



FOIR



Ordine degli Ingegneri
della Provincia
di Roma



“DTT: Confronto con altre macchine a fusione e con la tecnologia per la fissione”

M. Utili, A. Cucchiaro

DTT S.c.a r.l.

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)

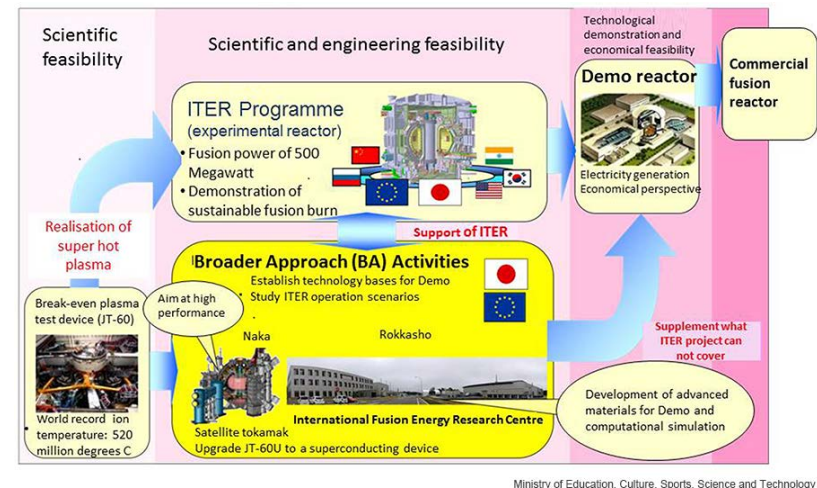


outlook



➡ **ENEA** in the last 50 years was strongly committed on the most relevant project worldwide on fission and fusion nuclear energy:

- ➡ **Laser ABC (ENEA)**
- ➡ **FT; FTU (ENEA)**
- ➡ **IFMIF-DONES;**
- ➡ **JT-60SA (BA-SQT)**
- ➡ **ITER IO Project (F4E)**
- ➡ **DEMO Project (EUROFUSION)**
- ➡ **DTT Facility**
- ➡ **G-IV Reactors: Lead Fast Reactors**

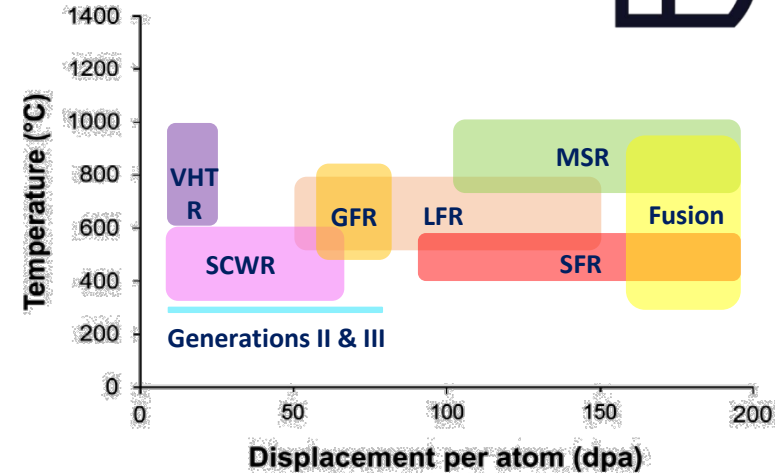


➡ Thanks to one of the most relevant fleet of experimental facilities worldwide, numerical skills, design capabilities, technological know-how, was candidate to design, construct and exercise **the facility for Divertor characterisation called DTT**.

G-IV Fission Reactors



Generation IV reactors are being developed under the Generation IV International Forum (GIF) project. The reactors size change from Small Modular Reactors (50-150 MW_e) to modular reactors (300-400 MW_e) and large plant at 1500 MW_e.

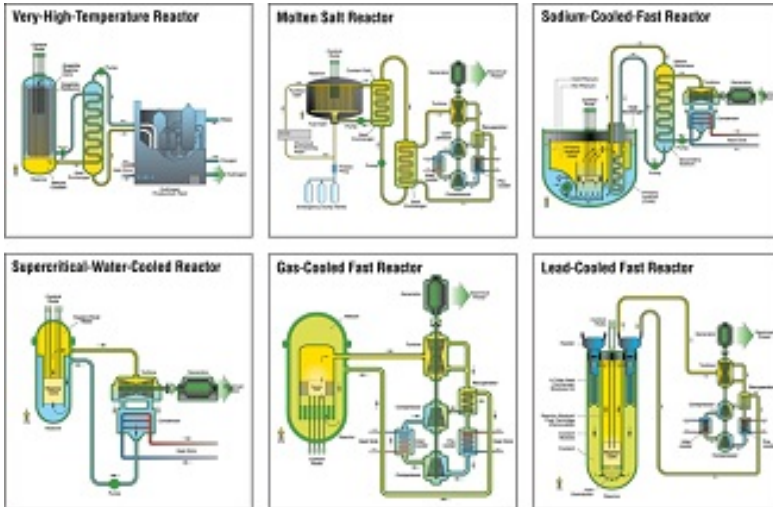


S.J. Zinkle and G.S. Was – Acta Materialia - 2013

Six reactor technologies:

- 1) lead-cooled fast reactor (LFR)
- 2) molten salt reactor (MSR)
- 3) sodium-cooled fast reactor (SFR)
- 4) supercritical water-cooled reactor (SCWR)
- 5) gas-cooled fast reactor (GFR)
- 6) Very high-temperature reactor (VHTR).

Some of these reactor designs could be demonstrated within the next decade, with commercial deployment beginning in 2030.



LEAD FAST REACTORS

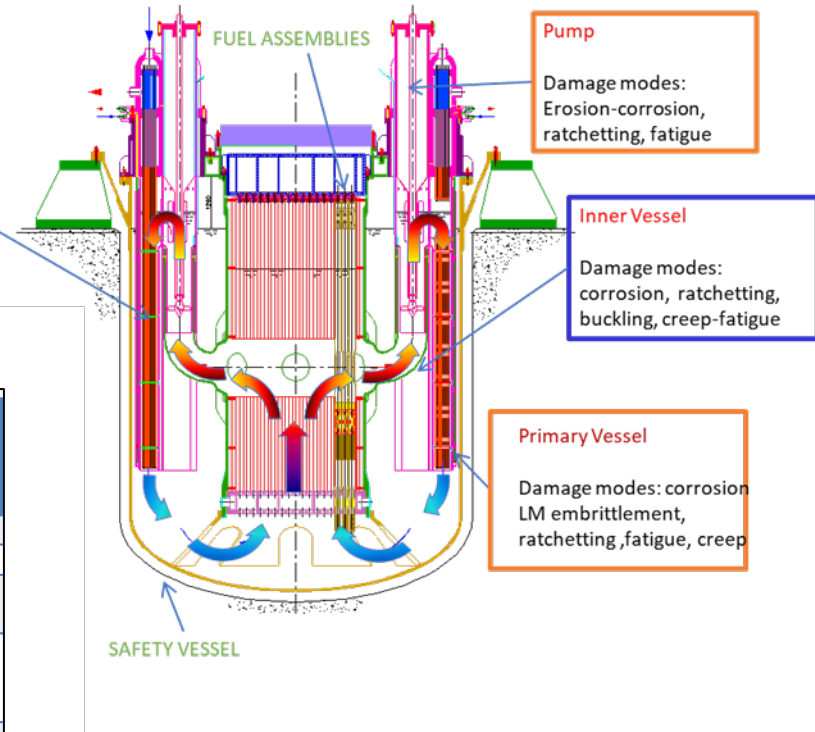


The lead-cooled fast reactor (LFR) used Lead as primary coolant and water as secondary coolant. The materials at the interfaces with the coolants are:

- AISI 316LN/Lead
- 15-15Ti 20% CW/lead
- AISI 316LN/Water

Power : 300 MWth (125 MWe)
 Primary cycle: 390 – 480°C
 Secondary cycle: 335 – 480°C 180 ba
 Steam cycle efficiency: above 40%

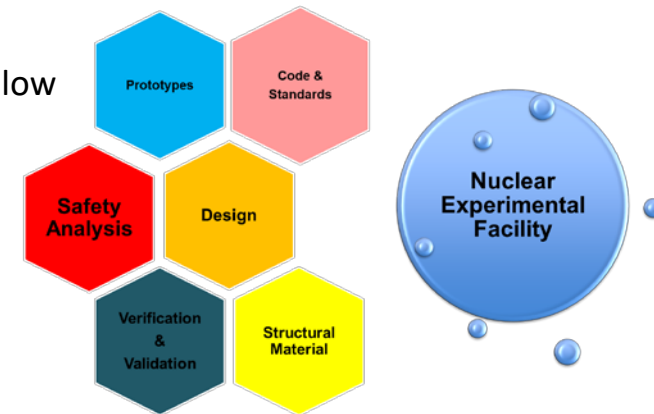
Component	N.O. Temp. (⁽⁰⁾ °C)	Acc. Max Temp. (⁽⁰⁾ °C)	Max. Lead vel. (m/s)	Max. Rad. damage (dpa)	Material (early stages with O2 concentration 10 ⁻⁶ -10 ⁻⁸ wt%)
Fuel cladding	390-450/600	550/800	2	100	15-15Ti 20% CW (AIM1)
FA Structures	390-430/540	500/700	2	100	15-15Ti 20% CW (AIM1)
Internal structures	390-430/520	500/700	1,5 ⁽²⁾	<2	AISI316LN (ASTM)
Steam Generator	390-430/520	500/700	0,9	0,01	AISI316LN (ASTM)
DHR Heat Exchanger	390-430/520	500/700	0,2	0,01	AISI316L (ASTM) 15-15Ti (DIN 1.4970)
Primary Pumps (impeller)	300-430/520	500/700	10÷20	0,01	AISI300 series
Reactor Vessel	390/400	420/430	0,1	<<2	AISI316LN (ASTM)



Synergies between Fission and Fusion Reactors



- ☐ Design and Manufacturing of **pressurize components** operating at high temperature
- ☐ Technologies developed; innovative **materials** high temperature resistance; low activation materials;
- ☐ **Computational tools**, design and safety analyses codes;
- ☐ Regulatory sized for fusion energy facilities **licensing**;
- ☐ Reliable and feasible fuel cycle breeder material supply (lithium and lead);
- ☐ **Remote handling** and in-service inspection;
- ☐ Remote controllability, **radiation hardened electronics** and CAD-supported operations.



Fusion application

Components	Materials	Coolants	T (°C)
HCLL/HCPB - BB	Ferritic Martensitic Steel	Helium	300-550
WCLL/WCPB - BB	Ferritic Martensitic Steel	Water	290-320
FW	Stainless Steels	Water	60-80
Divertor	Stainless Steels (316L)	Water	30-250

Fission application

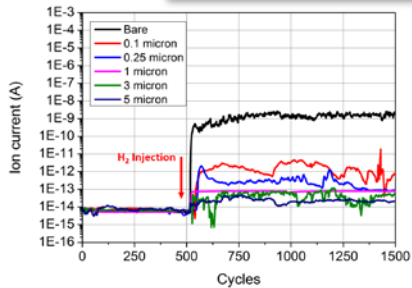
Type	Primary Coolant	Material	T (°C)	Secondary Coolant
SFR	Sodium	Stainless Steels	550	Sodium + Water
SCWR	Water	Stainless Steels	510	-
GFR	Helium	Stainless Steels	850	-
LFR	Lead	Stainless Steels	480-800	Water

Example of application



Coating Laboratory

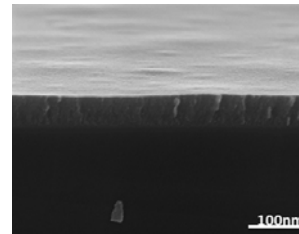
PLD coating



Permeation Reduction Factor :

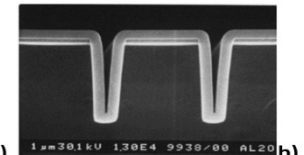
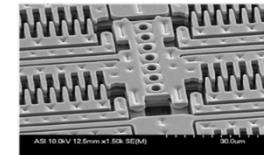
$$PRF = \frac{i_{W.O. Coating}}{i_{W.Coating}} \rightarrow 6 \times 10^3$$

At 823K and 100mBar of Hydrogen



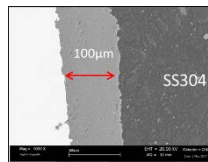
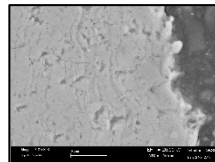
ALD coating

- ☐ Internal side of Pipes
- ☐ Complex geometry
- ☐ Preliminary coating was produced and characterized



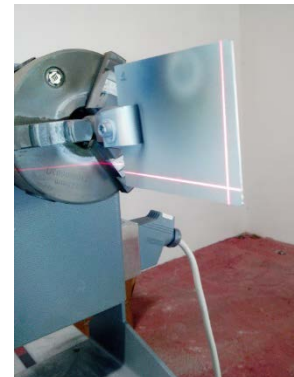
Detonation Gun- Thermal Spray

Detonation gun can be used to manufacture coating on component of relevant dimension for which the performance requirements can be relaxed.



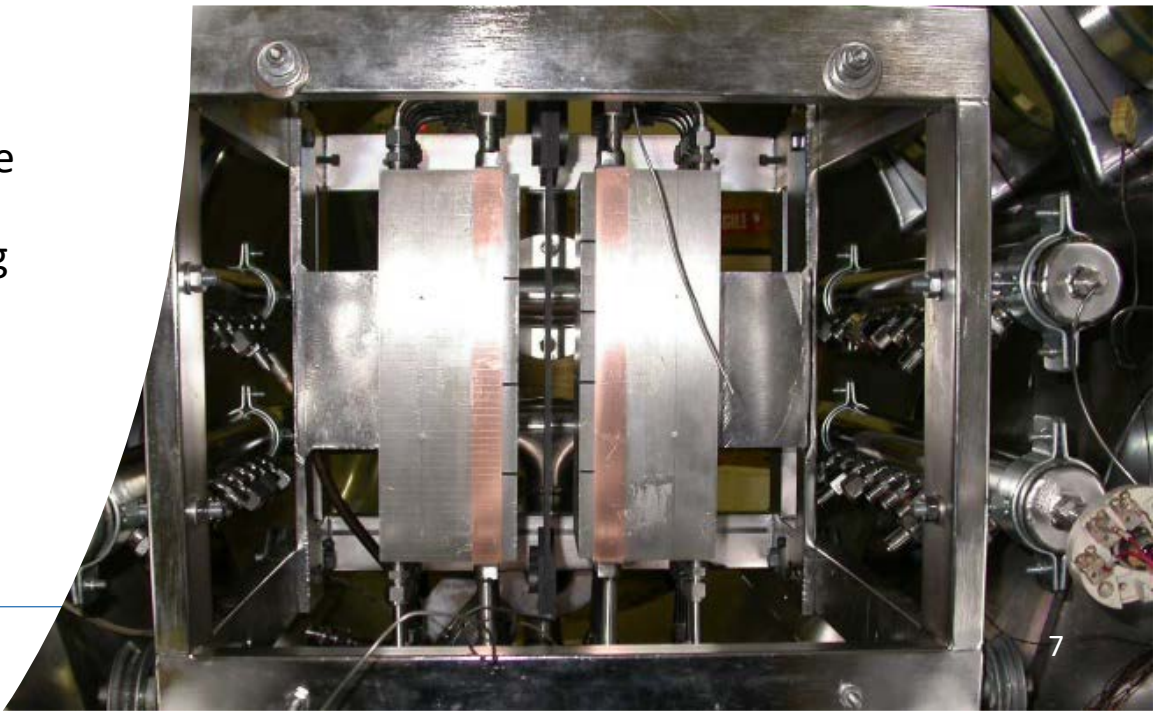
Coating can be performed on:

- Plates: up to 590x590mm
- Cylinder: max Length: 1000mm, max diameter 590mm, min diameter: customs



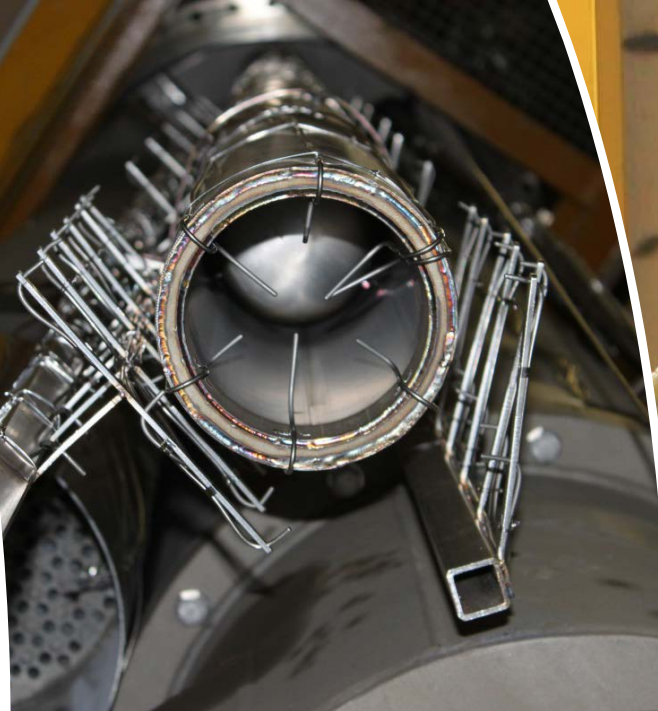
Example of application: RHS

- Design and procurement of RHE for the assembly of the latest ITER Divertor Cassette design
- Development of assembly procedures of the three Targets (Inner, Outer and DOME)
- validation and optimization of the refurbishment process, including cutting and welding of the cooling pipes



Example of application:

Circe Facility, LFR
Thermahydraulic
simulator



Example of application: China application Fission/Fusion facility

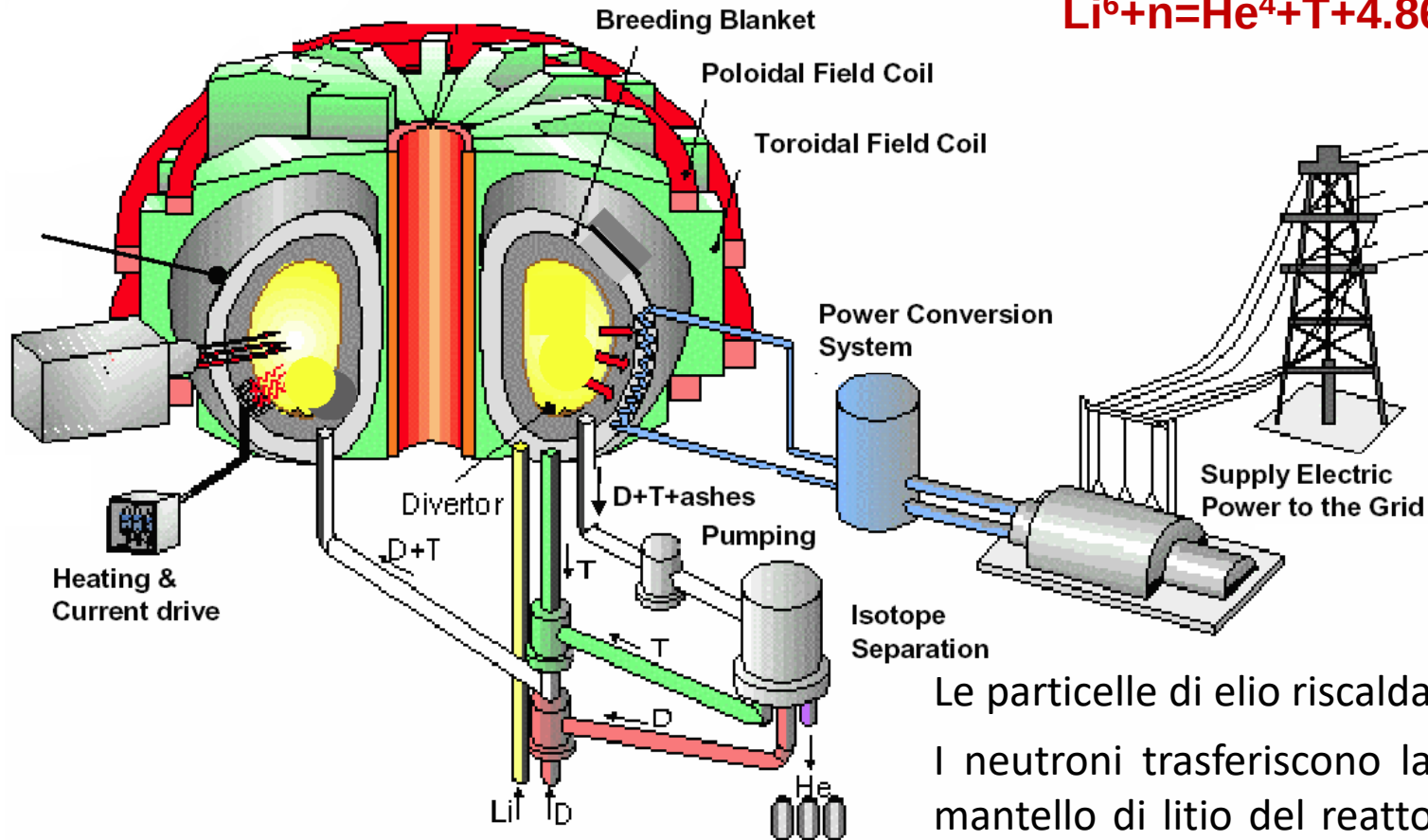


Centrale a Fusione

Lawson criterion: $n\tau_E T \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$

$D + T = He^4 + n + 17.6 \text{ MeV}$

$Li^6 + n = He^4 + T + 4.86 \text{ MeV}$



Le particelle di elio riscaldano il plasma.

I neutroni trasferiscono la loro energia al mantello di litio del reattore, generando il trizio e tramutando energia in calore, e quindi in energia elettrica.



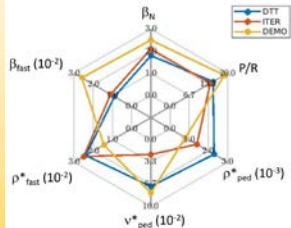
I vantaggi della fusione

- ☐ Utilizza combustibili abbondanti ed ampiamente disponibili in tutto il mondo.
- ☐ Le reazioni di fusione liberano una quantità enorme di energia.
- ☐ La fusione non produce gas responsabili dell'effetto serra (CO_2) o le piogge acide (SO_2 , NO_2)
- ☐ I reattori a fusione sono intrinsecamente sicuri: eventi tipo Cernobyl o Fukushima non sono fisicamente possibili.
- ☐ I combustibili non sono interessati da problemi di proliferazione nucleare.
- ☐ Le reazioni di fusione non producono scorie radioattive, anche se la struttura della macchina si attiverà.

Fusion Facilities



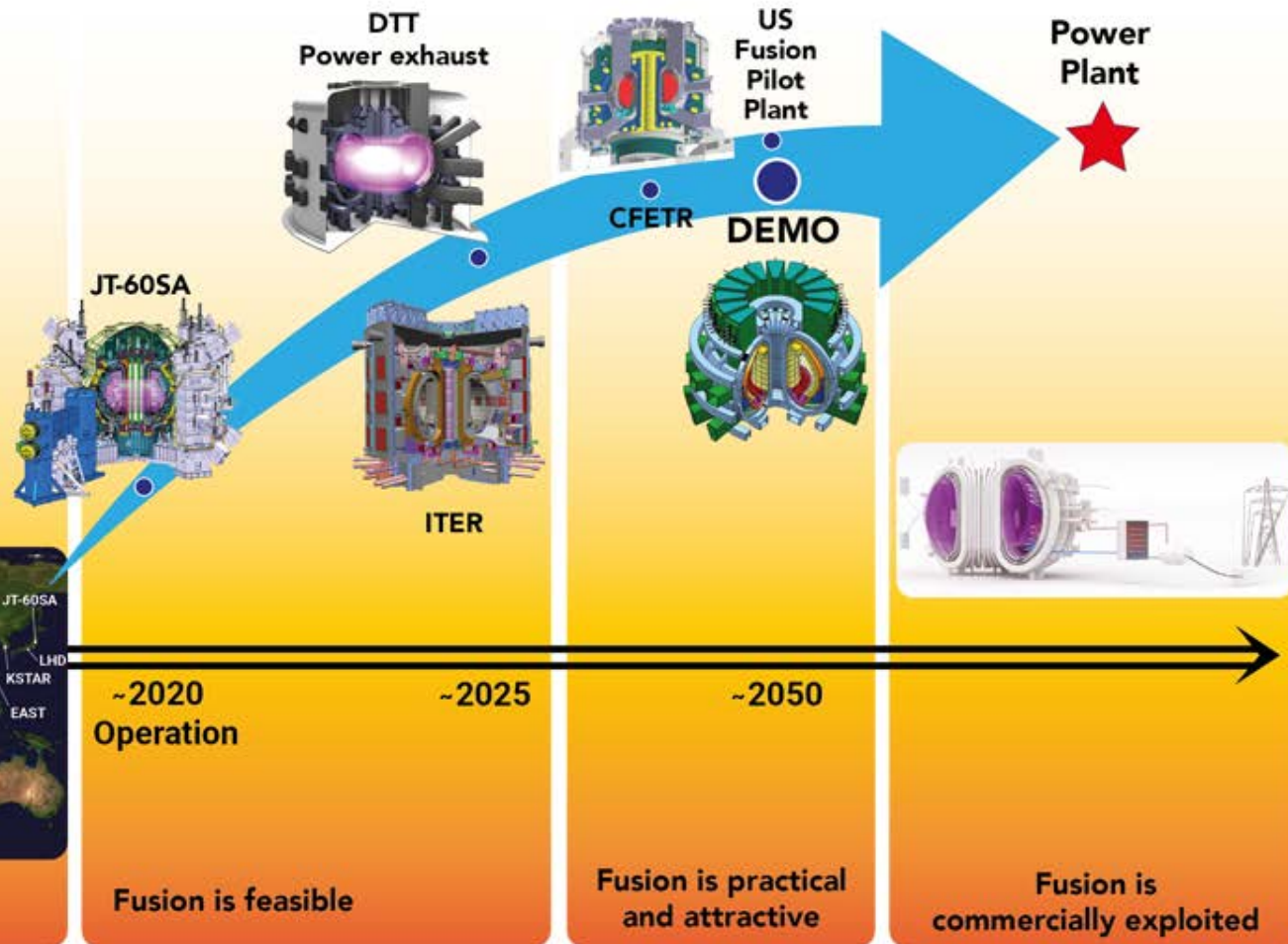
	DTT	ITER	DEMO
R (m)	2.19	6.2	9.1
a (m)	0.7	2	2.93
I _p (MA)	5.5	15	19.6
B (T)	6	5.3	5.7
Heating P (MW)	45	50	>50
P _{sep} /R (MW/m)	15	14	17
λ _a (mm)	0.7	0.9	1.0
Pulse length (s)	100	400	7600



Fusion facilities around the world



Fusion is plausible



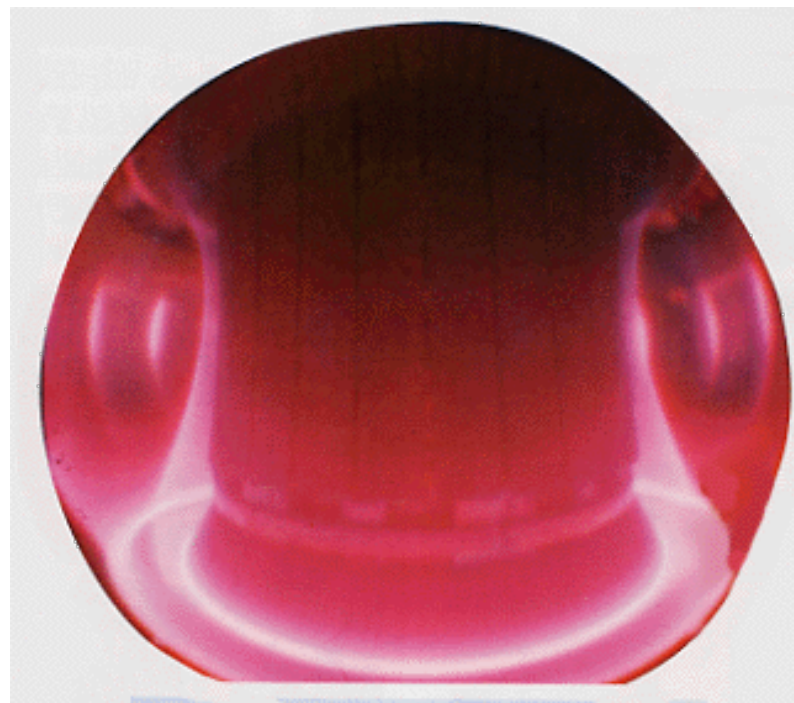
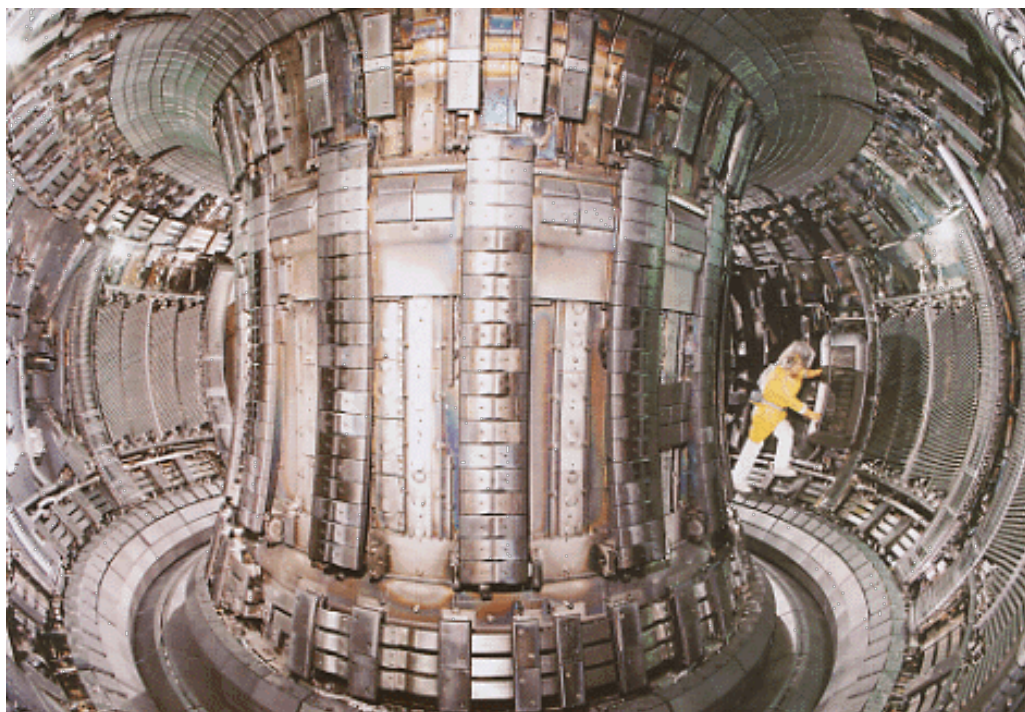
P. Mantica et al. PPCF 62 (2020) 014021

M. Siccino et al., FED 176 (2022) 113047

JET (Joint European Torus) Culham, UK



Il JET è la macchina per la fusione più grande al mondo (raggio maggiore 3 m, raggio minore 1.2m). In funzione dal 1983 -2023, il JET studia il comportamento del plasma in condizioni richieste da un reattore a fusione. Oggi, è un banco di prova per le tecnologie ITER e gli scenari operativi del plasma

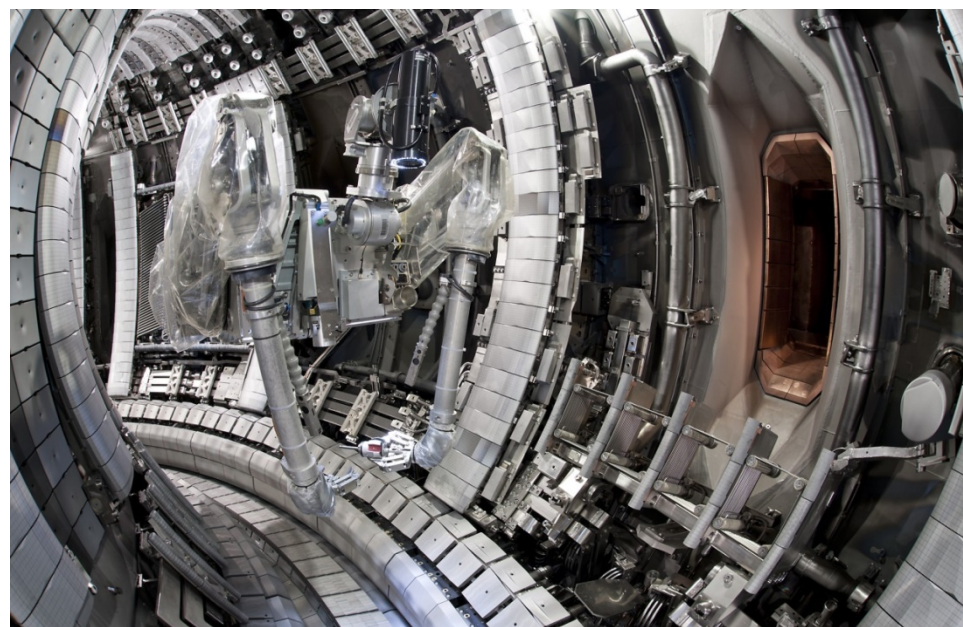
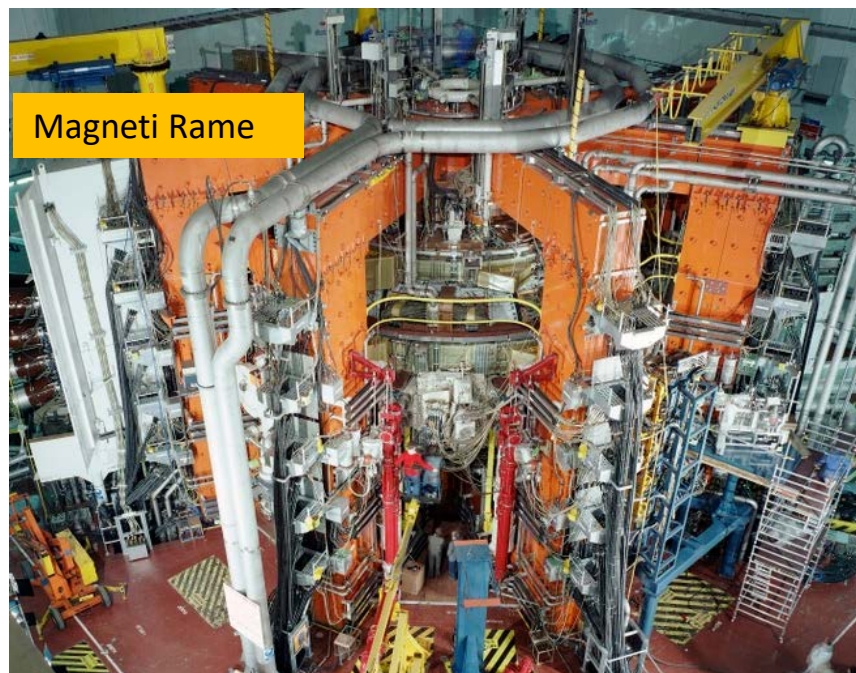


JET (Joint European Torus) Culham, UK



Nel 1997, per la prima volta, ha prodotto 16MW di potenza di fusione, 21MJ di energia, operando con un plasma di deuterio-trizio e sperimentando tecnologie necessarie per reattore a fusione.

Il JET ha confermato la fisica e le leggi di scala in regimi di plasma vicini a quelli che saranno realizzati nel prossimo reattore sperimentale ITER.

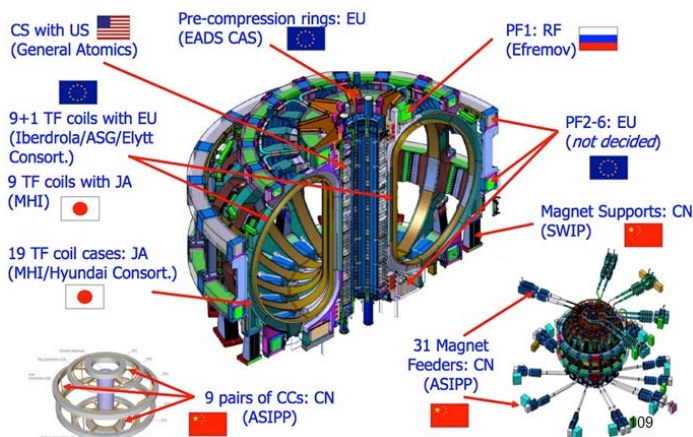
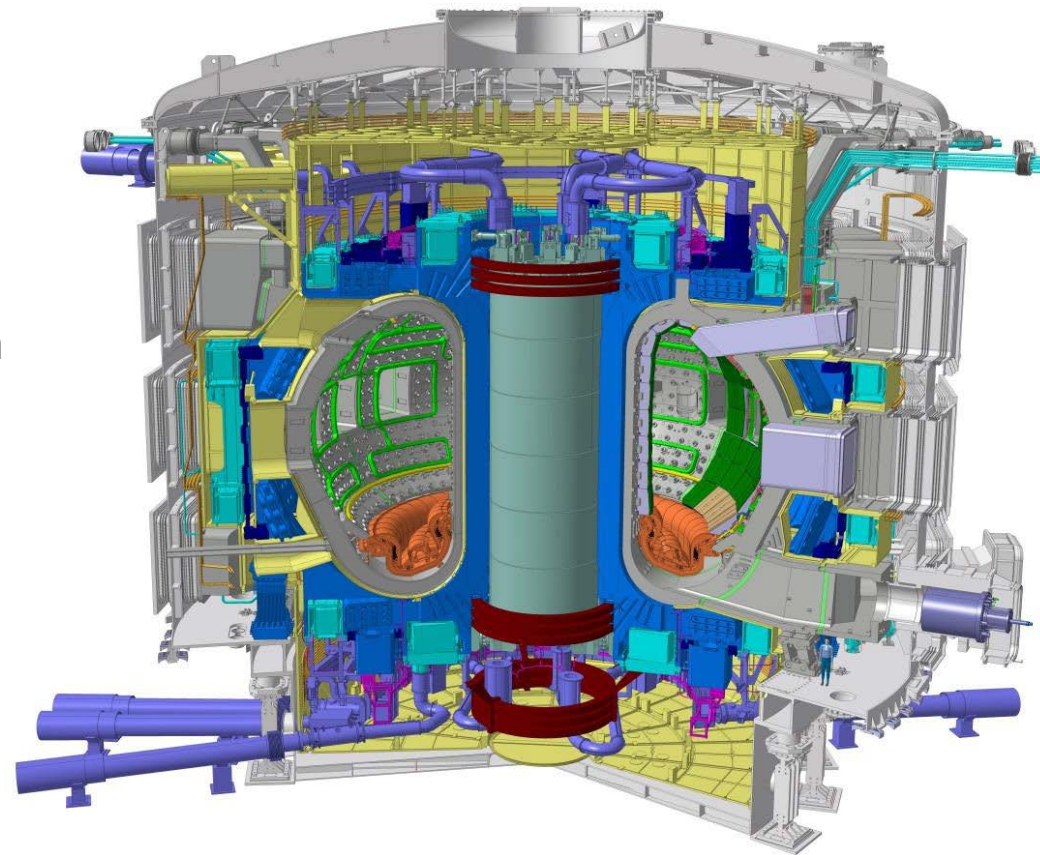


ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) Cadarache



Cina, Europa, India, Giappone, Corea, Russia e US hanno firmato un accordo nel 2006 per la costruzione e decommissioning di ITER.

- Assemblaggio iniziato in marzo 2020
 - Primo plasma 2029, operazione D-T 2038
 - 500MWt per > 400s, 50 MW riscaldamento
 - Q 5-10 con impulsi di 300 e 500 s
- ✓ Altezza: 24 m; larghezza 30 m
 - ✓ Raggio esterno: 6,2 m; Raggio interno: 2 m
 - ✓ Temperatura del plasma: $1.5 \cdot 10^8$ K
 - ✓ Campo magnetico toroidale: 5,3 T

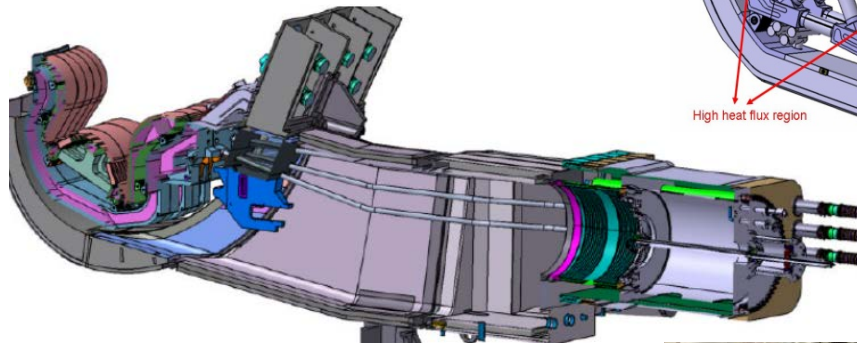
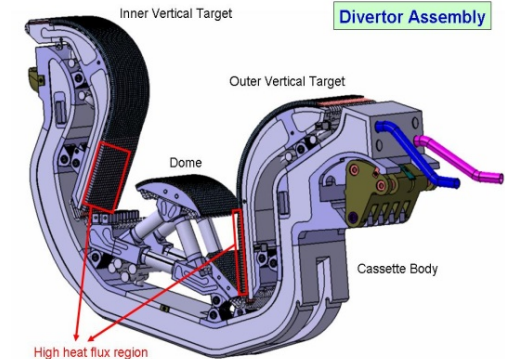
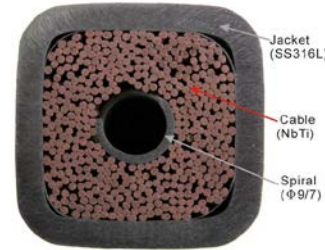
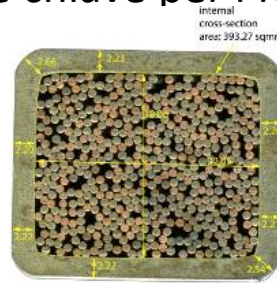


ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) Cadarache



ITER dovrà sperimentare le tecnologie chiave per i futuri reattori nucleari:

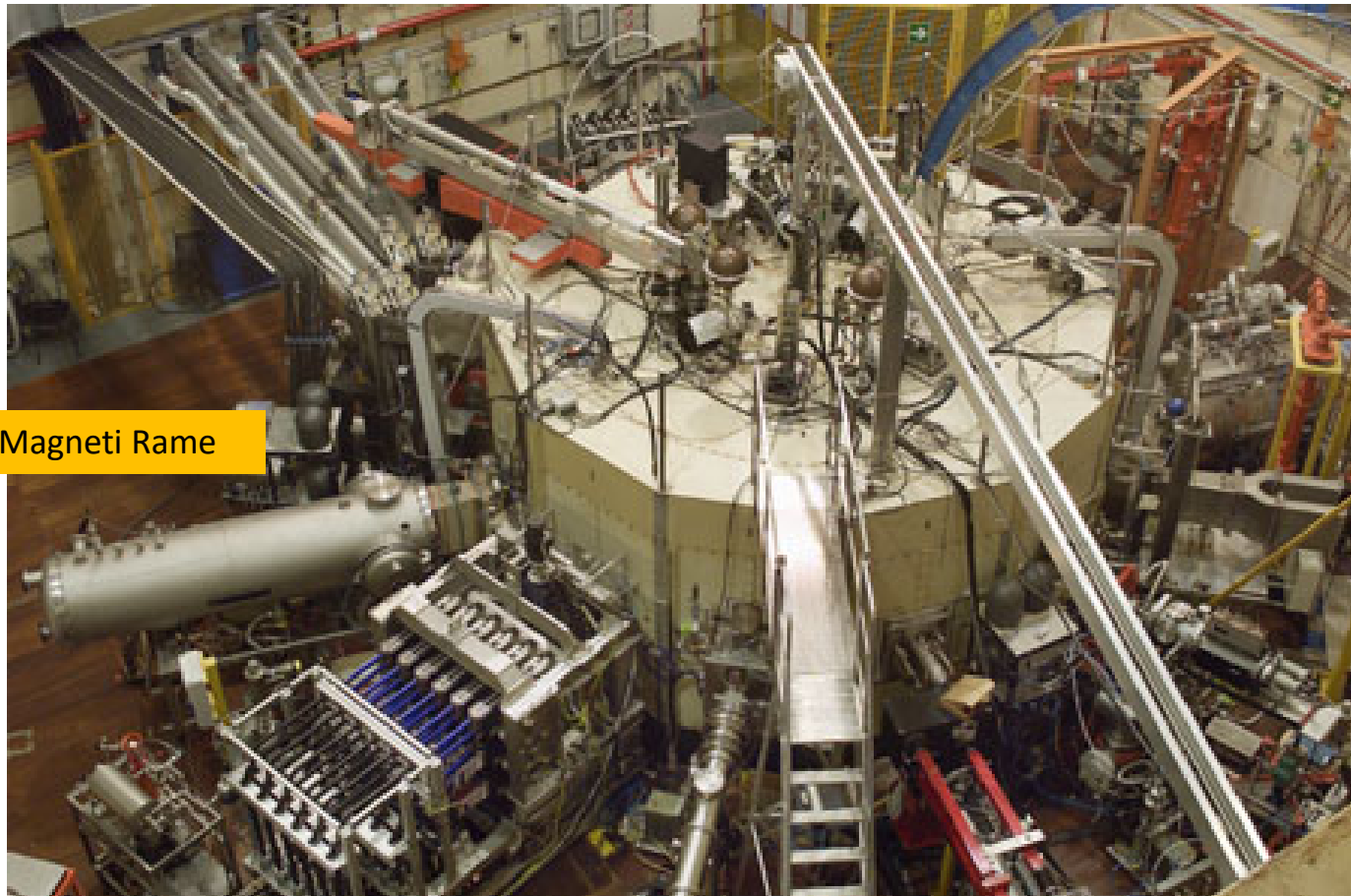
- ✓ magneti superconduttori;
- ✓ componenti in grado di sopportare flussi termici elevatissimi;
- ✓ manutenzione da remoto.
- ✓ tecnologie per la produzione di trizio dal litio, posto all'interno del mantello con elevate temperature.



FTU (Frascati Tokamak Upgrade) Frascati

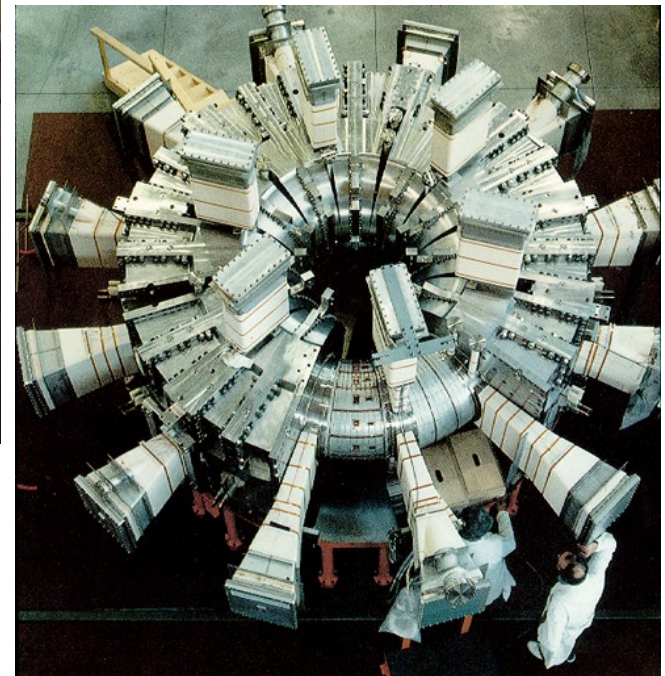
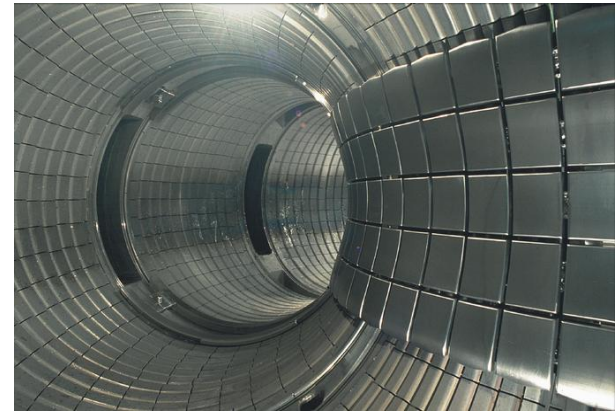


FTU ($R = 0.93$ m, 1.6MA, 8T) 1989-2023. La generazione di campo magnetico richiede 37.800 Ampere per 1.5 secondi. Le bobine di rame sono tenute alla temperatura dell'azoto liquido, -196 °C.

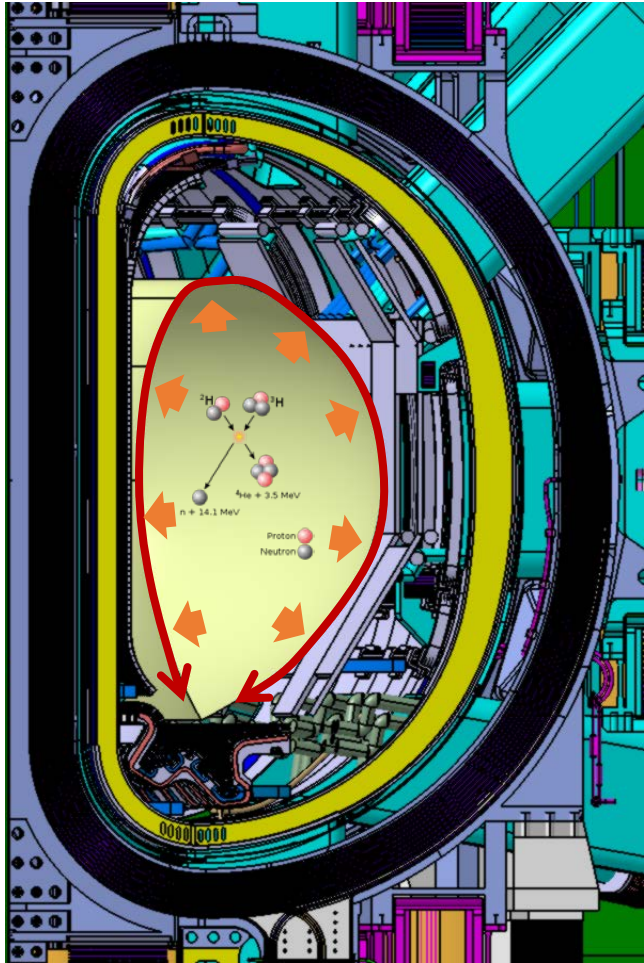


Magneti Rame

FTU (Frascati Tokamak Upgrade) Frascati



DTT machine



- Una delle principali tappe verso la realizzazione di un reattore a fusione è costituita dallo sviluppo di una soluzione al problema dello smaltimento del calore e delle particelle prodotte dalla reazione di fusione.
- Con la macchina "Divertor Tokamak Test facility" (DTT) sarà possibile provare la fattibilità fisica e tecnologica di vari concetti di divertore in condizioni estrapolabili alle condizioni caratteristiche di DEMO.
- Le scelte progettuali per una macchina in scala ridotta di DEMO devono privilegiare lo studio dei problemi connessi allo "Scrape Off Layer" e alla regione del divertore.

DTT machine

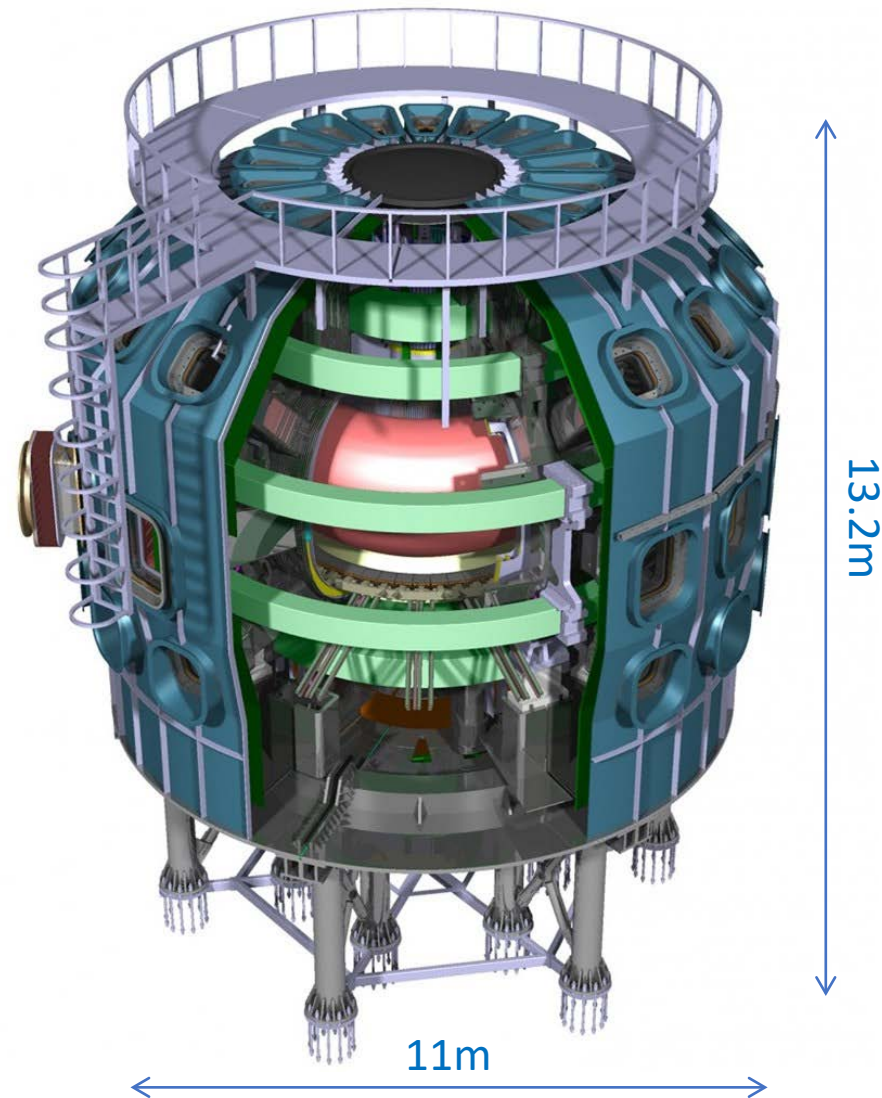


Il progetto è stato sottoposto a verifica di Panel internazionali.

Collaborazioni Tecnico-scientifiche con F4E, ITER e CEA.

La realizzazione durerà circa 7 anni e vede la partecipazione dell'UE tramite la BEI "Programma Juncker"), di EUROfusion, del MiSE, del MUR, della Regione Lazio e altre partecipazioni da partner internazionali.

Si prevede la creazione di 1.500 posti di lavoro di cui 500 diretti, scienziati e tecnici, e altri 1.000 nell'indotto.



DTT vs ITER



ITER TFC:

Nb3Sn coils

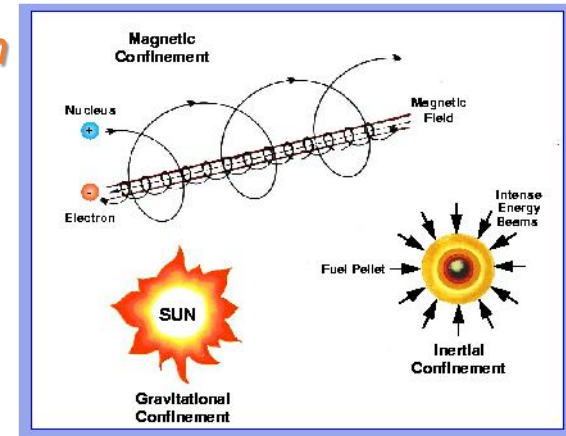
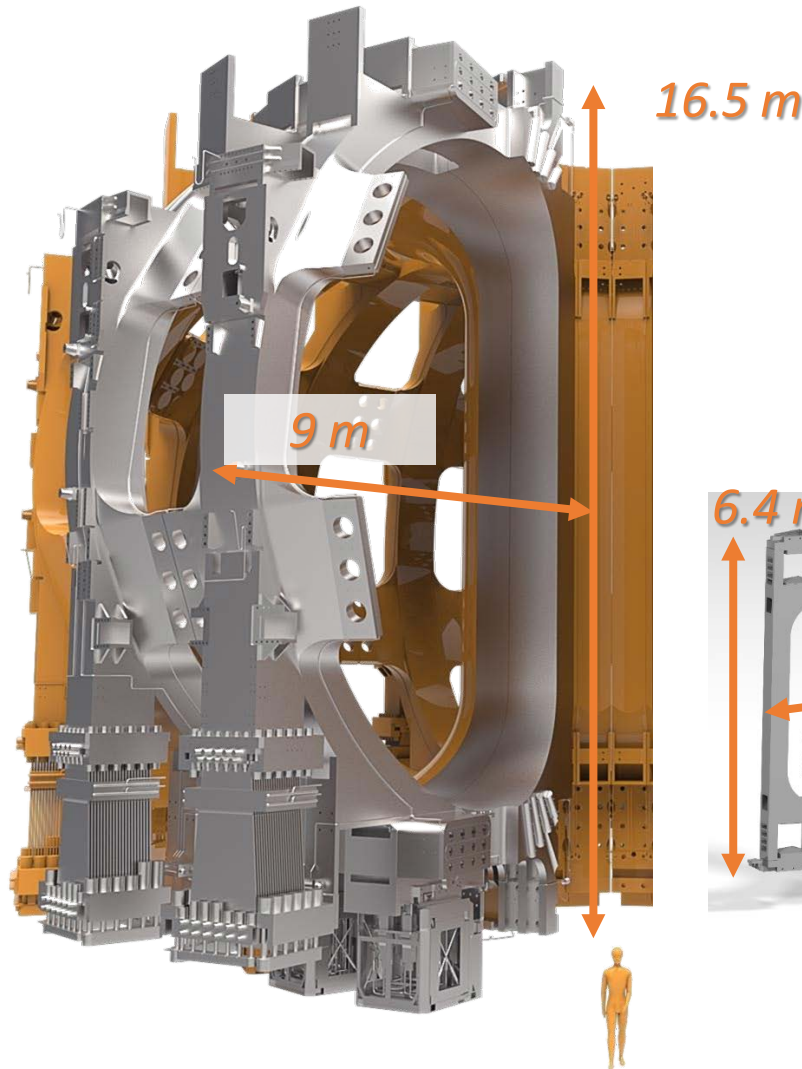
$B_{max} = 11.8T$

$I_{turn} = 68 \text{ kA}$

Turns=134

$R = 6.2 \text{ m}$

$B_{plasma} = 5.3 \text{ T}$



DTT TFC:

Nb3Sn coils

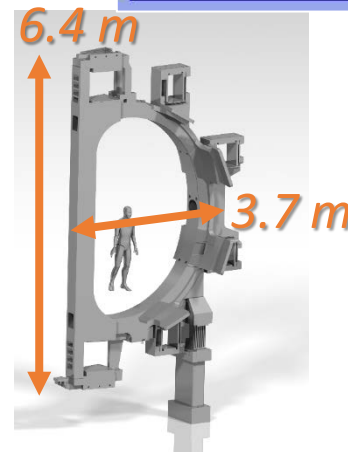
$B_{max} = 11.9T$

$I_{turn} = 42.5 \text{ kA}$

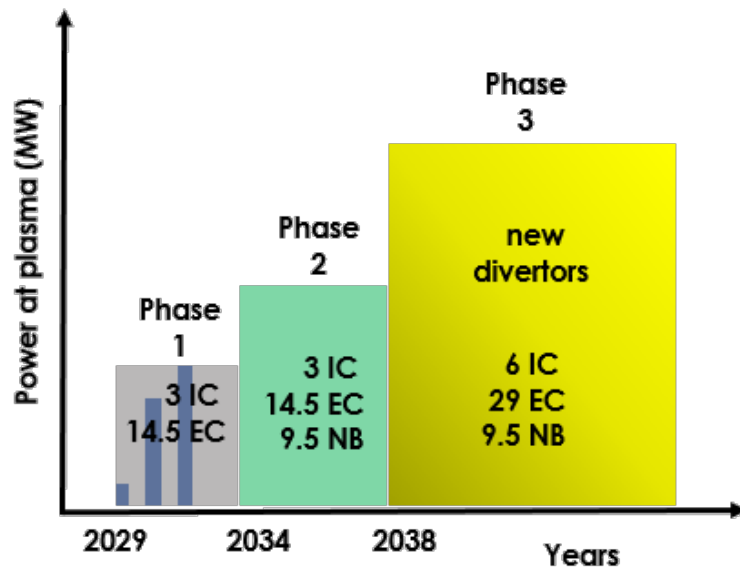
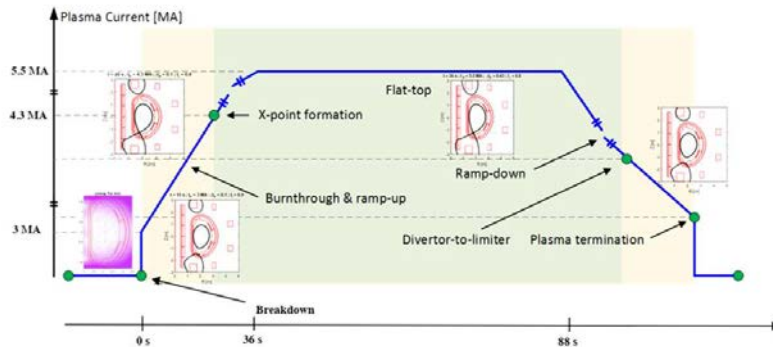
Turns=84

$R = 2.19 \text{ m}$

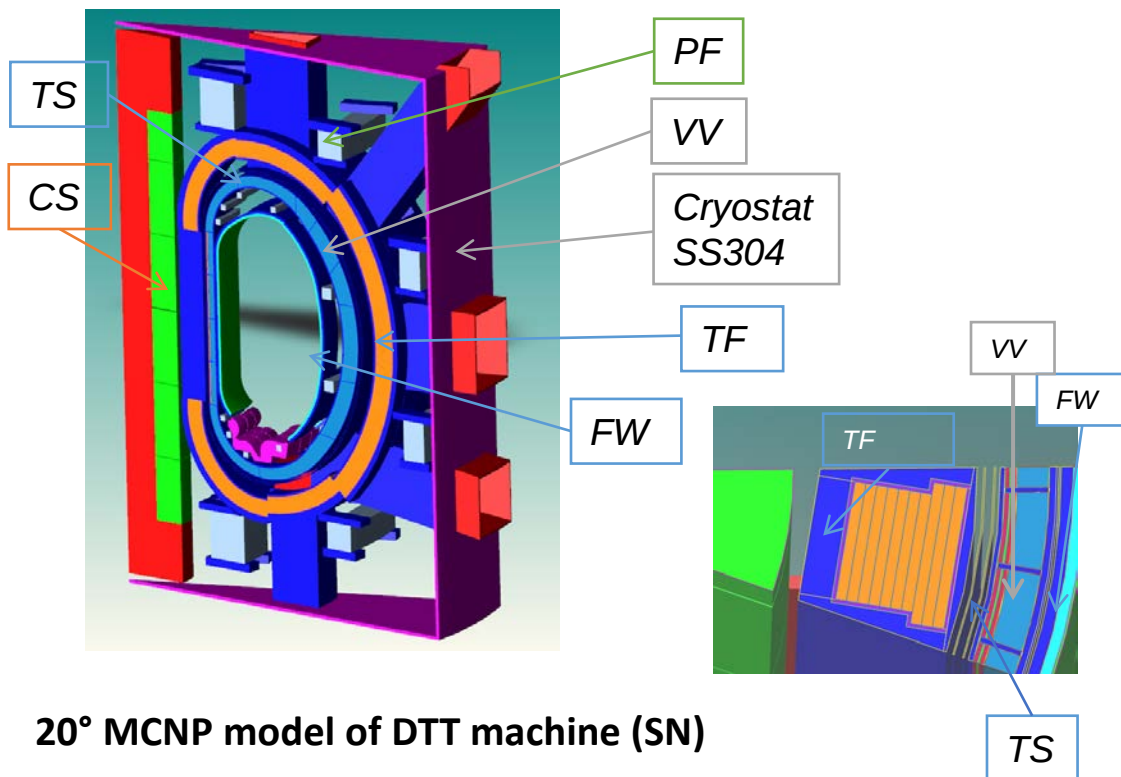
$B_{plasma} = 6 \text{ T}$



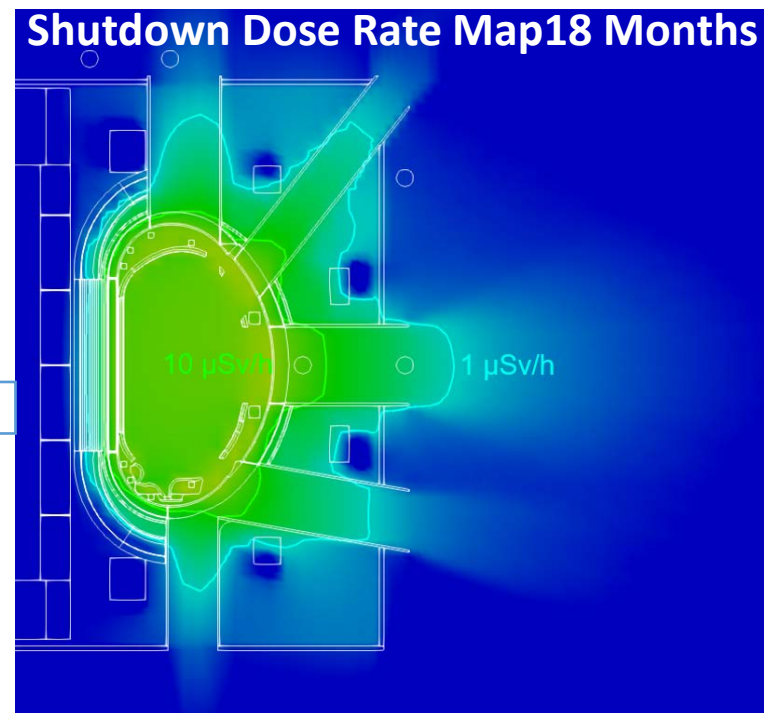
DTT vs JT60SA



Analisi neutronica



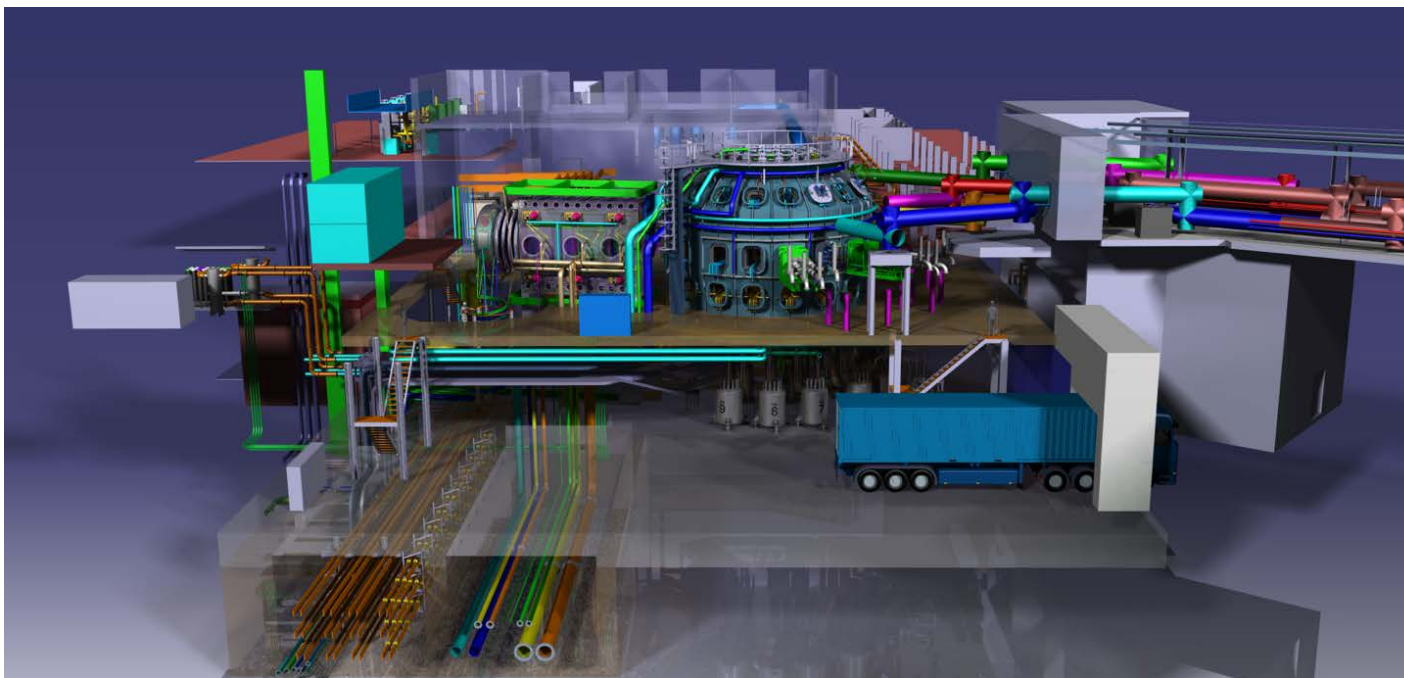
20° MCNP model of DTT machine (SN)



3 Months from Shutdown

Analisi dei livelli di radioattività dei componenti di DTT e dose radioattiva presente all'interno e all'esterno del criostato. Il riscaldamento neutronico della bobina toroidale risulta sempre $< 1\text{mW}/\text{cm}^3$, l'impianto criogenico è in grado di smaltire 10kW a 4.5K. Non vi è necessità di RH all'esterno del criostato. Gli accessi degli edifici sono controllati e le aree dell'impianto sono classificate.

Safety & risk analysis

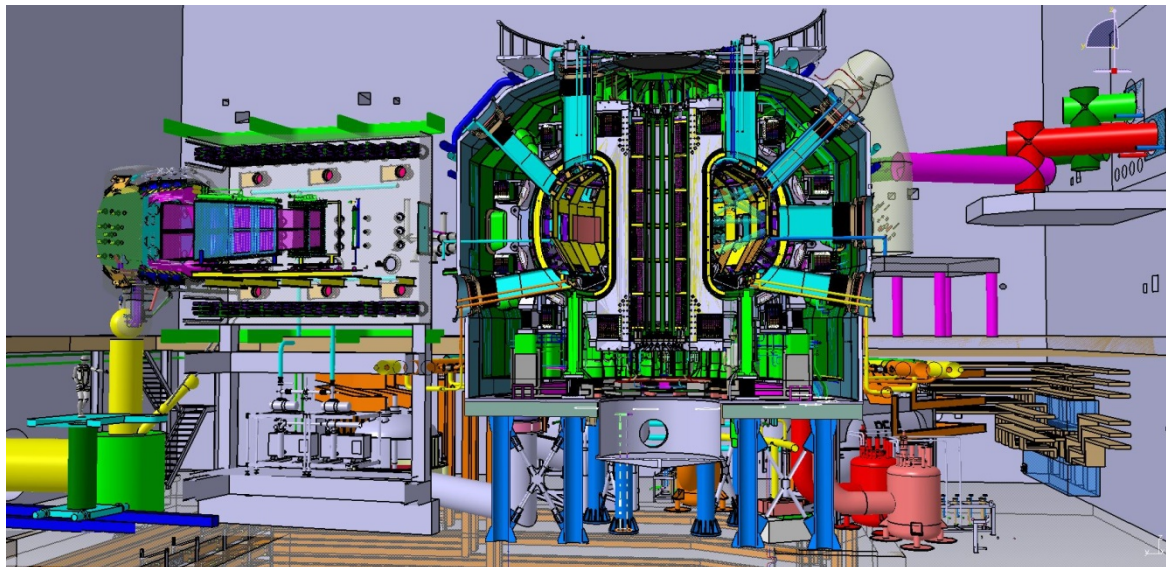


Tutte le funzioni di processo, sicurezza e protezione individuate per i sistemi DTT sono state analizzate attraverso la Functional Failure Mode and Effect Analysis (FFMEA).

Le analisi deterministiche dimostrano la capacità dell'impianto di poter reagire adeguatamente alle possibili sequenze incidentali indotte dagli eventi iniziatori di guasto (*Postulated Initiating Events (PIEs)*) .

Particolare attenzione è stata rivolta al sistema Divertore.

Safety & risk analysis



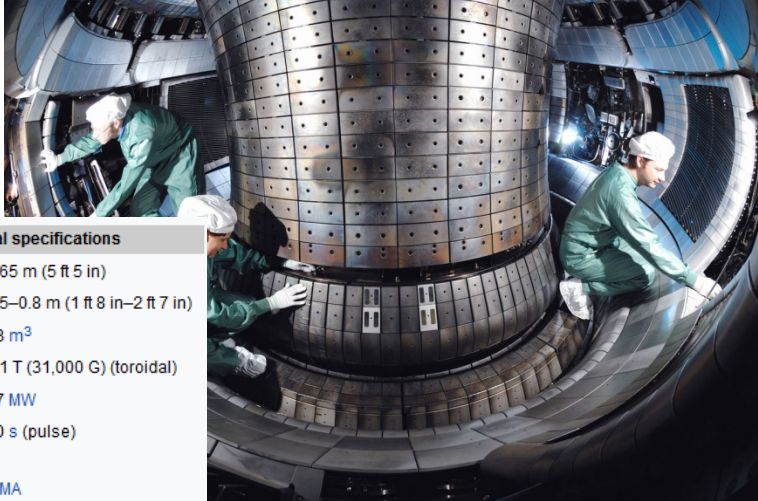
Il progetto è stato sottoposto ad uno studio HAZID “ Hazard Identification” al fine di identificare e analizzare tutti i pericoli, considerando sia gli aspetti radiologici che di altra natura.

Simulazioni per valutare l'attivazione di prodotti di corrosione presenti nel circuito di raffreddamento, eseguite utilizzando il codice OSCAR-Fusion (CEA), mostrano come non vi siano problemi di attivazione dell'acqua di raffreddamento.

Panorama Internazionale



ASDEX (R = 1.65 m, 0.5 MA) – Germania

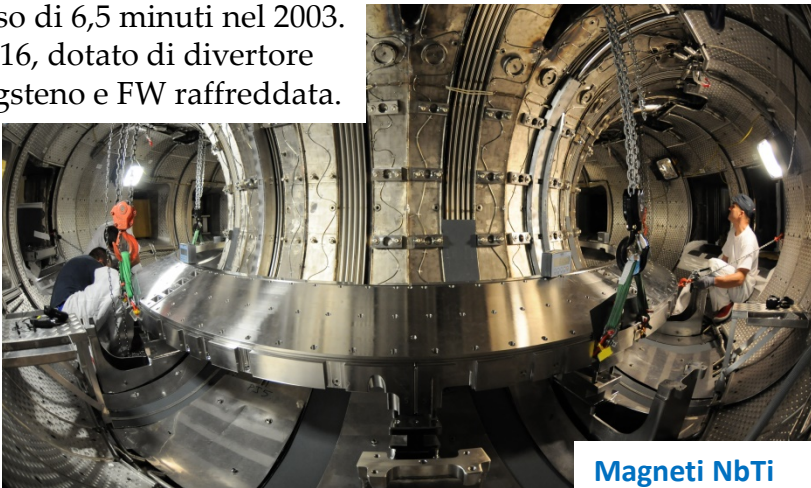


Technical specifications

Major Radius	1.65 m (5 ft 5 in)
Minor Radius	0.5–0.8 m (1 ft 8 in–2 ft 7 in)
Plasma volume	13 m ³
Magnetic field	3.1 T (31,000 G) (toroidal)
Heating power	27 MW
Discharge duration	10 s (pulse)
Plasma current	2 MA

Tore Supra (R = 2.5m, 1.7MA) 1988 - Francia

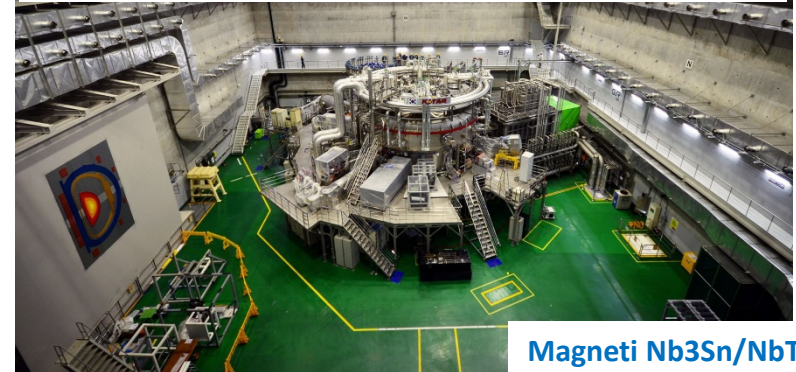
Impulso di 6,5 minuti nel 2003.
Nel 2016, dotato di divertore in tungsteno e FW raffreddata.



Magneti NbTi

KSTAR (R = 1.8m, 2MA, 3.5 T) 2008 - Corea

Soppressione di ELM nel 2017 mediante bobine interne.
100 milioni di gradi di temperatura ionica nel 2018.
2019 iniziati esperimenti mitigazione disruptioni



Magneti Nb3Sn/NbTi

EAST (R = 1.7m, 2MA) 2006 -Cina



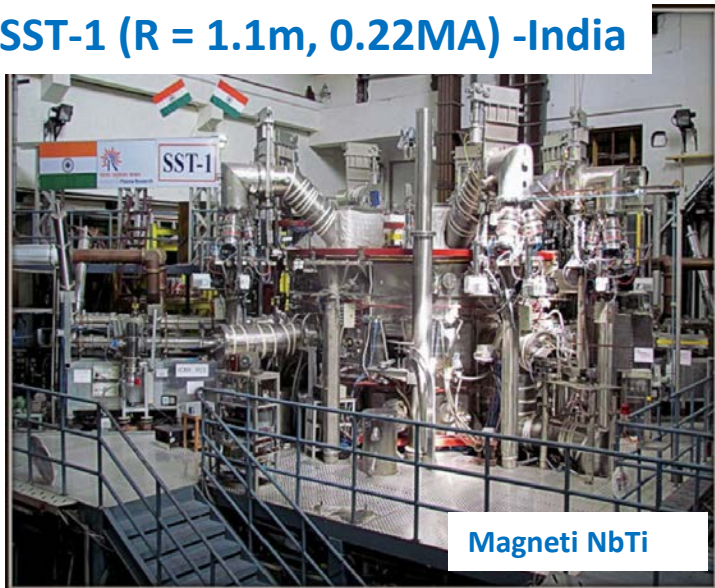
2018, in modo H, 100 milioni di °C degli elettroni. Impulso 100 s

Magneti NbTi

Panorama Internazionale

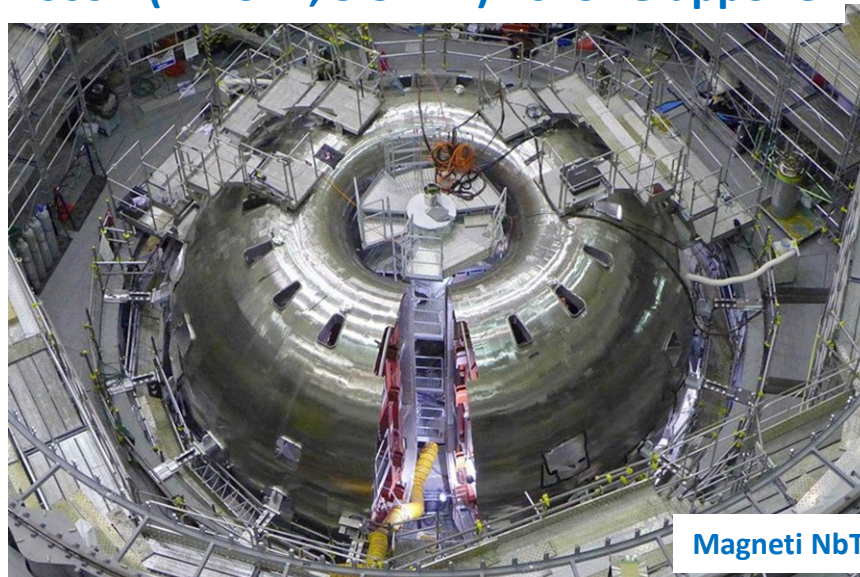


SST-1 (R = 1.1m, 0.22MA) -India



Magneti NbTi

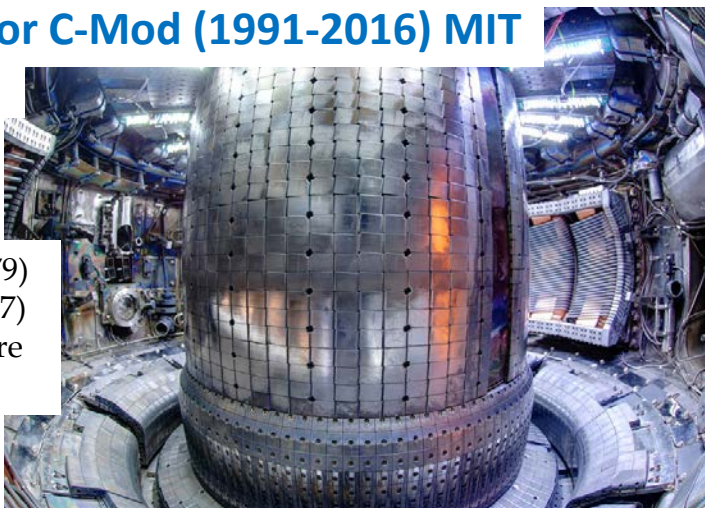
JT-60SA (R = 3 m, 5.5 MA) 2023 -Giappone



Magneti NbTi

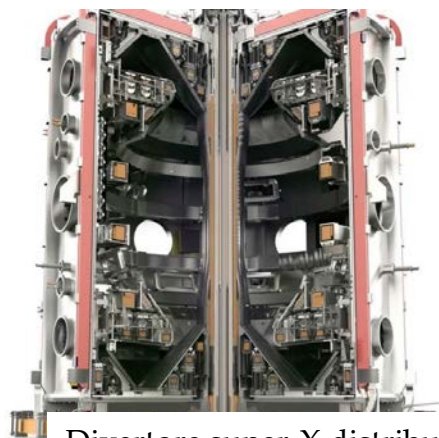
Alcator C-Mod (1991-2016) MIT

Magneti Rame



Alcator A (1973-1979)
Alcator B (1978-1987)
0,54 raggio maggiore
10 T in asse

MAST (R = 0.9 m, 1.3 MA) upgrade 2020 –UK



Technical specifications

Major Radius	~ 0.9 m (2 ft 11 in)
Minor Radius	~ 0.6 m (2 ft 0 in)
Plasma volume	8 m ³
Magnetic field	0.55 T (5,500 G)
Heating power	5 MW
Plasma current	1.3 MA

Magneti Rame

Divertore super-X distribuisce i carichi termici.

DTT: Confronto con altre macchine a fusione e con la tecnologia per la fissione

M. Utili, A. Cucchiaro

Grazie per l'attenzione

*Thank you for attention and patience
(if the case)*

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