \delta \rangle \approx 0.35$;
- scarica di durata maggiore di 100 s (flusso totale disponibile di circa 45 Vs; variazione di flusso del solenoide centrale di circa 35 Vs).

Tali esigenze hanno suggerito l'utilizzo di avvolgimenti superconduttori; nel dettaglio il sistema magnetico comprende:

- sistema magnetico toroidale (TF coils): 18 avvolgimenti: B_{peak} : 12.0 T, B_{plasma} : 6.0 T, 65 MAT;
- solenoide centrale (CS): 6 avvolgimenti: B_{peak} : 12.5 T, $\sum_k |N_{k|k}| = 51$ MAT; flusso poloidale disponibile: ± 17.6 Vs;
- sistema magnetico poloidale (PF coils): 6 avvolgimenti: B_{peak} : 4.0 T, $\sum_k |N_{k|k}| = 21$ MAT.

Il sistema poloidale include anche otto avvolgimenti in rame interni alla camera da vuoto (*Vacuum Vessel*, VV). In particolare:

- due avvolgimenti per il controllo e la stabilizzazione radiale e verticale;
- quattro dei restanti sei per il controllo magnetico del SOL nella zona del divertore.

Per perseguire le finalità del programma, particolare attenzione è stata riservata alla diagnostica e al controllo, specialmente negli aspetti specifici del controllo del plasma nella regione del divertore, avendo comunque presente l'esigenza di compatibilità con le condizioni operative previste per DEMO.

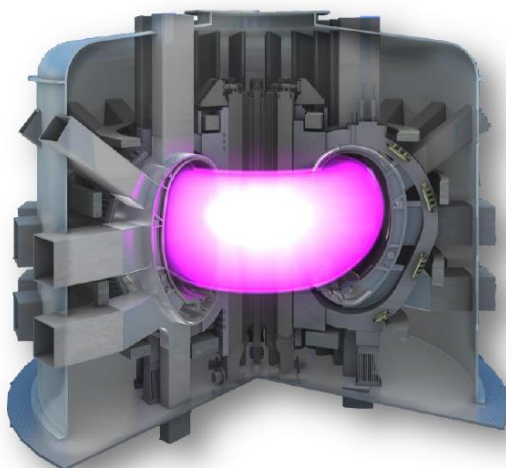
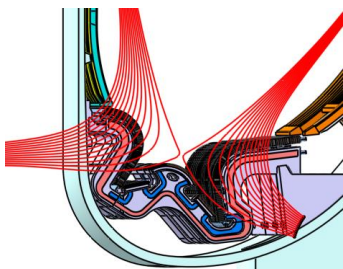


Figura 7: Rappresentazione qualitativa del DTT.

Il progetto della camera da vuoto (*Vacuum Vessel, VV*) prevede una parete di INCONEL 625. I 18 settori sono saldati tra loro. Lo spessore massimo della parete è di 35 mm; ogni settore prevede 5 porte caratterizzate da uno spessore di 25 mm.

La prima parete è raffreddata da un fascio di tubi ricoperti da uno strato di tungsteno. Lo strato di tungsteno è spesso circa 5 mm; lo strato contenente le condutture coassiali per il raffreddamento ha uno spessore di 30 mm e il relativo supporto è fornito da una lastra posteriore di acciaio SS316LN spessa 30 mm.

L'obiettivo principale del programma DTT è il testing di vari concetti e configurazioni di divertore. Pertanto il progetto del VV, delle porte e del riscaldamento addizionale tiene conto dei vincoli legati alla sperimentazione di divertori a metallo liquido. Il progetto iniziale prevede un divertore in tungsteno, realizzato con moduli a forma di W, distribuiti lungo il VV; il disegno è pienamente compatibile con configurazioni magnetiche avanzate (Figura 8).



(a)



(b)

Figura 8: a) Un possibile diverettore di tungsteno, compatibile sia con la configurazione SN, sia con la configurazione SF; b) Limiter a litio liquido installato in FTU: potrà rappresentare un'ottima base di partenza per sviluppare un diverettore a litio liquido.

8. Costi e Tempi

La macchina dovrà essere operativa all'inizio del 2020 in modo da poter portare alla maturazione entro il 2030 almeno una soluzione alternativa utile per DEMO. La durata nominale della realizzazione della macchina dal "via libera" iniziale fino all'inizio della fase operativa è prevista in circa 7 anni. Coerentemente con la Road Map di EUROfusion, una tabella di marcia ragionevole richiede che le prime gare per forniture di componenti per DTT siano bandite entro il 2016.

L'attuazione del progetto DTT è una priorità assoluta per il mondo della ricerca Europea, in quanto rappresenta un elemento cruciale nella realizzazione del reattore DEMO.

Il programma scientifico DTT è stato incluso nella lista dei progetti proposti per un finanziamento da 500 Milioni di Euro nel quadro del "Programma Juncker" da 315 miliardi di Euro (EFSI: European Fund for Strategic Investments). La somma richiesta è compatibile con tabella dei costi di DTT riportata in forma sintetica in Tab. I e con maggiori dettagli nel Cap. 5 del citato *DTT Report*.

Tabella I
Tabella dei Costi di DTT (Sommario)

Voce di costo	Importo (M€)
Componenti della macchina	209
Alimentazioni elettriche dei magneti	60
Riscaldamento addizionale	92
Remote handling e raffreddamento	37
Diagnostica e controllo	11
Infrastrutture	25
Assemblaggio della macchina	10
Ricambi e imprevisti	25
Costo del personale	30
TOTALE	499

9. Scelta del sito ed impatto socio-economico.

Nella scelta del sito dove realizzare il programma, bisogna tenere conto della missione di "Laboratorio Europeo" del progetto. In questa prospettiva, sarà necessario tenere nella massima considerazione alcuni elementi di accessibilità e attrattività per il personale (ricercatori e ingegneri) che, provenendo da molti paesi europei ed extraeuropei, effettuerà la costruzione e promuoverà le sperimentazioni.

Il Cap. 5 del citato *DTT Report*, mostra la fattibilità e la robustezza della possibile -ma non esclusiva- scelta del sito dell'ENEA in Frascati. Esso difatti risponde alle varie specifiche tecniche della localizzazione sin dall'inizio della prevista costruzione nel 2016 e, inoltre, rappresenta un sito attrattivo per la comunità scientifica Europea.

La realizzazione del progetto risulterà utile anche da altri punti di vista, quali:

- gli aspetti socio-economici del territorio che ospita il dispositivo
- gli elementi tecnologici e scientifici sui quali potrà operare la comunità Europea della Fusione, che avrà per alcuni decenni una preziosa occasione di maturare esperienze nella costruzione e sperimentazione su un dispositivo cruciale per il reattore DEMO.

Difatti l'esperienza ormai consolidata negli ultimi decenni dimostra che la realizzazione di grossi progetti di ricerca internazionali ha una ampia e positiva ricaduta socio-economica sul territorio ospitante. Si consideri ad esempio l'impatto del JET e, più recentemente, quello della progettazione e costruzione di ITER. La realizzazione di grandi infrastrutture di ricerca fornisce l'occasione di utilizzare l'aumento delle conoscenze come un volano per lo sviluppo sinergico degli aspetti tecnici ed economici del territorio circostante. Estrapolando le esperienze maturate, è possibile enucleare alcuni elementi positivi attesi per il territorio circostante durante la fase della costruzione e quella operazioni della macchina. Le principali ricadute riguardano: i) i livelli occupazionali; ii) i trasferimenti tecnologici a beneficio della industria; iii) l'impatto economico sugli esercizi commerciali e, in generale, il livello di benessere della popolazione; iv) il trasferimento delle conoscenze e della capacità innovativa a favore di laboratori scientifici e università del territorio.

10. Riferimenti

- [1] Fusion Electricity – A roadmap to the realisation of fusion energy, November 2012 (http://users.euro-fusion.org/iterphysicswiki/images/9/9b/EFDA_Fusion_Roadmap_2M8JBG_v1_0.pdf)
- [2] <http://www.iter.org/>
- [3] Wesson J., “Tokamak”, Oxford University Press 2011 – 4th Edition
- [4] <https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>
- [5] Mazzitelli G. et al., Nucl. Fusion, 51, 073006, 2011
- [6] http://www.ccf.ac.uk/mast_upgrade_project.aspx
- [7] Reimerdes H., et al., Plasma Phys. Control. Fusion 55 (2013) 124027.
- [8] <https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>
- [9] Report of the STAC Ad Hoc Group on 'A strategy to address exhaust issues in the EU Fusion programme Phase I', Final version, 10.7.201.
- [10] <https://www.create.unina.it/dtt2>
- [11] Grant agreement no: 633053 - EUROfusion - "Implementation of activities described in the Roadmap to Fusion during Horizon 2020 through a Joint programme of the members of the EUROfusion consortium"
- [12] Lackner K., Com. Plas. Phys. Control. Fusion, 15, 359 (1994)
- [13] Hutchinson I. H., Nucl. Fus., 36, 783 (1996).
- [14] Whyte D. G. Fusion Eng. Des. 87, 234 (2012)
- [15] Lackner K., Fus. Scien. and Techn., 54, 989 (2008)
- [16] Pizzuto A., Nucl. Fusion 50, 095005 (2010)
- [17] Kotschenreuther M., et al., Phys. Plasmas 20 (2013) 102507
- [18] Ryutov D.D., Phys. Plasmas 14 (2007) 064502
- [19] Calabro' G., et al., to appear NF 2015 NF-100496.R2
- [20] M. Ono et al., 2012 Nucl. Fusion 52 037001 doi:10.1088/0029-5515/52/3/037001
- [21] D. Campbell, " ITER Research Needs", EUROfusion ITER Physics AWP-2016 Preparation Meeting, Garching, 6-8 July 2015



ISBN: 978-88-8286-320-3