

I componenti interfacciati al plasma: divertore, prima parete

Bruno Riccardi e il team DTT- In Vessel

DTT c/o C.R. ENEA Frascati

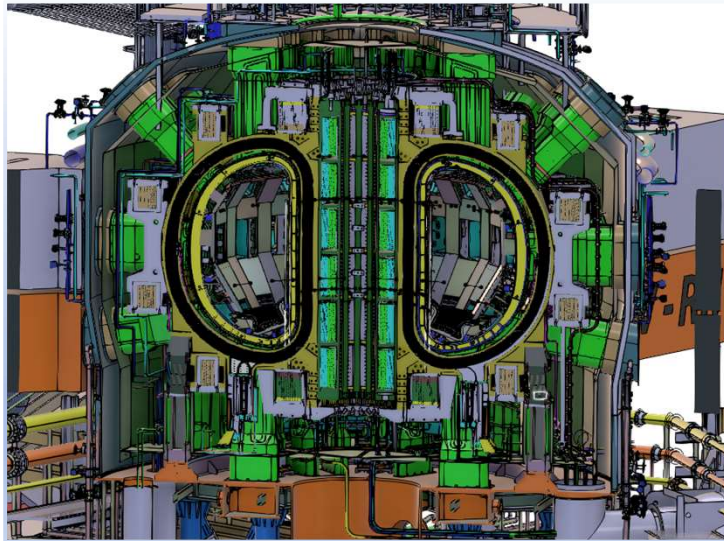
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Seminario - Gli aspetti progettuali di fisica della fusione nucleare e della
sicurezza del progetto DTT - Divertor Tokamak Test facility

Giovedì 14 marzo 2024

Aula Marino - F50

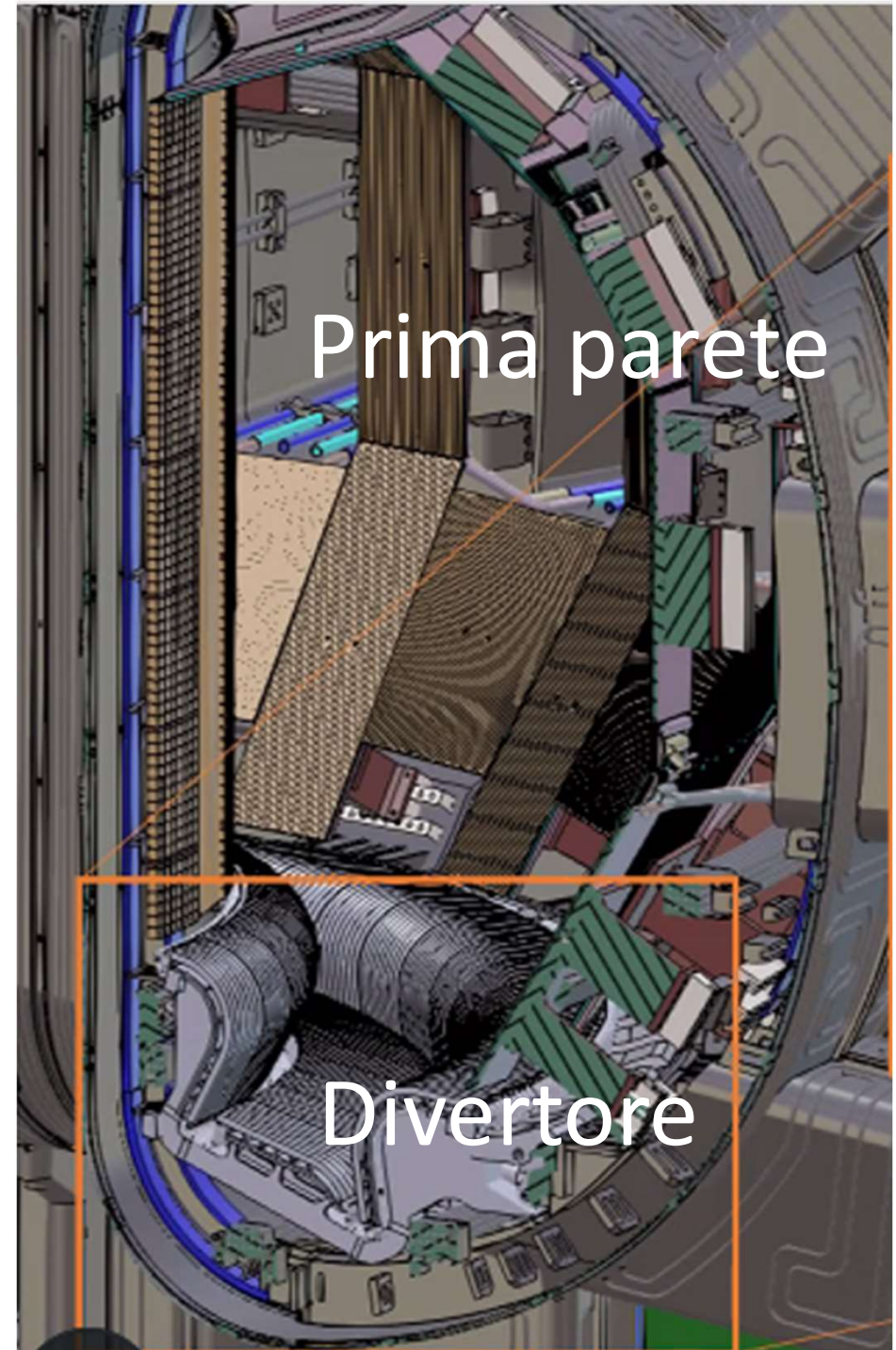
DTT Consortium (DTT S.C.a r.l. Via E. Fermi 45 I-00044 Frascati (Roma) Italy)



In Vessel-Plasma Facing Components (IV-PFC)

Componenti situati all'interno della camera da vuoto che interfacciano direttamente il plasma termonucleare

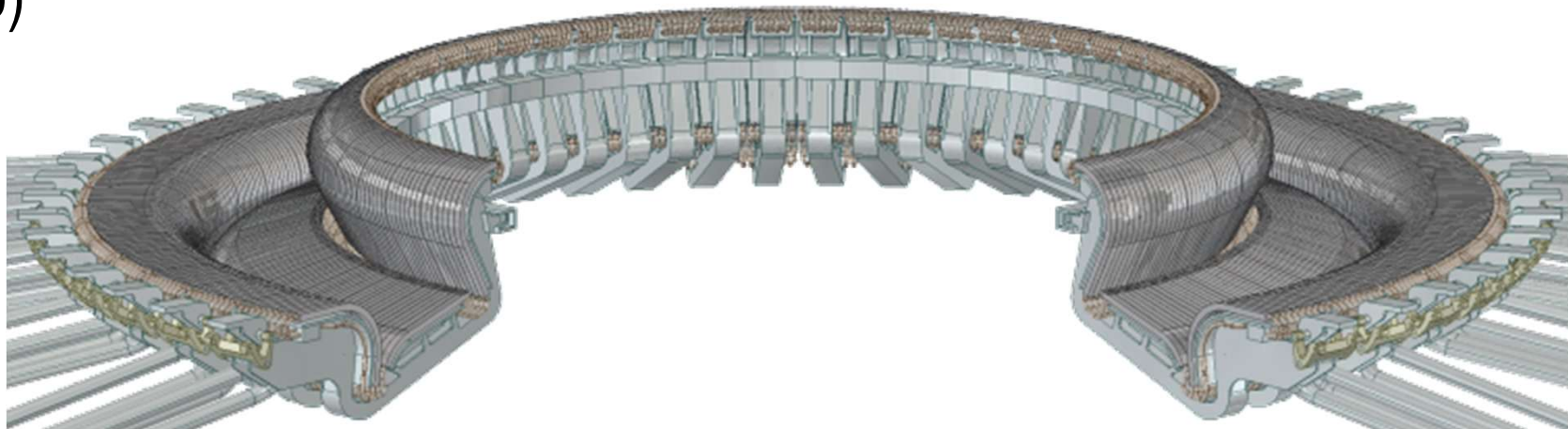
Divertore, Prima parete



La funzione del divertore è quella di assorbire parte della potenza di plasma (potenza radiativa e particellare) in una regione lontana dal centro plasma al fine di minimizzare il contenuto di impurezze nel plasma stesso.

Il divertore provvede a schermare la camera da vuoto ed i magneti nella regione del divertore nonché altri componenti in-vessel.

Il divertore di DTT si compone di 54 moduli (3 per ogni settore di camera da vuoto)



Divertore (2)

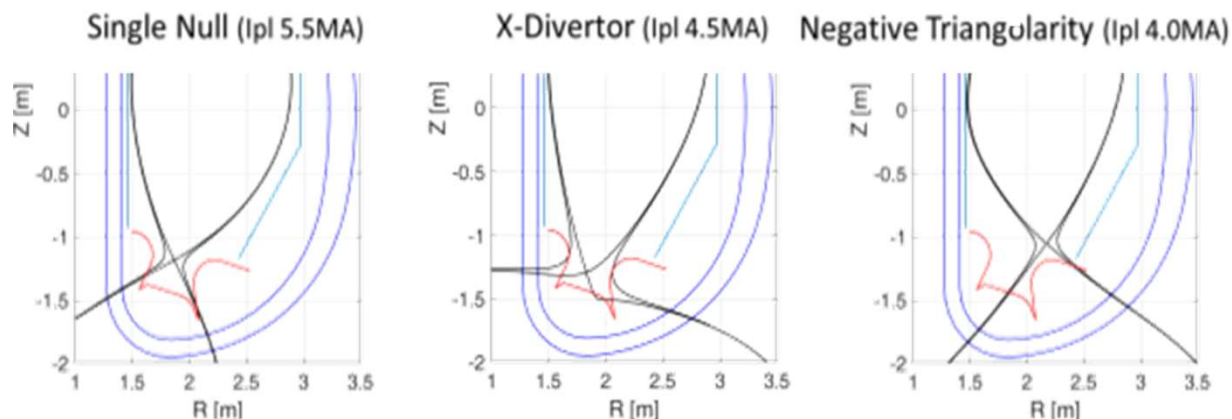


Progetto flessibile → compatibilità con diverse configurazioni di plasma

Layout : struttura di supporto (cassetta) e 3 componenti target

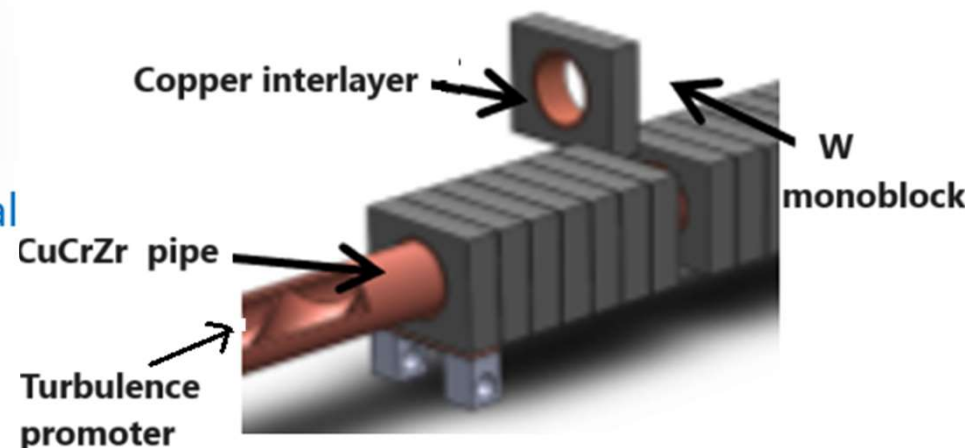
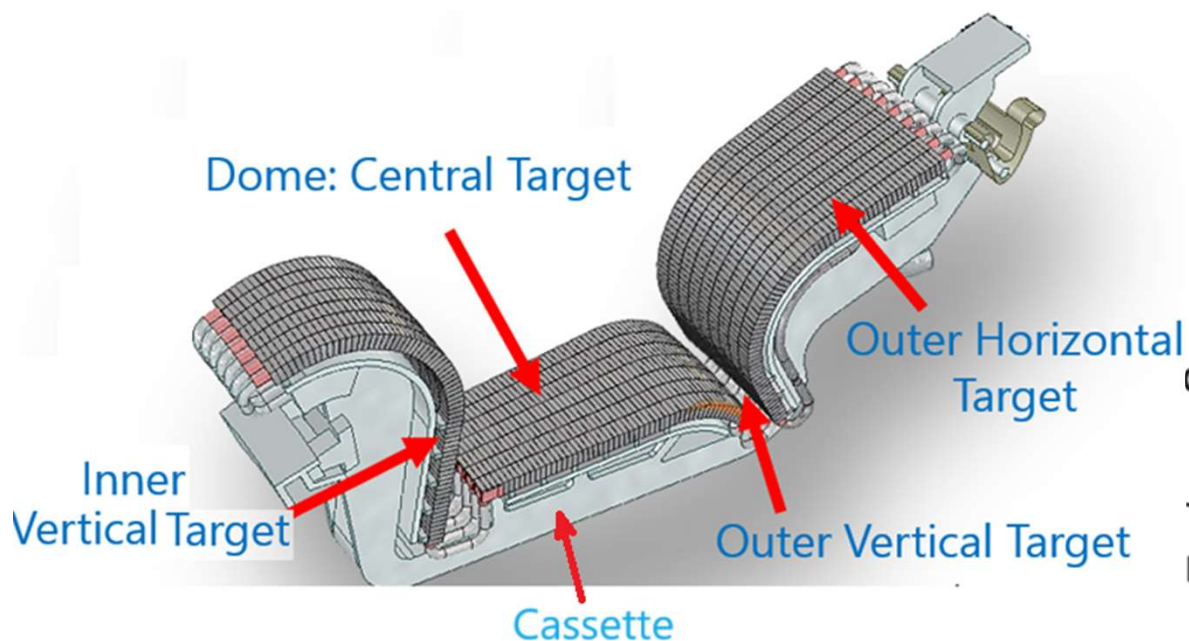
Cassetta : struttura saldata in acciaio inox AISI 316LN

Target array di tubi (ID/OD 12/15 mm) rivestiti da tegole di tungsteno



Materiali principali

Tungsteno puro massivo (protezione)
Rame Cromo Zirconio (tubi raffreddamento)
Rame puro
Acciaio inox AISI 316 LN
Bronzo alluminio

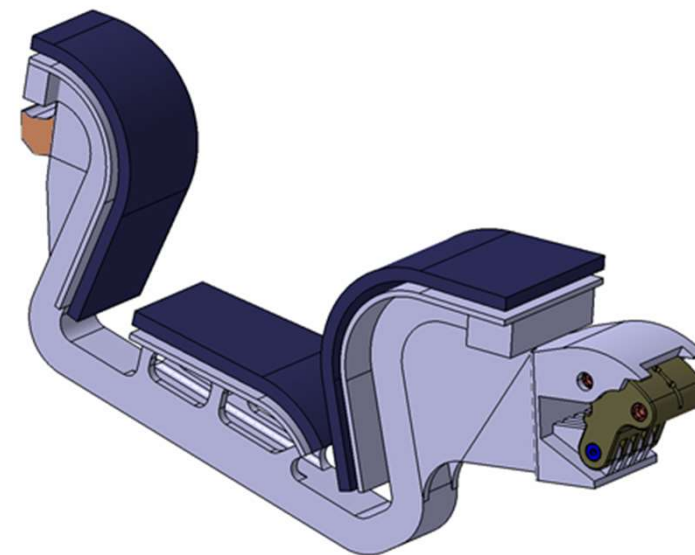


S.Roccella ISFNT 2023

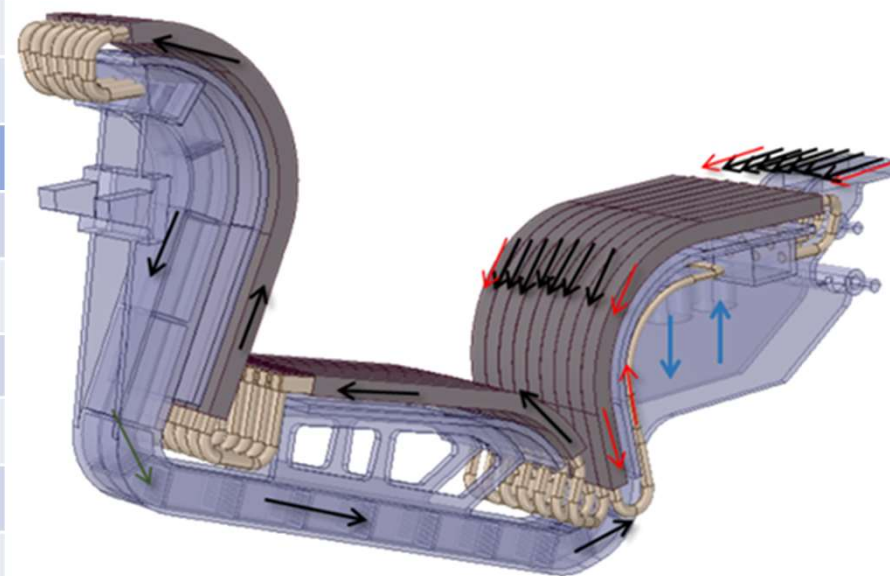
Divertore (3)



Parametri operativi divertore	
Potenza termica nominale max	32 MW
Flusso termico superficiale	
Stazionario (7000 cicli)	10 MW/m ²
Transitorio (10 s, 700 cicli)	20 MW/m ²
Margine per il flusso termico critico	> 1.4
Riscaldamento neutronico totale	~ 10 kW
Danneggiamento neutronico	< 2.10 ⁻⁴ dpa
Carico termico (disruzione plasma)	ordine MJ/m ² 3ms
Carico EM (VDE slow)	ordine 200 kN
Divertor total mass flow rate	577 Kg/s
PFU tube cooling speed	11 m/s
Divertor inlet water temperature	30 °C ÷ 130 °C
Strong baking water temperature	200°C a 5 MPa
Light baking water temperature	130°C a 5 MPa
Divertor inlet water pressure	5 MPa
Divertor design pressure	5 MPa
Divertor total pressure drop	≤ 2 MPa



Sistema di aggancio



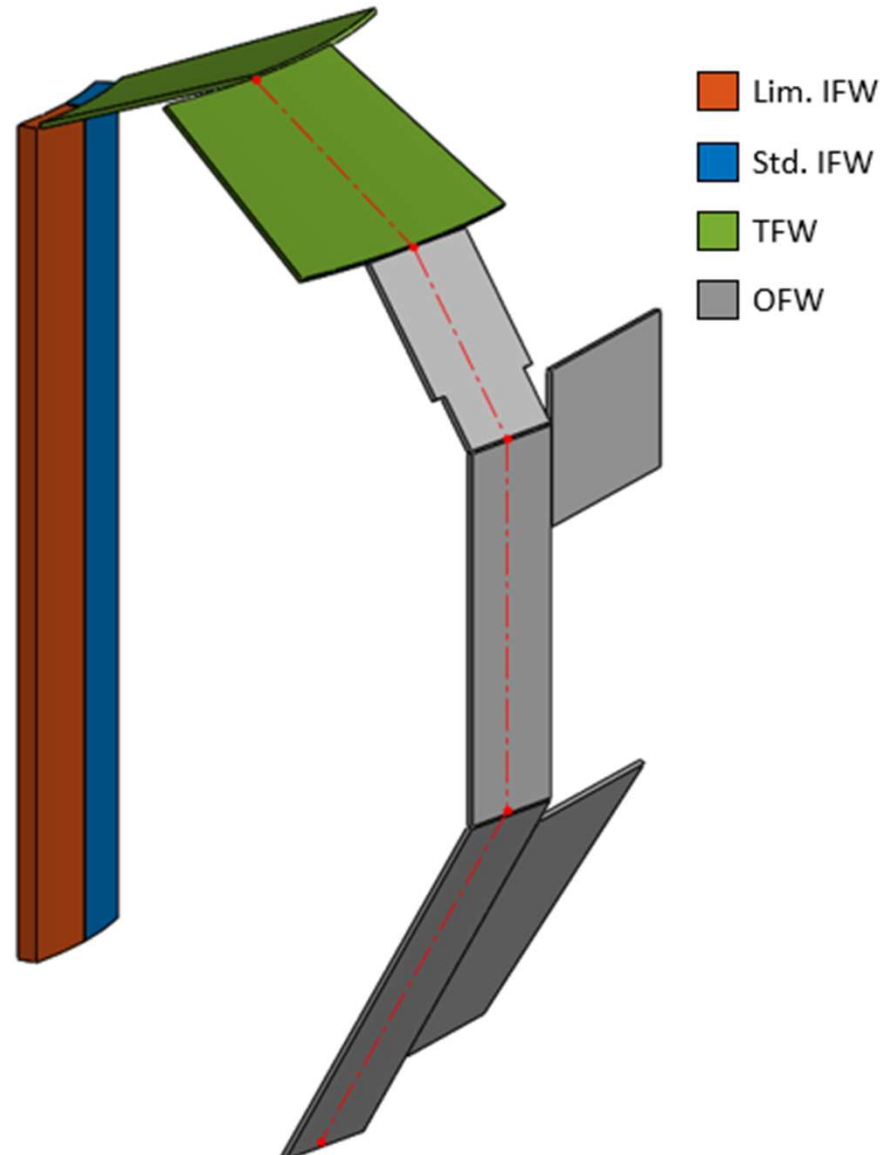
Circuito idraulico

Prima parete (1)

La prima parete di DTT è un sistema di schermi termici raffreddati attivamente (acqua pressurizzata).

Ha per obiettivo lo schermaggio della camera da vuoto e degli altri componenti in-vessel nei confronti del flusso termico e particellare.

Sono previste diverse tipologie di schermi in relazione alla posizione: **interno, top, esterno**

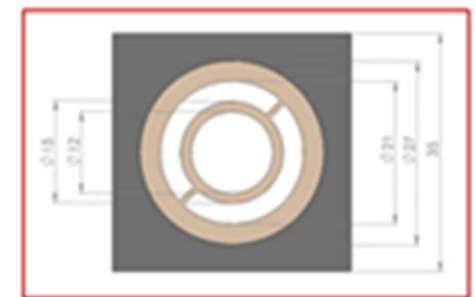
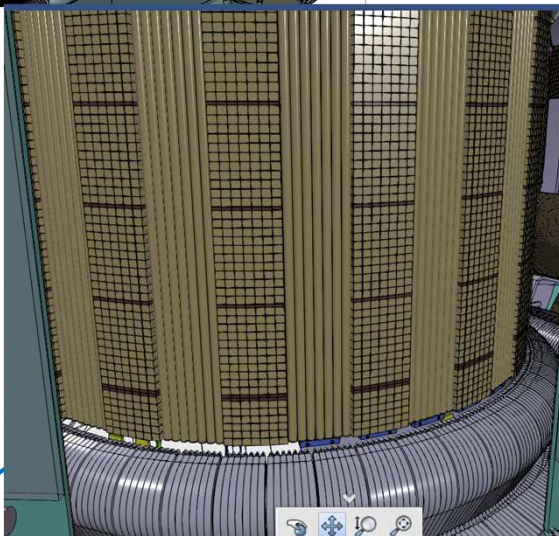
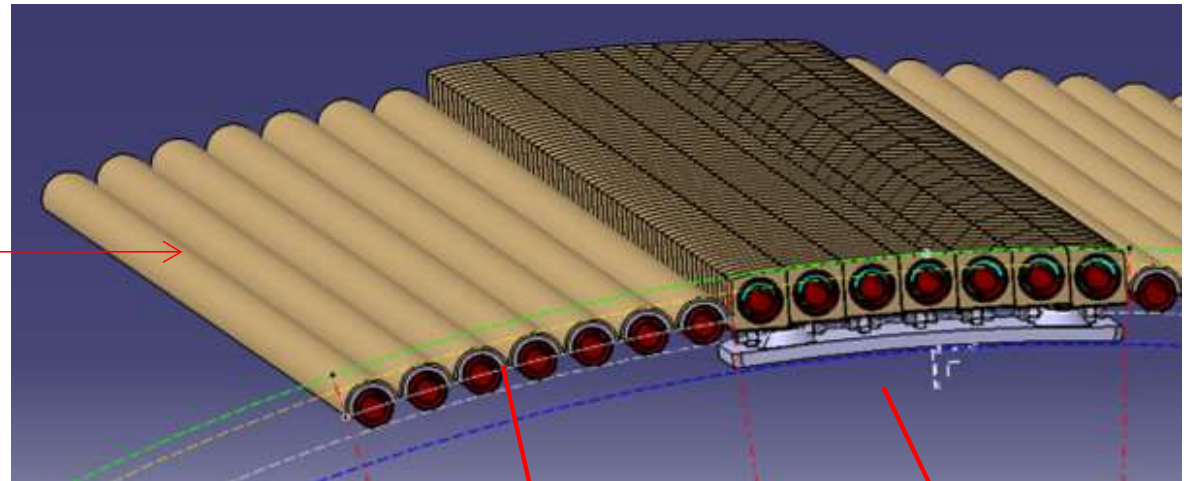
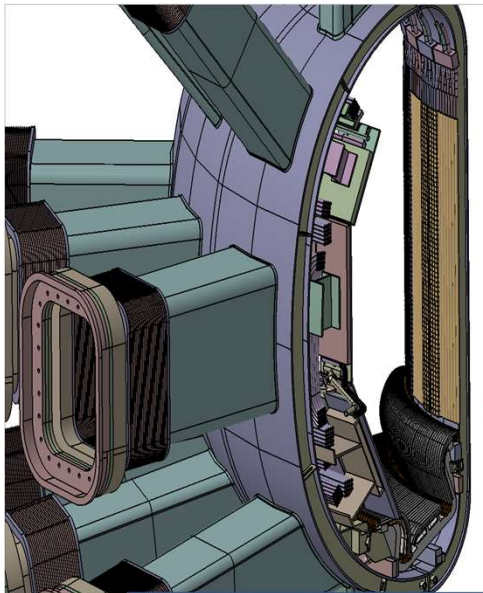


Prima parete (2)



La Prima parete interna è composta da due tipi di fasce tubiere a tubi coassiali:

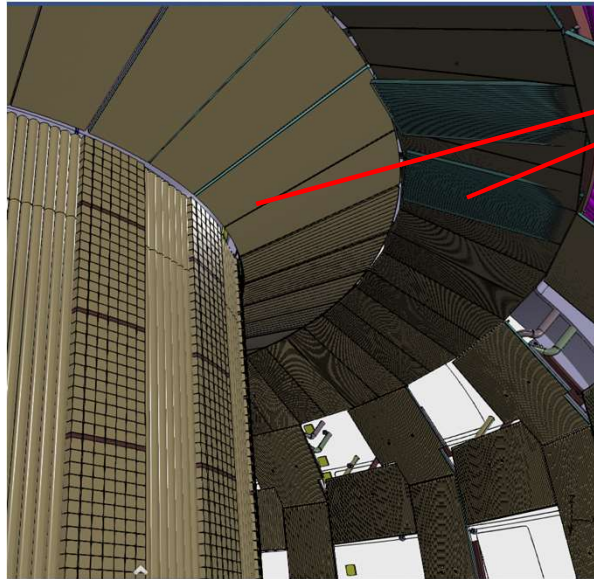
1. Limiter (tubi in rame-cromo-zirconio rivestiti di tegole di tungsteno).
2. Standard (tubi di acciaio AISI 316L rivestiti da tungsteno plasma spray)



Prima parete (3)

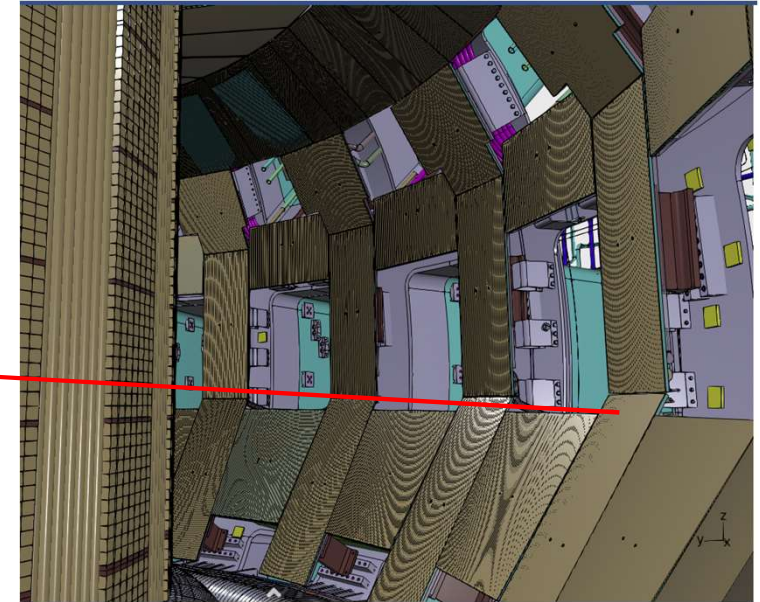


La prima parete TOP e quella ESTERNA sono costituite da pannelli di acciaio AISI 316 LN provvisti di canali di raffreddamento a sezione quadrata

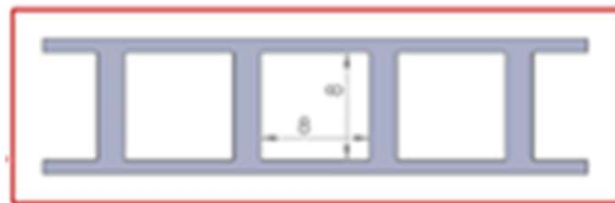


Prima parete TOP
2 moduli per settore

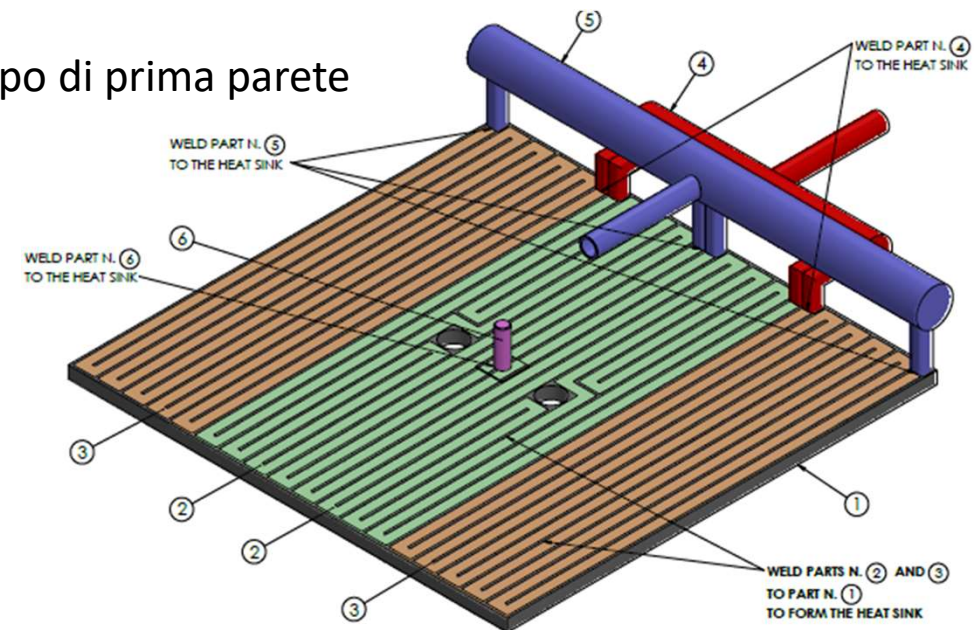
Prima parete ESTERNA
5 moduli per settore



Schema di prototipo di prima parete



Steel plates with square cooling channels





Prima parete (4)

Parametri operativi prima parete	
Potenza termica massima smaltita	32 MW
Flusso termico superficiale	
Limiter	tentat. $\sim 5 \text{ MW/m}^2$
pannelli	0.5 MW/m^2
Margine per il flusso termico critico (limiter)	> 1.4
Riscaldamento neutronico totale	$\sim 10 \text{ kW}$
Danneggiamento neutronico	$< 2 \cdot 10^{-4} \text{ dpa}$
Carico termico in disruzione di plasma	alcuni MJ/m^2 in 3 ms
Portata massica totale -Prima parete	110 Kg/s
PFU tube cooling speed	3 m/s limiter, 5-6m/s pannelli
Temperatura acqua ingresso	60 °C
Temperatura acqua -Strong baking	200°C a 4 Mpa
Temperatura acqua -Light baking	130°C a 4 Mpa
Pressione ingresso acqua	4 MPa
Pressione di progetto Prima parete	4 MPa
Perdita di carico totale	$\leq 1 \text{ MPa}$

- Componenti “Non-Safety Important”
 - Non hanno funzione di contenimento in se
 - Eventuali perdite non hanno conseguenze sul contenimento globale
 - Comunque il disegno dei PFC deve:
 - Tendere al ridurre al minimo il rischio di perdite di refrigerante
 - Non danneggiare la tenuta della camera da vuoto
- Classe di Qualità : 1 (Top)
- Progettazione adatta per installazione e sostituzione remotizzata
- Metodologia di progettazione e sviluppo
 - **Design by experiment** per i componenti ad alto flusso termico (limiter, target divertore)
 - **Design by calculation** (Regole di verifica strutturale : ITER- SDC-IC)
- Regole di **fabbricazione** per parti strutturali convenzionali : ASME, EN

Design by experiment: prove ad alto flusso termico (1)

Prove di fatica termomeccanica condotte tramite bombardamento ionico o elettronico.

Obiettivo :

- qualificare la resistenza a fatica termomeccanica della **giunzione rame-cromo-zirconio / tungsteno**
- determinare il flusso termico critico

Le prove vanno eseguite su campioni in scala ridotta e prototipi in scala 1:1



Campioni del target del divertore
prodotti da ENEA Frascati

Tipiche condizioni di prova a fatica termomeccanica:

$$T_{H_2O} = 60^{\circ}\text{C}, v_{H_2O} = 11 \text{ m/s}$$

Flusso termico fino a 20 MW/m^2

ciclo termico: 10s ON 10s OFF

Design by experiment: prove ad alto flusso termico (2)

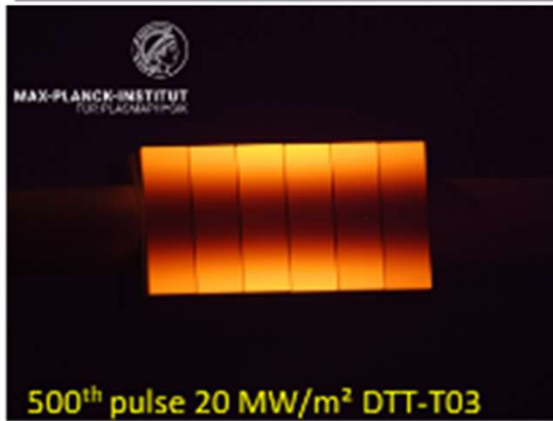
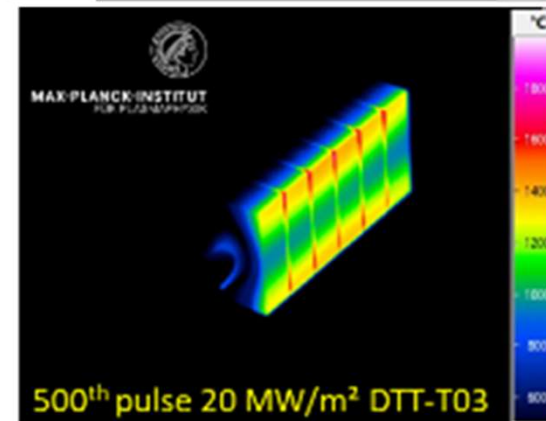
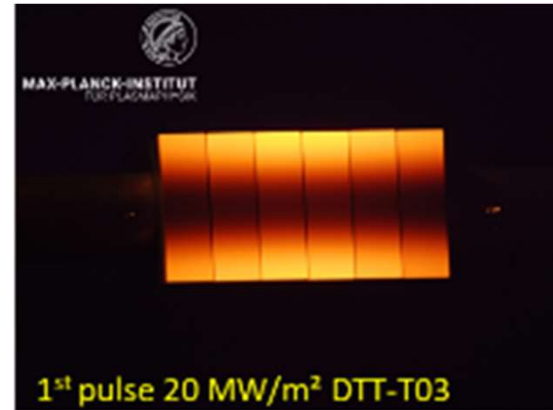
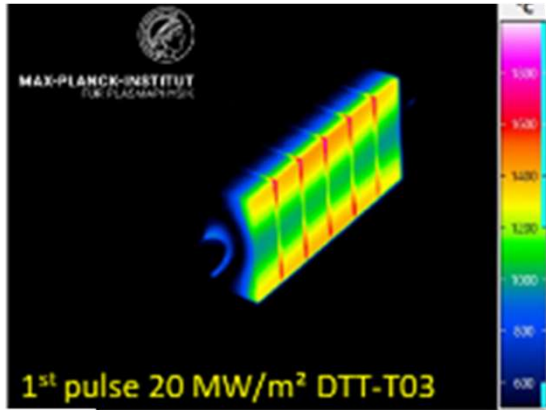


Immagine infrarossa e CCD
Di un provino di target del
divertore a 20 MW/m² al 1°
e al 500° ciclo di fatica
termica.

Da notare la stabilità del
campo termico ($T_{max} \sim$
1200°C)



Evento di flusso critico

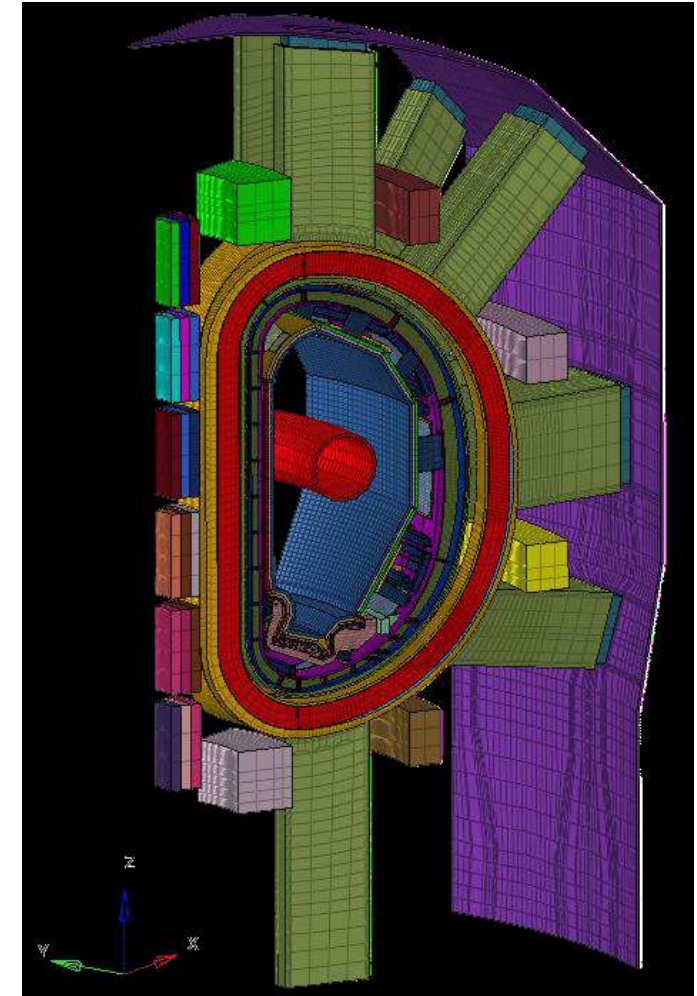
S.Roccella ISFNT 2023

Analisi e verifiche sui componenti in-vessel

(con particolare riferimento al divertore)



- Analisi termomeccanica dell'unità di scambio termico (tubo rivestito di tungsteno)
- Analisi fluidodinamica del modulo divertore
- Analisi elettromagnetica (EM) (modello globale)
- Analisi strutturale statica e dinamica del modulo divertore assemblato sotto l'azione dei carichi EM.
- Analisi strutturale in combinazione di carico (EM, termici, peso, precarico, accelerazione sismica, pressione idraulica).
- Valutazione della resistenza a fatica di singoli componenti (ITER-ISDC).



Esempio di modello EM

Fabbricazione - Normativa di riferimento

Normativa PED 2014/68/EU , Decreto Ministeriale N.329 1 Dic 2004.

La fabbricazione del divertore e della Prima parete ricade sotto la normativa recipienti in pressione (categoria II, III)

Alle unità tubolari rivestite di tungsteno si applicano i principi di sound engineering practice e non è richiesta marcatura CE.

Le cassette, i moduli del divertore ed i pannelli della prima parete seguono le procedure di categoria II, III. E' richiesta la marcatura CE.

Il fabbricante è responsabile del progetto, fabbricazione e verifica di conformità; produce analisi di rischio; fornisce le istruzioni operative; Contatta il Notified Body per la verifica di conformità.

La fabbricazione degli elementi affacciati al plasma del divertore, limiter e pannelli della prima parete utilizza **tecnologie speciali** (HRP-Hot Radial Pressing, plasma spray, additive manufacturing). Le strutture di supporto e le operazioni di assemblaggio richiedono tecnologie convenzionali (saldatura).

Si prevede di controllare il 100% delle **giunzioni**, in particolare quelle tra tungsteno e CuCrZr o acciaio inox. (Test agli ultrasuoni sviluppati specificamente).

E' previsto il controllo volumetrico (PT, UT, RT) del 100% delle **saldature**(weld joint efficiency E=1).
EN-ISO 5817-livello di imperfezioni

Le prove di **accettazione in fabbrica** includono:

- Prova in pressione idrostatica (8.65 MPa)- (ASME VIII), (EN 13445-5)

- Prova di tenuta all'elio (20° e a T operativa) con cicli alla pressione operativa (ISO 4233:2023) (perdita<10⁻¹⁰ Pa m³.s)

- Controllo dimensionale (toll.prof.divert 0.3mm)

Sono previste prove di **accettazione in sito**, quali:

- Prova di tenuta all'elio a temperatura ambiente

- Controllo dimensionale finale



Esempio di forno HRP- (E.Visca SOFT 2016)

Thank you for attention

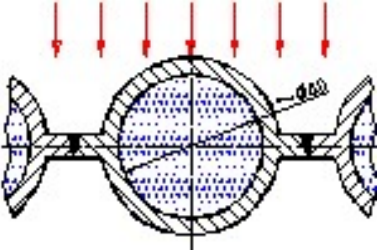
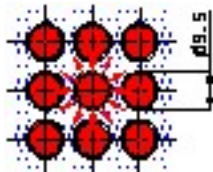
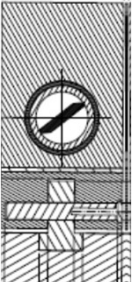
DTT Consortium (DTT S.C.a r.l. Via E. Fermi 45 I-00044 Frascati (Roma) Italy)



Pagine aggiuntive

Power Handling Comparison



HIGH HEAT FLUX COMPONENTS	FOSSILE FIRED BOILER WALL (ABB)	FISSION REACTOR (PWR) CORE	ITER DIVERTOR
DESIGN			 12/15 mm ID/OD
HEAT FLUX - average MW/m ² - maximum MW/m ²	0.2 0.3	0.7 1.5	3 – 5 10 – 20
<u>Max heat load MJ/m²</u> <u>Lifetime years</u> <u>Nr. of full load cycles</u> <u>Neutron damage dpa</u> <u>Materials</u>	- 25 8000 - Ferritic-Martens. steel	- 4 10 10 Zircaloy - 4	10 ~ 5-8 3000 - 16000 0.2 CuCrZr & CFC/W
<u>Coolant</u> - pressure MPa - temperature °C - velocity m/s - leak rate g/s	Water-Steam 28 280-600 3 <50	Water 15 285-325 5 <50(SG)	Water 4 100 – 150 9 – 11 <10 ⁻⁷