



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

Stato e prospettive della fusione nucleare

Paola Batistoni
Resp. Divisione Sviluppo Energia da Fusione
ENEA – Centro di Ricerca di Frascati

INFN Sezione di Pisa, 22 marzo 2023



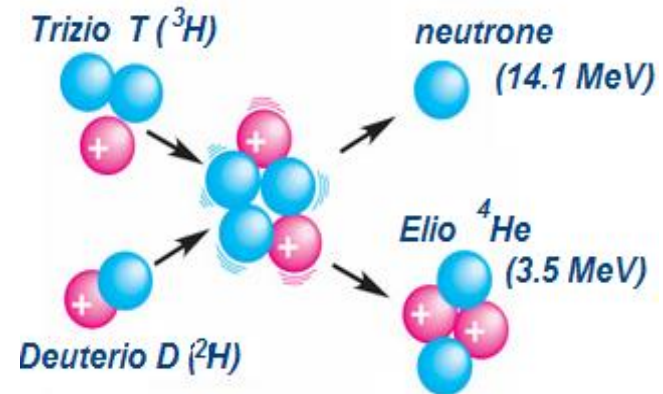
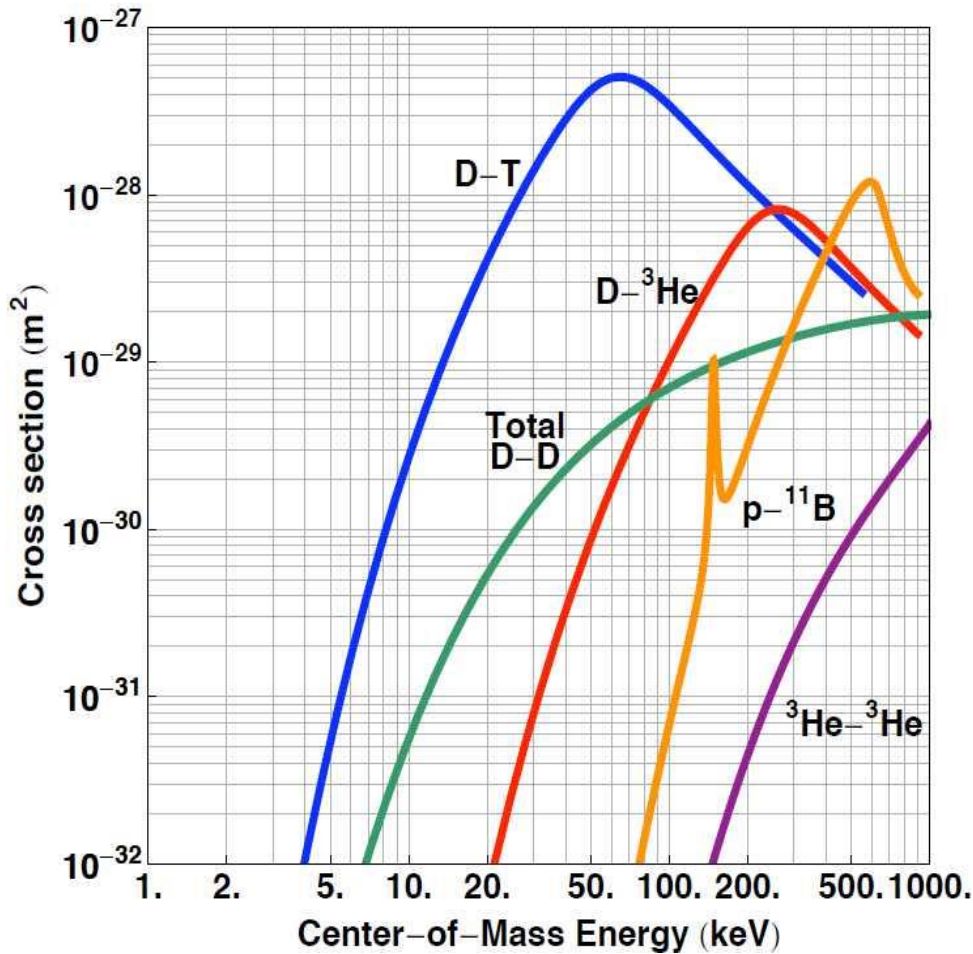
1101 0110 1100
0101 0010 1101
0001 0110 1110
1101 0010 1101
1111 1010 0000



SOMMARIO

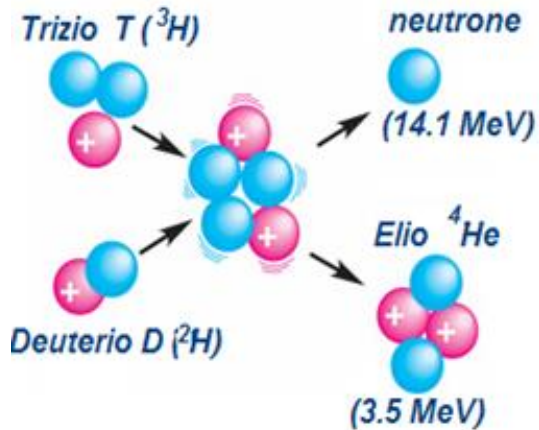
- 1. A che punto siamo**
- 2. I recenti risultati di JET**
- 3. Il reattore sperimentale ITER**
- 4. Cosa resta da fare – la Roadmap europea sulla fusione**
- 5. L'esperimento italiano DTT**

Energia da fusione



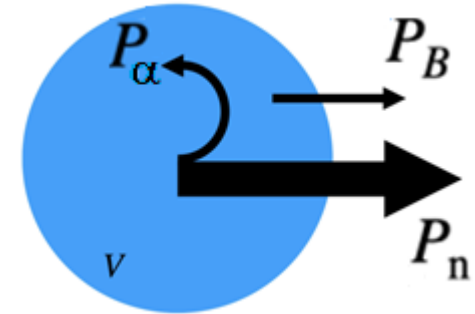
- Reazione D-T: sezione d'urto più alta a temperature più basse
- Temperatura $T \geq 10^8 \text{ K}$ (10 keV)
- Plasmi termonucleari «confinati» (non funzionerebbe in sistemi fascio-bersaglio, fascio-fascio)

Ciclo DT

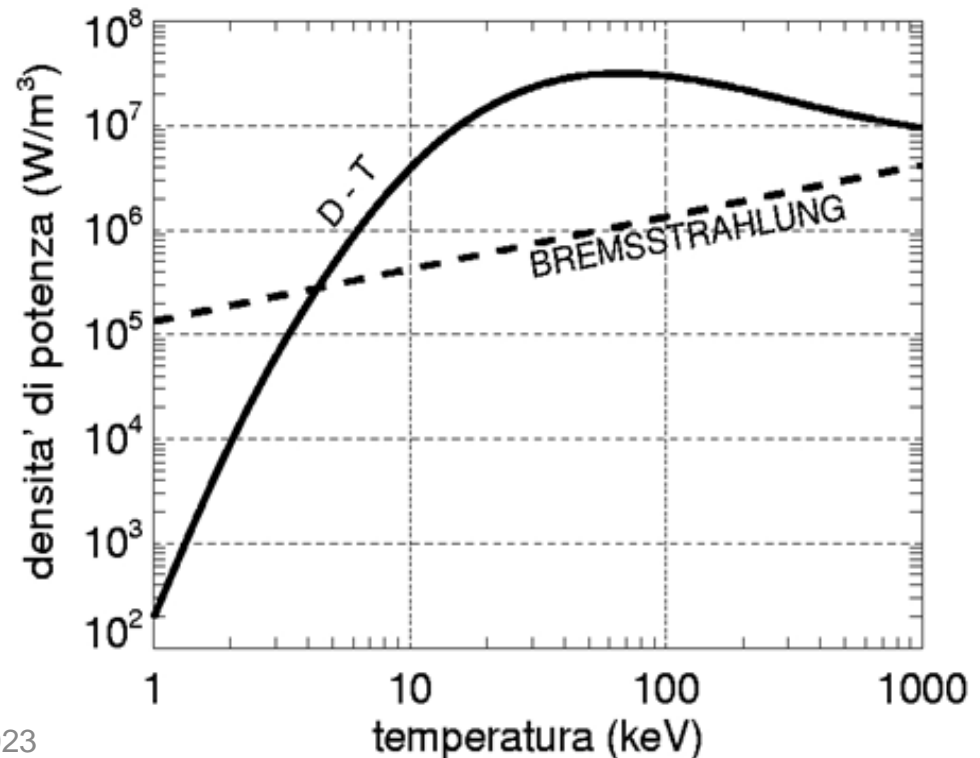


$P_n = 80\% P_{\text{fus}}$ in uscita dal plasma, convertita in energia elettrica

$P_\alpha = 20\% P_{\text{fus}}$ potenza ceduta al plasma

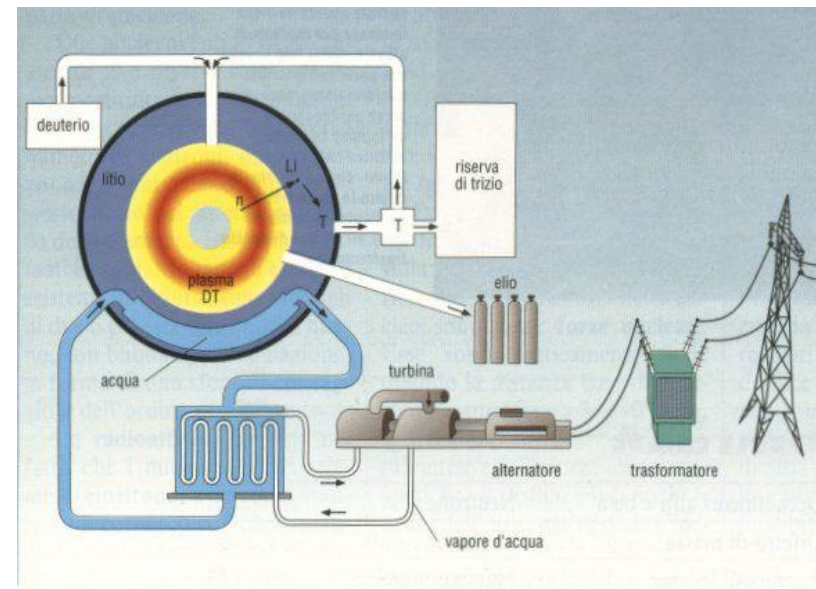
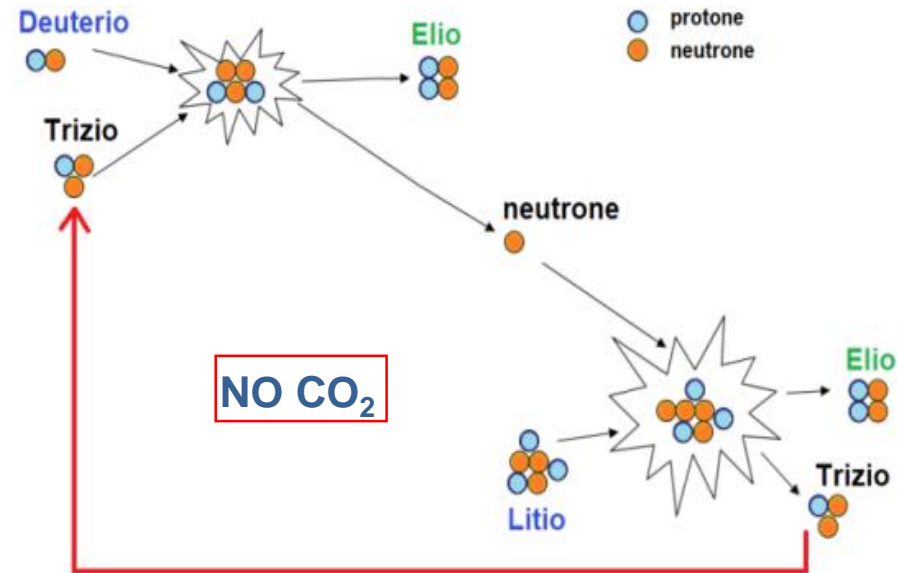


- Perché la potenza delle alfa sia maggiore di quella persa per irraggiamento (bremmstrahlung) serve $T > 4.3 \text{ keV}$

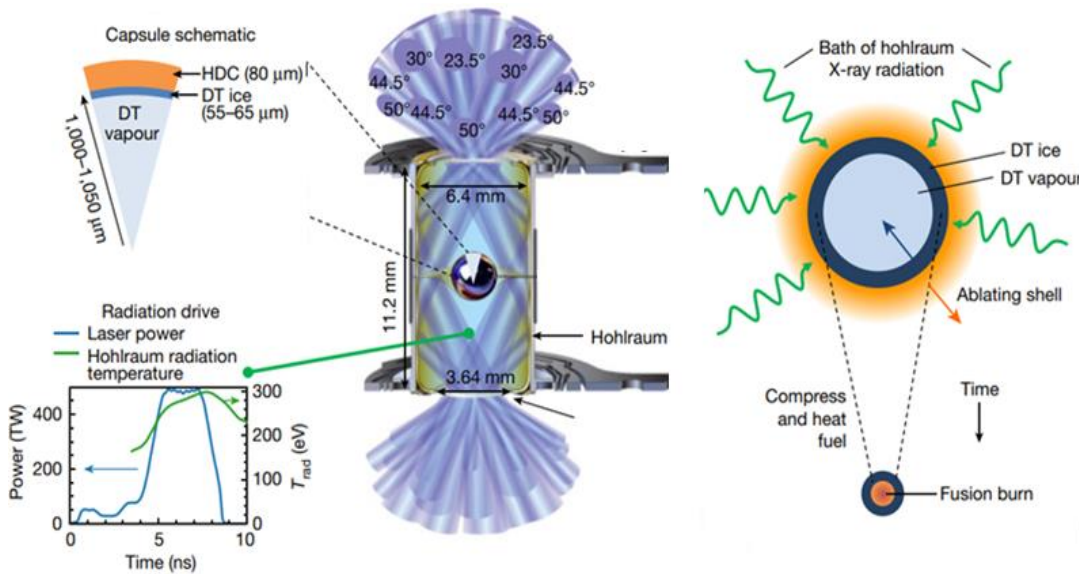


I vantaggi della fusione

- Il combustibile, **Deuterio e Litio**, è praticamente illimitato
- **(37 kg D + 111 kg ${}^6\text{Li}$) / GW_{Fus} / y**
- **~ 400.000 ton / 0.5 miliardi m^3 gas naturale**
- la reazione su cui si basa non produce gas climalteranti;
- è intrinsecamente sicura (in ogni momento nella camera di reazione si trova circa un grammo di idrogeno);
- la reazione di fusione non produce scorie radioattive – la radioattività indotta nella camera di reazione decade in ca. 1 secolo con un'opportuna scelta dei materiali.



Diversi approcci alla fusione

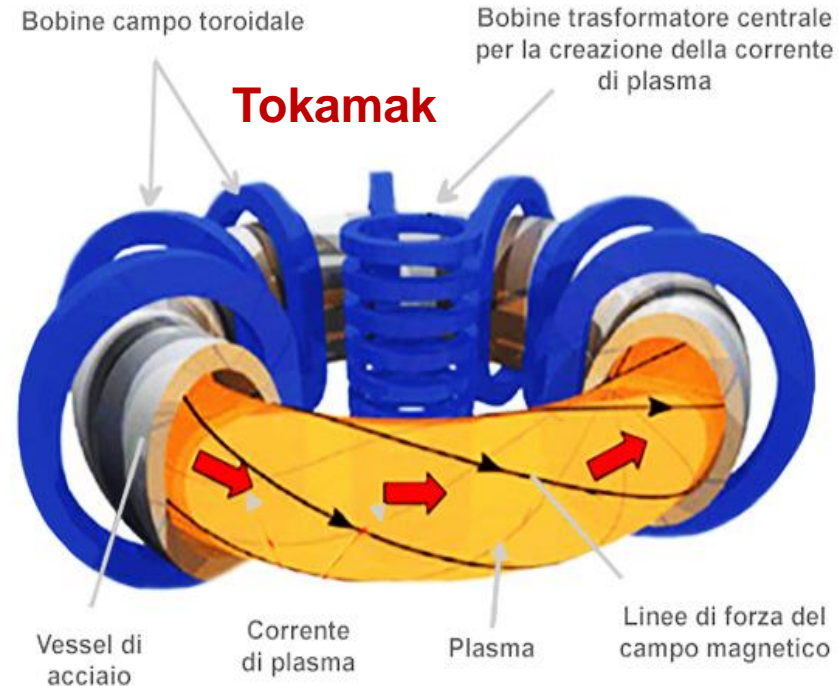


Fusione inerziale

Microsfere contenenti alcuni mg di DT sono compresse fino a densità di $\sim 10^{26} \text{ cm}^{-3}$ e a temperature di $\sim 10 \text{ keV}$, raggiungendo così le condizioni per la fusione ($p \sim 10^8 \text{ bar}$).

Fusione magnetica

Un plasma tenue (10^{14} cm^{-3}), è riscaldato a $\sim 20 \text{ keV}$ e confinato in una camera a vuoto da una opportuna configurazione di campi magnetici, prodotti da magneti esterni e da correnti circolanti nel gas stesso, che ne impediscono il contatto con le pareti del recipiente ($p \sim 1 \text{ bar}$).



Ciclo DT: Condizioni per il guadagno di energia

Potenza in uscita:

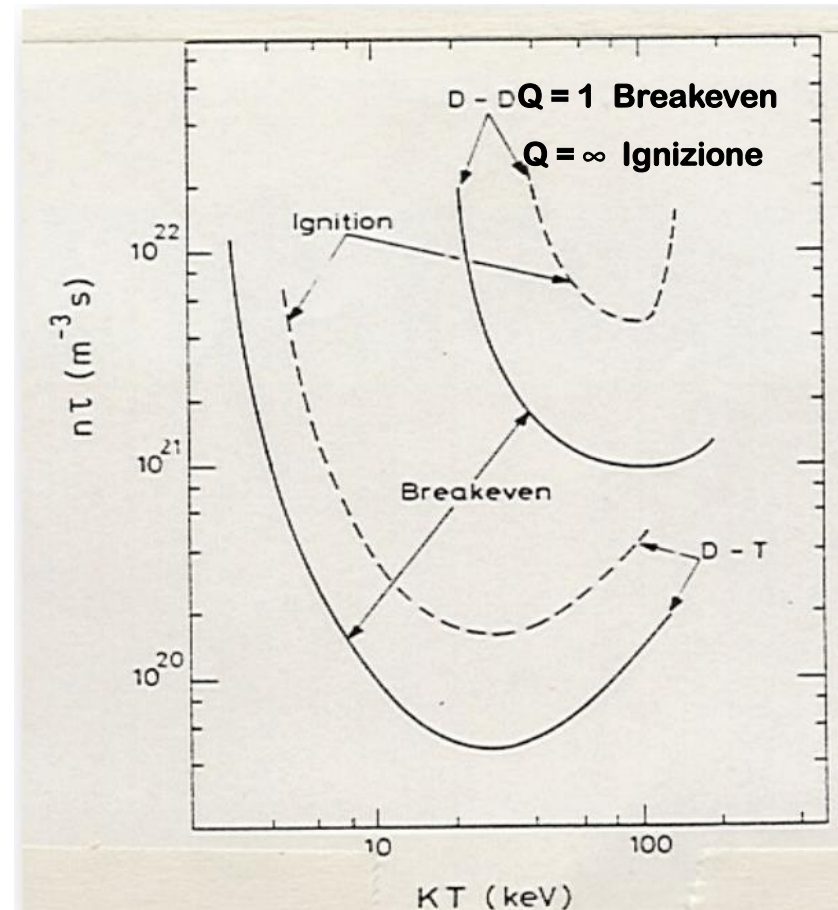
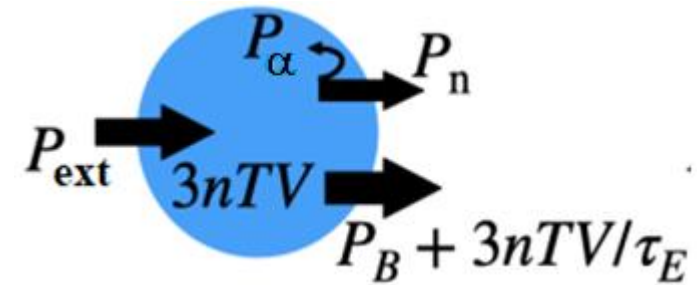
- per radiazione (bremsstrahlung), $P_B \propto n^2 T^{1/2}$,
 - per trasporto, $P_T = 3nTV/\tau_E$
- τ_E = tempo caratteristico di confinamento dell'energia

Potenza in entrata:

- riscaldamento ausiliario fornito dall'esterno P_{ext}
- potenza delle α , $P_\alpha = 1/5 P_{fus} \propto n^2 F(T)$

$$Q = P_{fus} / P_{ext} > 1 \text{ Breakeven}$$

$$n\tau_E > 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}\text{s}, T \approx 20 \text{ keV}$$



Dove siamo

- Negli esperimenti sin qui fatti sono già raggiunti valori di densità e temperatura del plasma simili a quelli richiesti in un reattore a fusione, e si è andati vicini al pareggio di potenza.

- JET (EU, UK)**

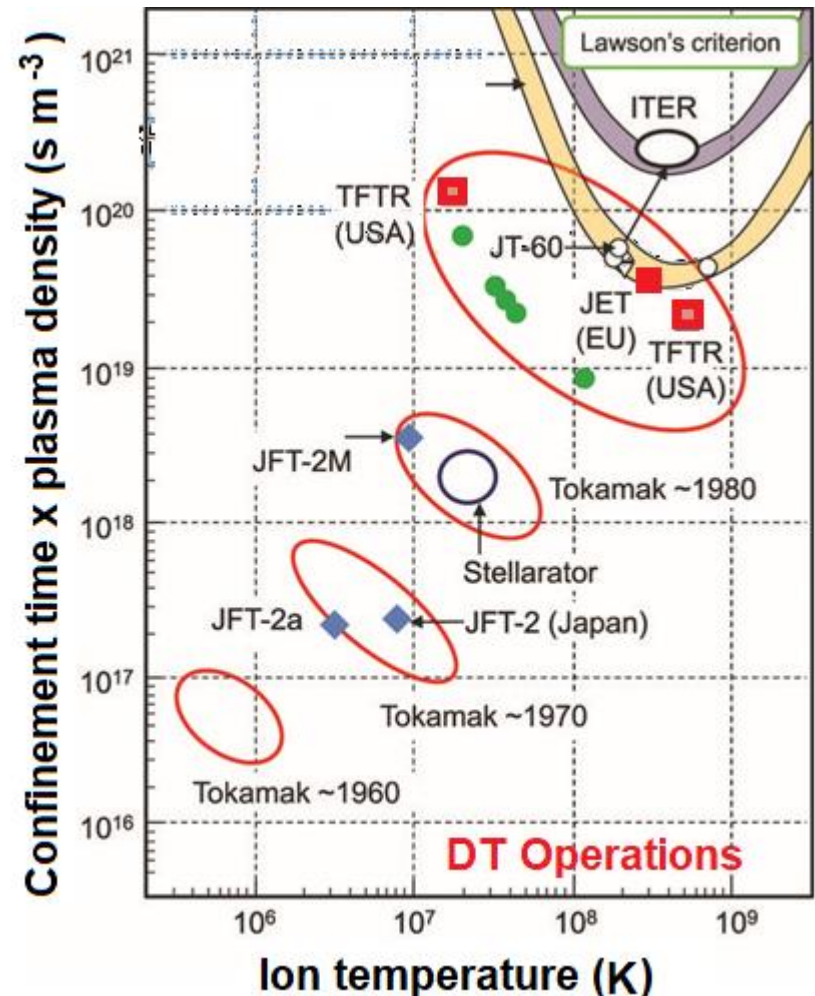
✓1997 $E_{fus} = 22 \text{ MJ}$, $P_{fus} = 16 \text{ MW}$ $Q = 0.65$.
($P_{ext} = 25 \text{ MW}$)

✓2021 $E_{fus} = 59 \text{ MJ}$, $P_{fus} = 11 \text{ MW}$ $Q = 0.3$
($P_{ext} = 33 \text{ MW}$)

- NIF (LLNL, US)**

✓2021 $E_{fus} = 1.35 \text{ MJ}$ a fronte di 1.9 MJ
di energia assorbita dal plasma.

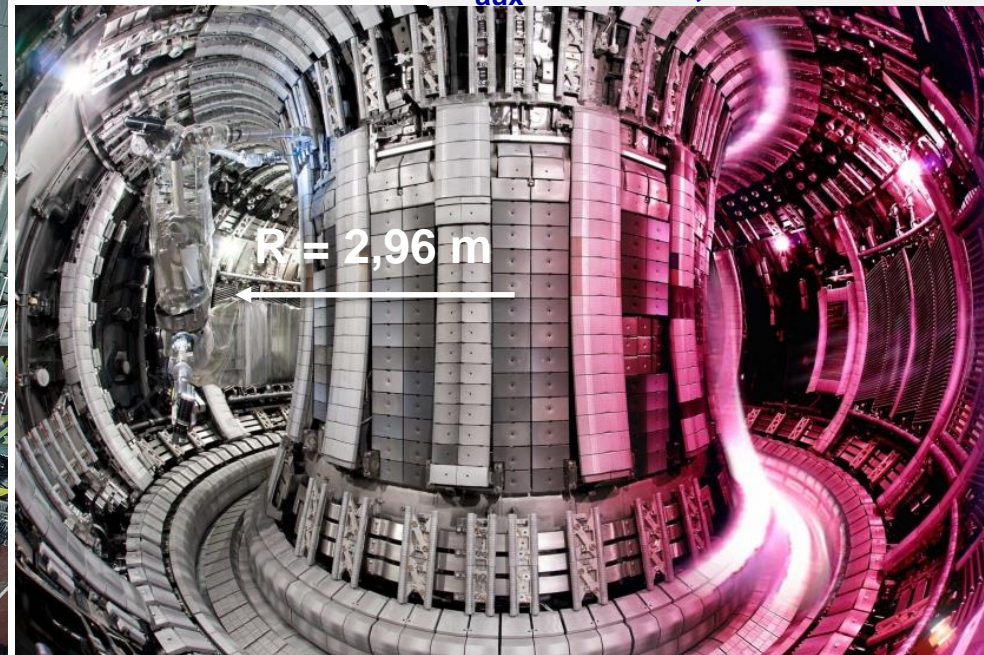
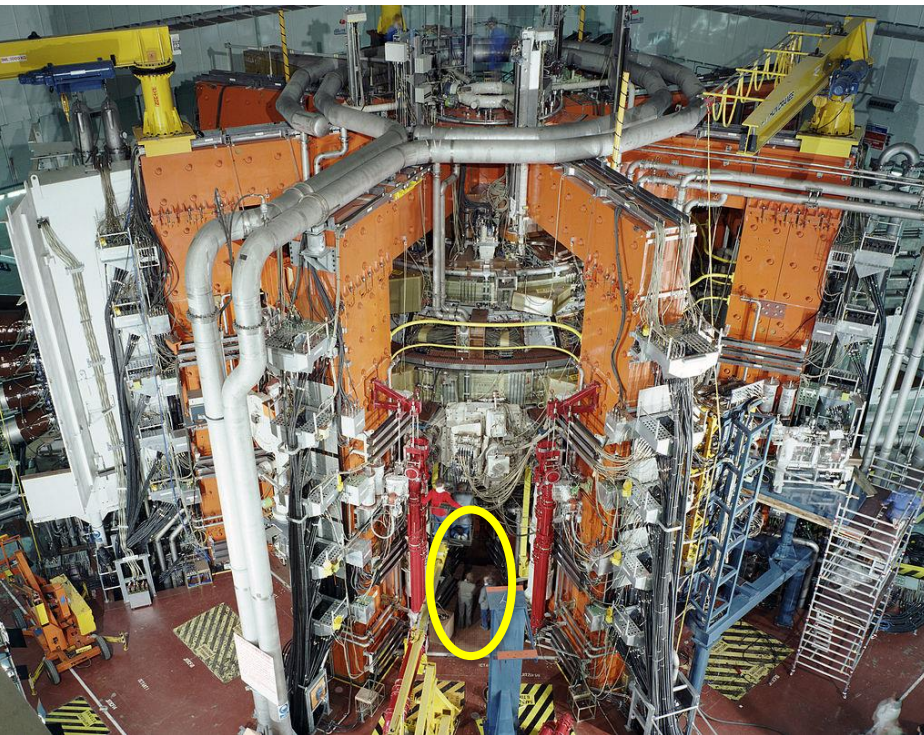
✓2022 $E_{fus} = 3.15 \text{ MJ}$ a fronte di 2.05 MJ di
energia assorbita dal plasma



JET – Joint European Tokamak

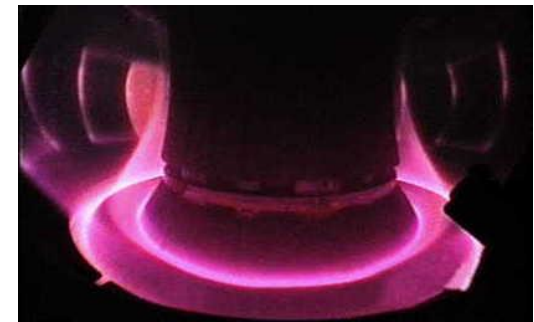
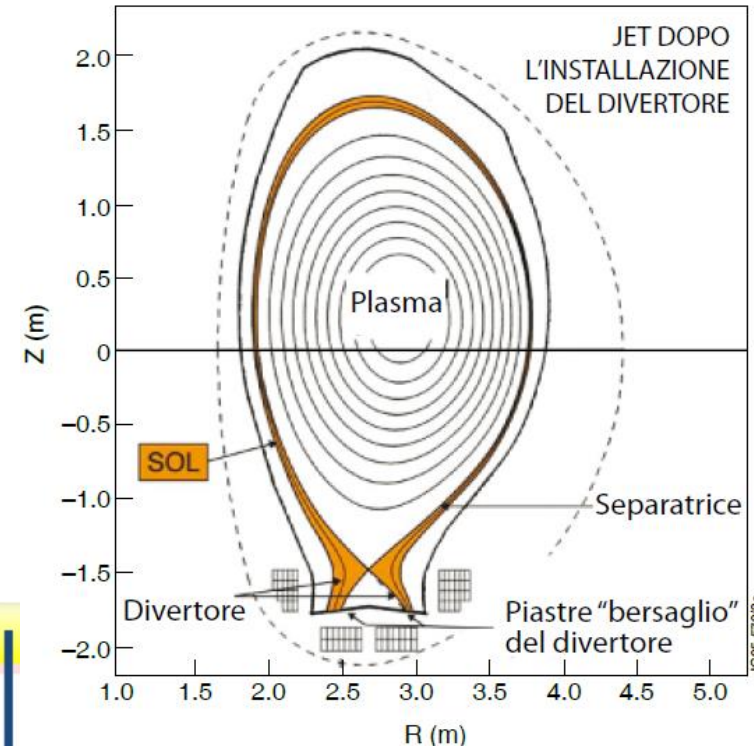
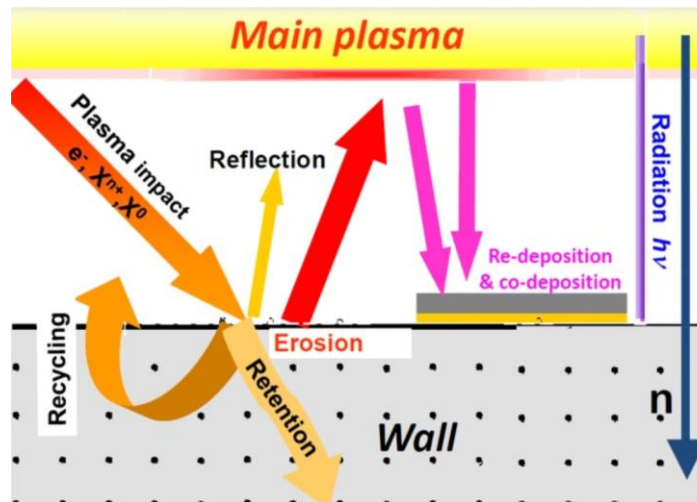
- Attualmente l'esperimento di fusione (tokamak) più grande al mondo
- L'unico in grado di operare in deuterio-trizio (DT)
- Due campagne sperimentali in DT nel 1997 e nel 2021

$R = 2,96 \text{ m}$, $a = 1,25 \text{ m}$
 $B < 3,45 \text{ T}$, $I < 4,8 \text{ A}$
 $P_{\text{aux}} = 38 \text{ MW}$, $V = 100 \text{ m}^3$



Il divertore

- Fuori dall'ultima superficie magnetica chiusa (**separatrice**), le particelle non confinate vengono convogliate verso il **divertore**
- In questo modo si rende più semplice e più efficiente il pompaggio del gas, il controllo della densità e lo smaltimento delle alfa
- Lo smaltimento del calore e delle alfa avviene in una superficie limitata sul divertore
→ **fino a 20 MW/m² in ITER**



Campagna in DT al JET - 2021

JET ITER-like Wall (tutta in carbonio prima del 2011)

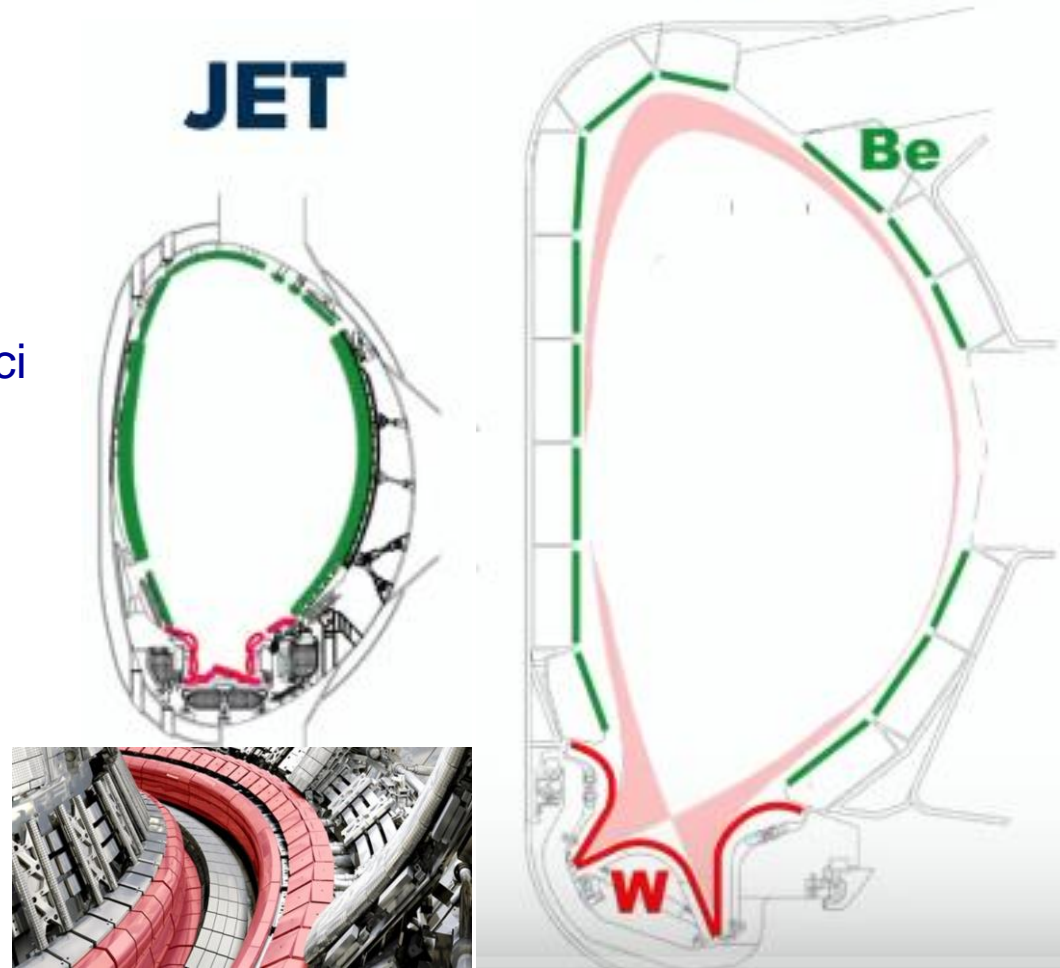
Be per la prima parete,

- basso numero atomico
- buona conducibilità termica
- no erosione chimica
- basso tasso di sputtering
- ma bassa resistenza a shock termici

W per il divertore

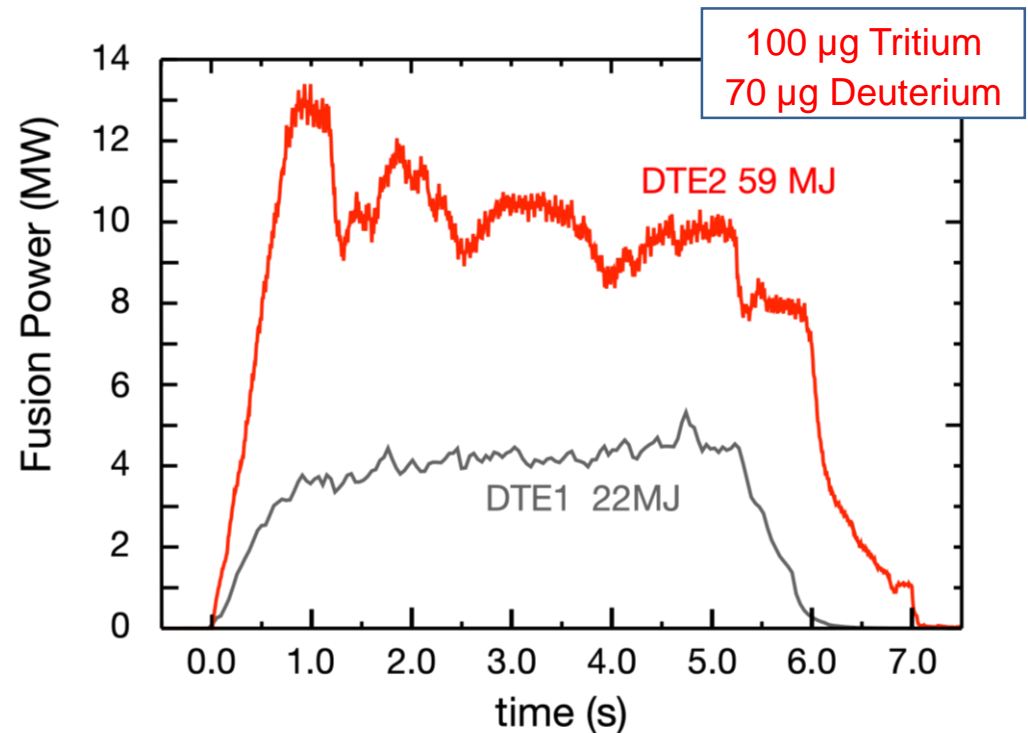
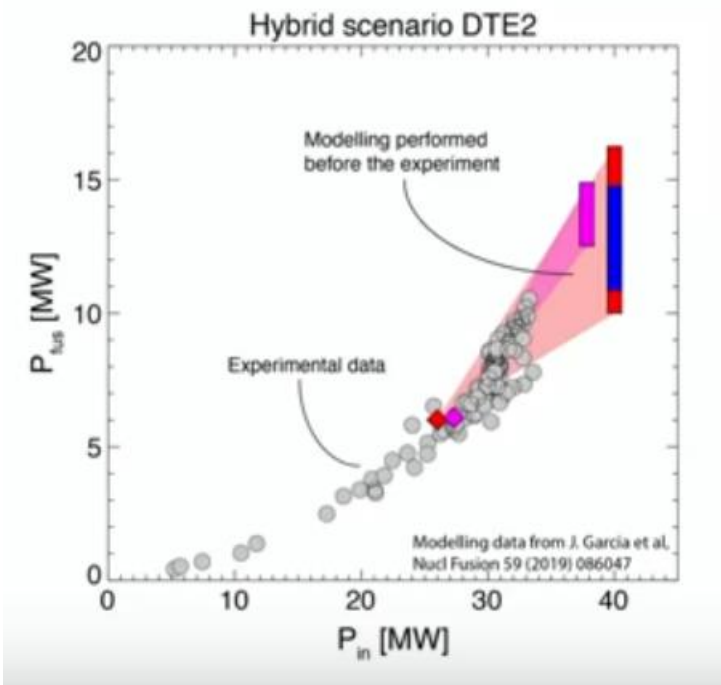
- Elevata temperature di fusione (3422°C)
- Elevata resistenza a shock termici
- Ma alto numero atomico

Stessi materiali adottati in ITER



Risultati della nuova campagna DT al JET (2021)

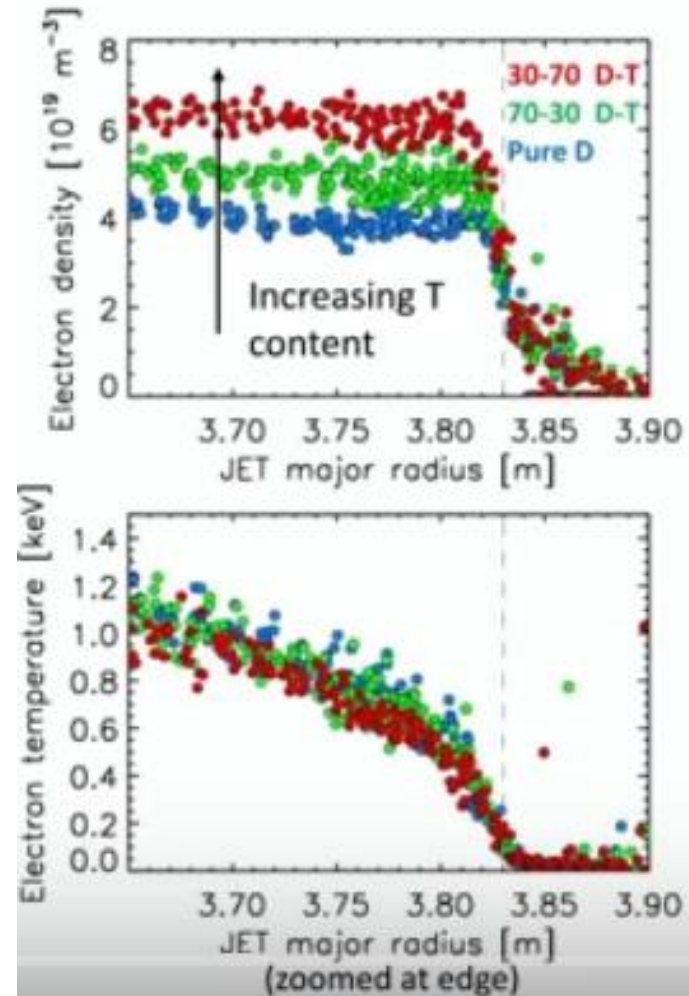
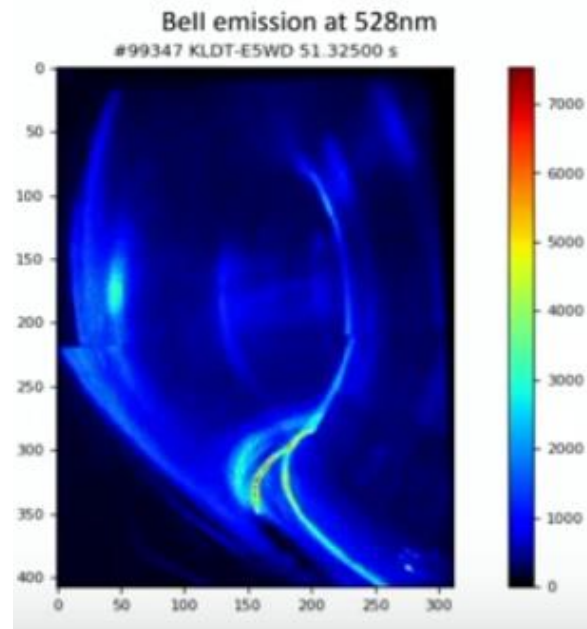
- Sostentamento della fusione ad alto livello di potenza per $t \gg \tau_E$
- Record di energia da fusione prodotta
- Effetto misurabile del riscaldamento delle alfa
- Conferma delle predizioni teoriche e estrapolazioni per ITER



Risultati della nuova campagna DT al JET (2021)

- Studio dell'effetto isotopico – conferma dell'effetto positivo dell'aumento della massa sul confinamento anche con la ITER-like-Wall

- Effetto isotopico sull'erosione della prima parete: passando dal D al T aumenta il tasso di erosione sul W, ma entro limiti accettabili

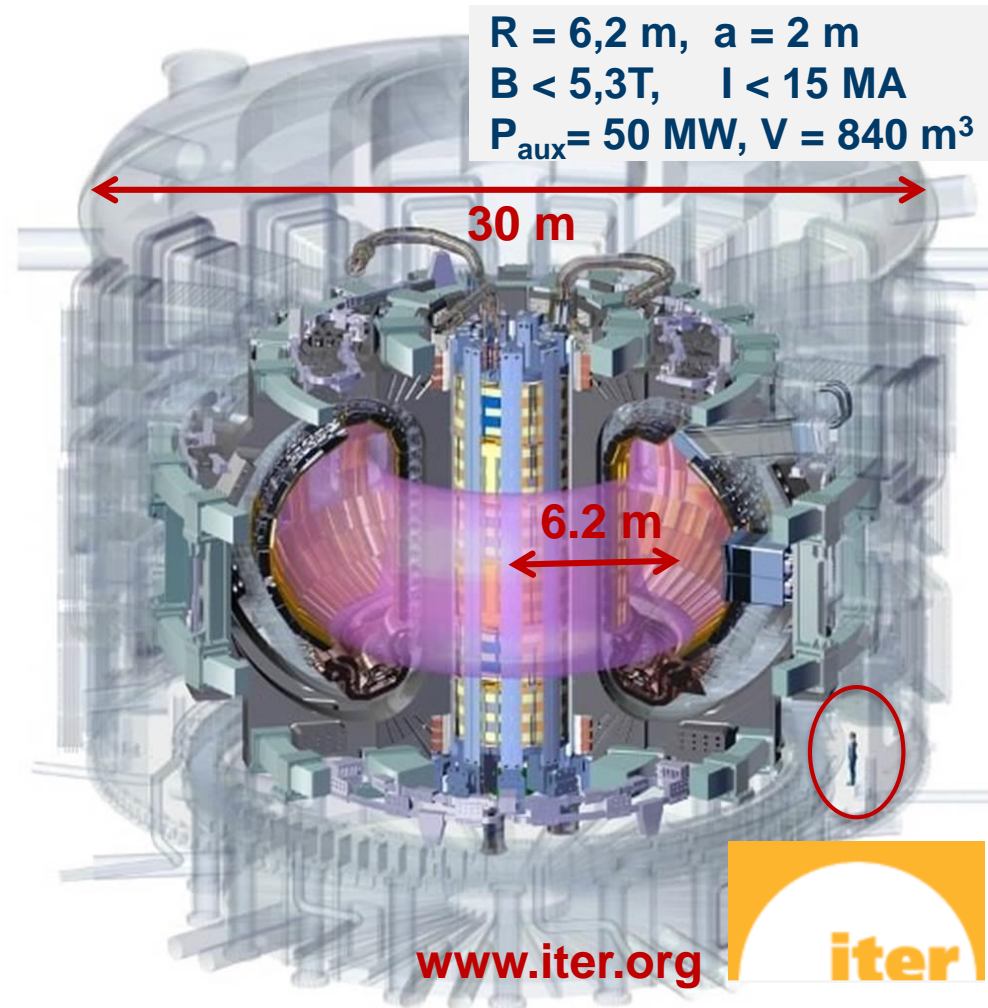


ITER : il prossimo passo

In costruzione a Cadarache (Francia) nell'ambito di una collaborazione tra Europa, Giappone, Russia, Stati Uniti, Cina, Corea del Sud, India

Obiettivi:

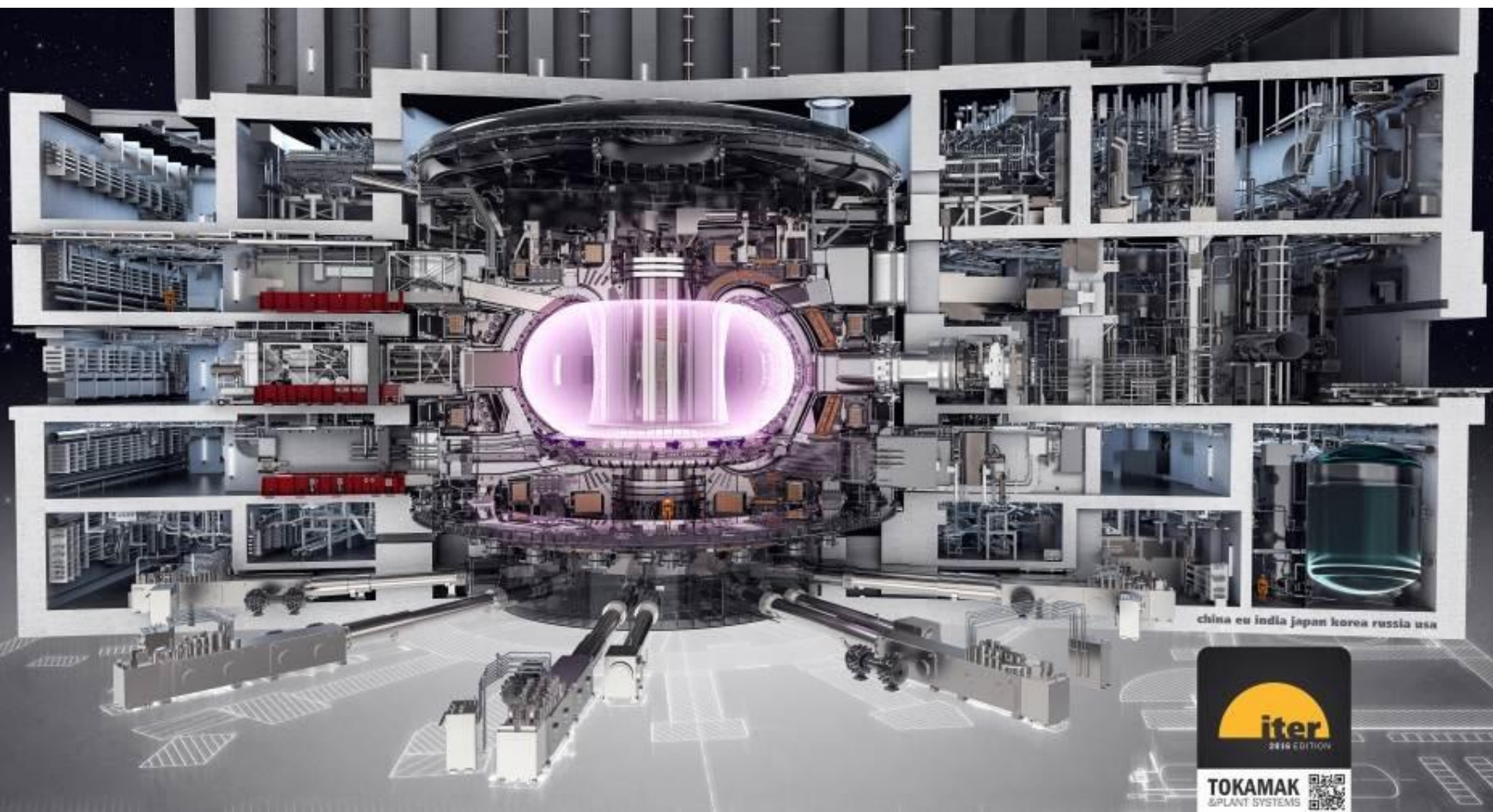
- dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione
- $Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{ext}} = 10$
- **500 MW** di potenza di fusione a fronte di **50 MW** di potenza iniettata nella camera di reazione per impulsi della durata di **alcune centinaia di secondi fino a circa un'ora**



ITER: il sito (Cadarache, Francia)



L'Edificio Tokamak



ITER: la base fisica

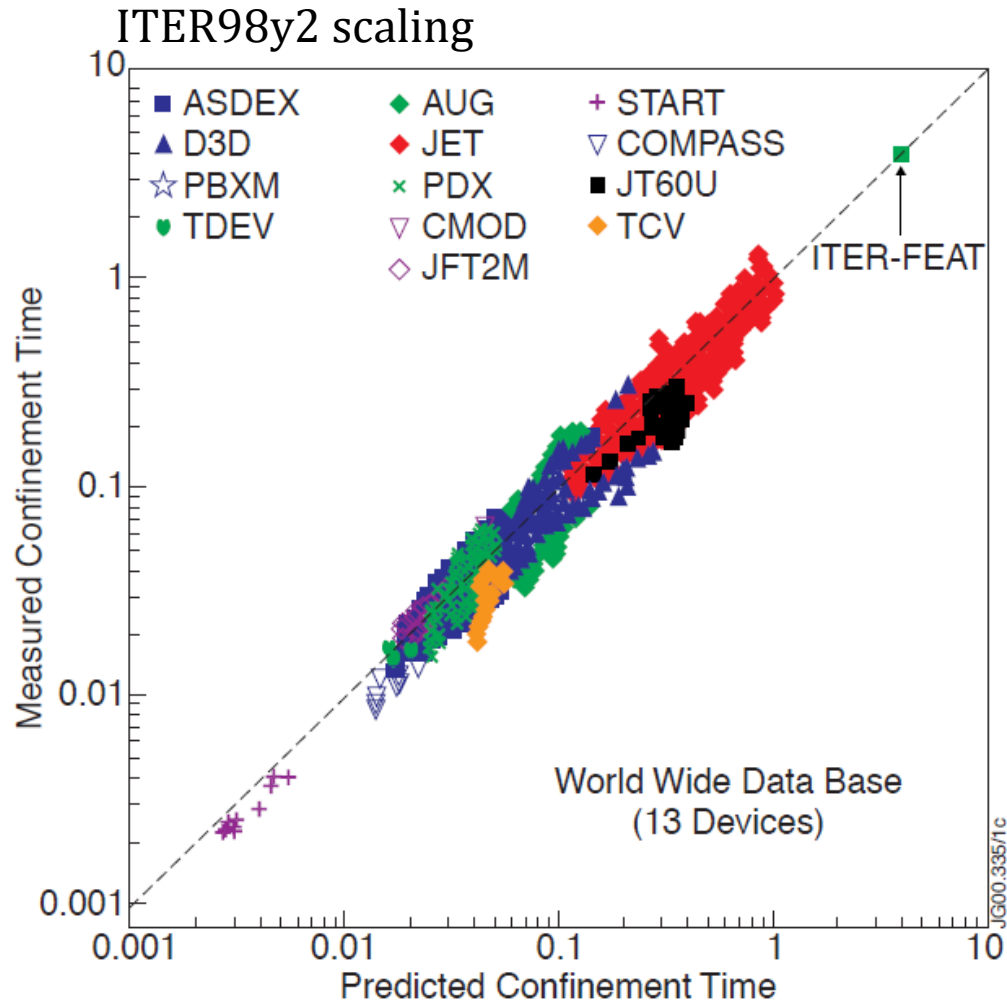
- La base fisica di ITER è solidamente fondata sui risultati ottenuti nei vari esperimenti sin qui condotti
- Rispetto agli esperimenti attuali ITER rappresenta una estrapolazione sufficientemente piccola da renderci confidenti nel raggiungimento degli obiettivi ma al tempo stesso significativa per la dimostrazione della fusione

$$\tau_{E, ITER} = 4.3s$$

$$nT \tau_{E, ITER} \sim 8.6 \times 10^{21} m^{-3} s \text{ keV}$$

(con $n=10^{20} m^{-3}$ e $T=20keV$)

$$Q=10$$



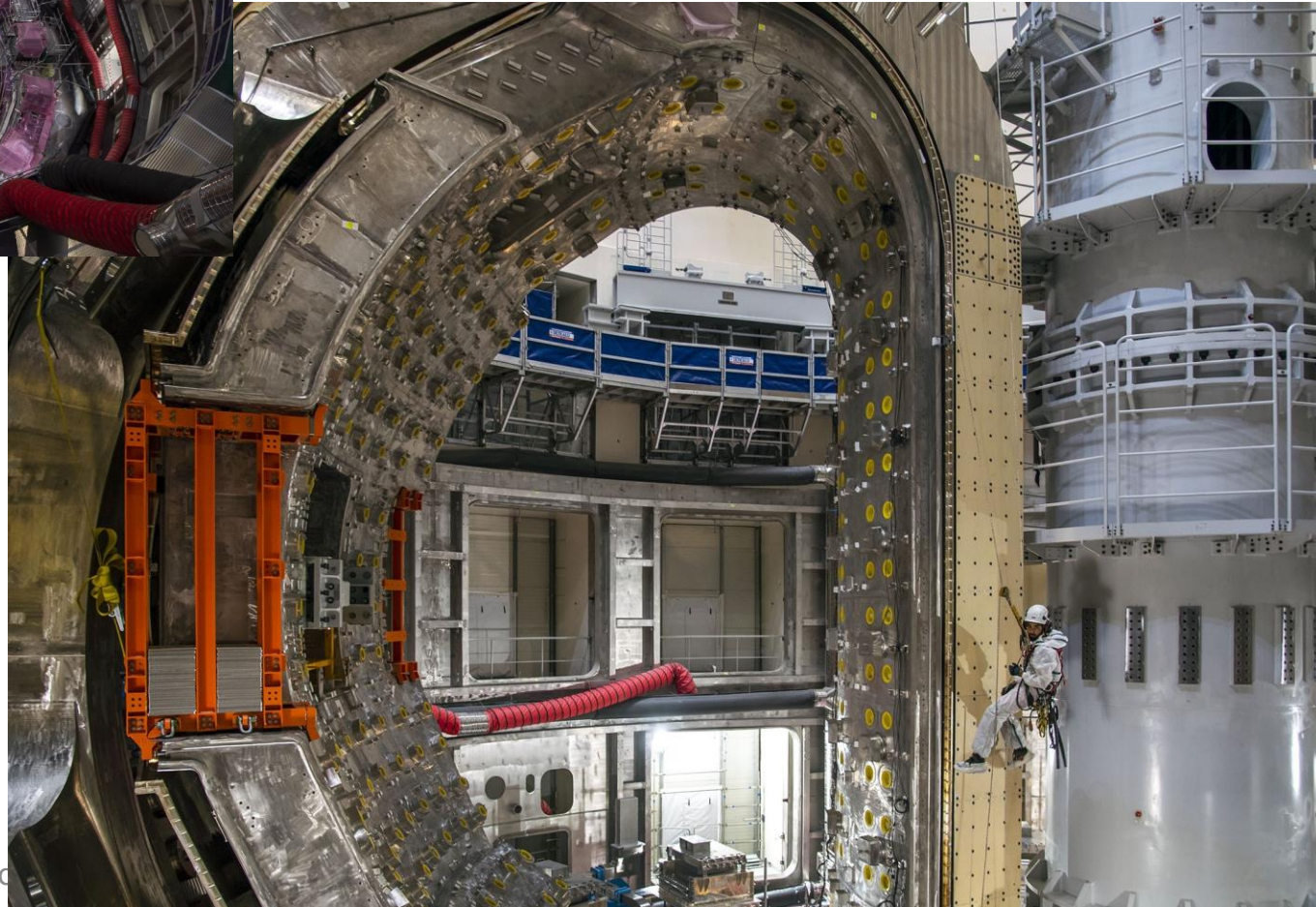
$$\tau_{E,98y2} \propto I_p R_o^2 B^{0.15} P^{-0.69} n^{0.41}$$

ITER: l'assemblaggio



L'interno del criostato con la bobina poloidale n.6 e dummy solenoide centrale

Il primo settore del vacuum vessel in sede all'interno del criostato.



ITER: Vacuum vessel e blanket

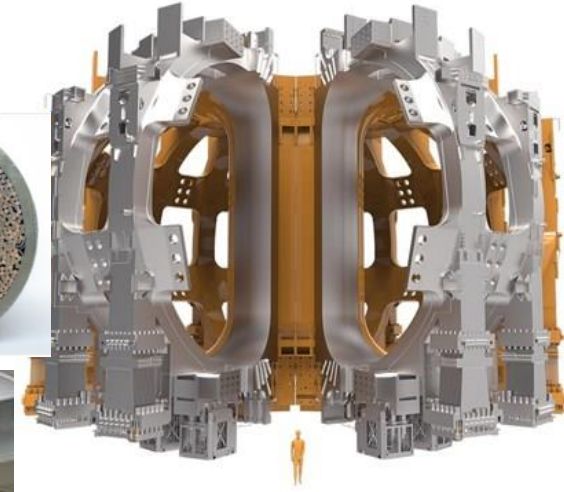
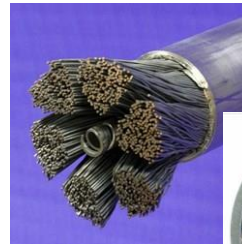
- 9 settori di Vacuum vessel di cui 5 costruiti in Italia dal **Consorzio Ansaldo, Mangiarotti Walter Tosto**



ITER: magneti superconduttori del campo toroidale

- **18 bobine superconduttrici**
 - Raffreddamento LHe (4 K, 0.6 MPa)
 - Corrente nominale 68 kA
 - Campo magnetico di picco 11.8 T
 - ~ 82 kms di Nb₃Sn Cable in Conduit Conductor

- **10 delle 18 bobine costruite in Italia**
 - **ENEA/TRATOS/CRIOTEC** parte dei cavi in Nb₃Sn
 - **ASG** gli avvolgimenti
 - **SIMIC** le strutture di supporto e le casse



ITER: magneti superconduttori del campo poloidale

- **6 bobine superconduttrici**
 - Raffreddamento LHe (4 K, 0.6 MPa)
 - Corrente nominale 45 kA
 - Campo magnetico di picco 6 T
 - 60 km NbTi Cable in Conduit Conductor

F2, PF3, PF4 e PF5 costruite on site

ASG Superconductors, Italy (engineering integration);

Sea Alp, Italy (winding tooling),

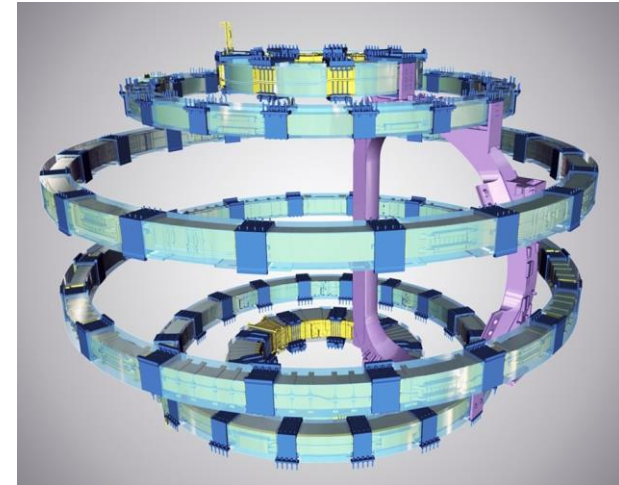
Dalkia-Veolia, France (site and infrastructure);

Elytt Energy, Spain

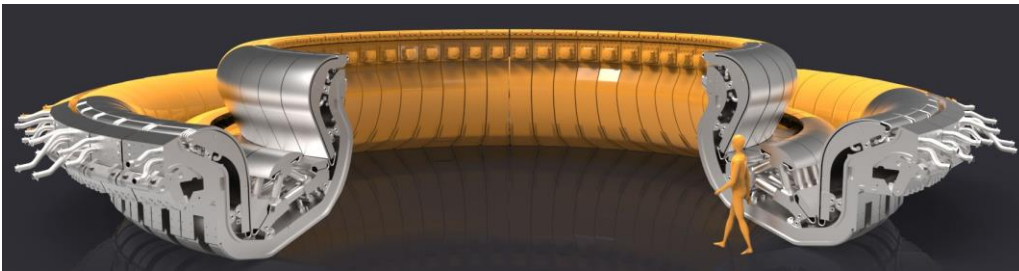
Alsytom/SEIV, France (handling and impregnation)

CNIM, France e Criotec Impianti, Italy

(manufacturing and cold testing)



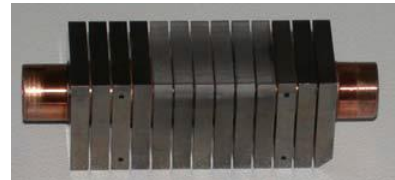
ITER: il divertore (target e supporto)



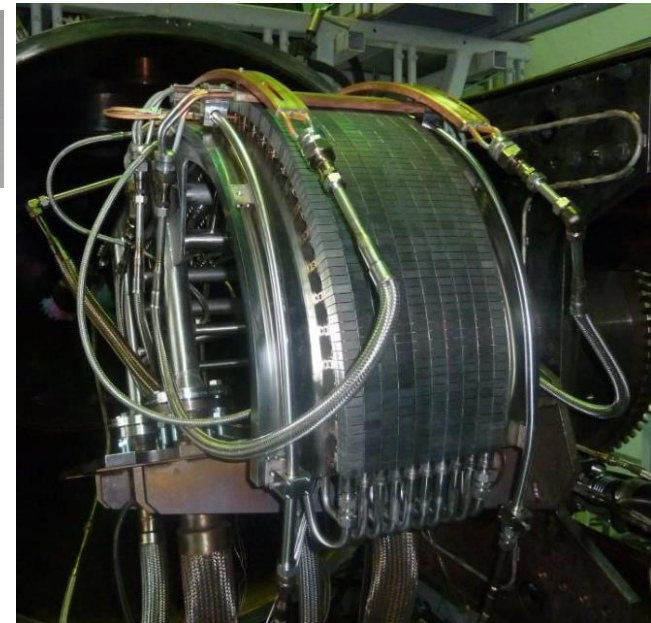
54 "cassette" di support ai target realizzate tutte in Italia da **Walter Tosto**



Target di tipo monoblocco con tegole di tungsteno e tubi in CuCrZr (tecnologia di giunzione sviluppata in **ENEA**)



Prototipo scala 1:1 realizzato da **Ansaldo Nucleare** con **ENEA** e testato con successo a 5 MW/m^2 per 5000 cicli e 20 MW/m^2 per 300 cicli di 10 s ciascuno



Sistemi di riscaldamento

Iniettori di neutri (NBI)

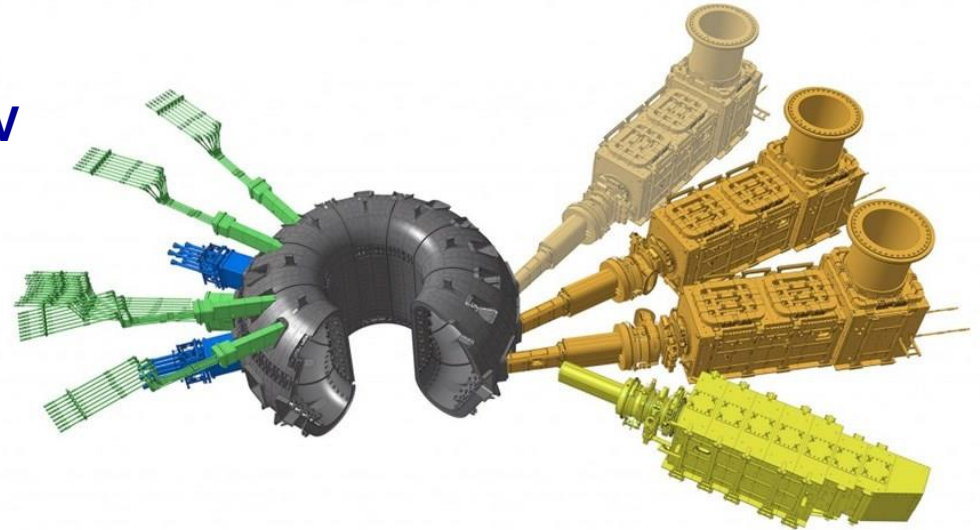
2 iniettori, **16.5 MW** ciascuno, $E_b = 1 \text{ MeV}$

Ion resonance heating (ICRH)

10 MW, 2 antenne, 40 to 55 MHz.

Electron resonance heating (ECRH)

24 gyrotrons da 1 MW, 170 GHz,



Neutral Beam Test Facility Consorzio RFX, Padova

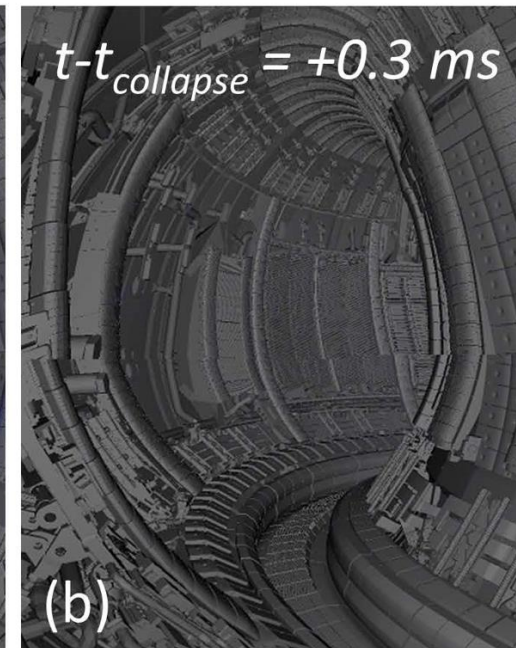
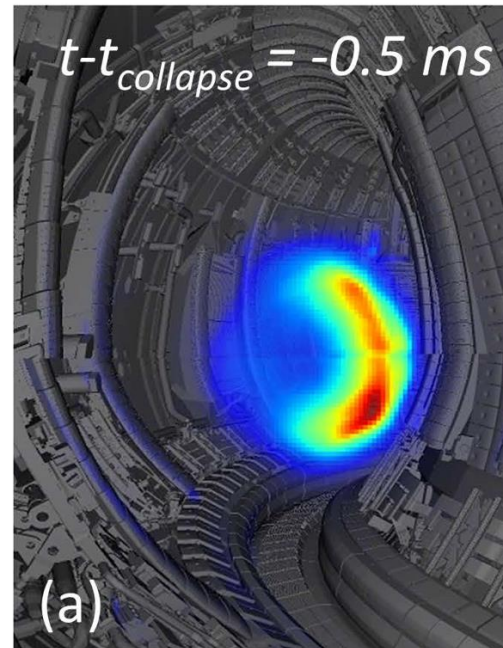
Dimostrazione delle performance del NBI in termini di potenza, energia e durata simultaneamente



ITER: dimostrazione dell'energia da fusione

Sviluppo e dimostrazione delle operazioni con «burning plasma» ad alto Q

- Buon confinamento dell'energia
- Buon confinamento delle particelle di plasma
- Controllo della stabilità del plasma
- Controllo delle disruzioni
- Controllo dello smaltimento della potenza
- Controllo delle impurità
- Protezione delle pareti interne attivamente raffreddate



Dimostrazione di alcune tecnologie, ma ITER non produrrà trizio, non produrrà energia elettrica

La Roadmap europea per la fusione

- **L'Europa ha adottato una Roadmap (2014, 2018)**

Che definisce il programma di attività verso l'obiettivo dell' energia elettrica da fusione

- **Il programma previsto dalla Roadmap è attuato dal Consorzio Eurofusion**

- 30 organizzazioni di ricerca
- 152 entità affiliate
- 25 Stati Membri
- Regno Unito, Svizzera e Ucraina come associati

- **Finanziamento tramite Grant Euratom per 550 M€ (2021-2025)**

Eurofusion Consortium ENEA Programme Manager	
RFX	UniCatania
DTT	PoliTo
CNR	UniPalermo
CREATE	UniCagliari
INFN	UniTuscia
UniTorVergata	CINECA
UniSapienza	
UniRomaTre	ENI
UniPisa	ANN-Ansaldo
UniMiBicocca	CSM-RINA
PoliMi	LT Calcoli



In revisione

European Research Roadmap
to the Realisation of Fusion Energy

LONG VERSION

www.euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/

The logo for EUROfusion, consisting of a stylized blue fusion reactor symbol with a plug on the right side, set against a background of overlapping circles.

La Roadmap europea per la fusione

- Roadmap della fusione ha l'obiettivo di completare gli sviluppi che consentano l'inizio della costruzione di un reattore dimostrativo (DEMO), quindi l'inizio dell'operazione intorno alla metà del secolo, tramite la sperimentazione in ITER e nelle altre macchine, e un adeguato programma tecnologico.

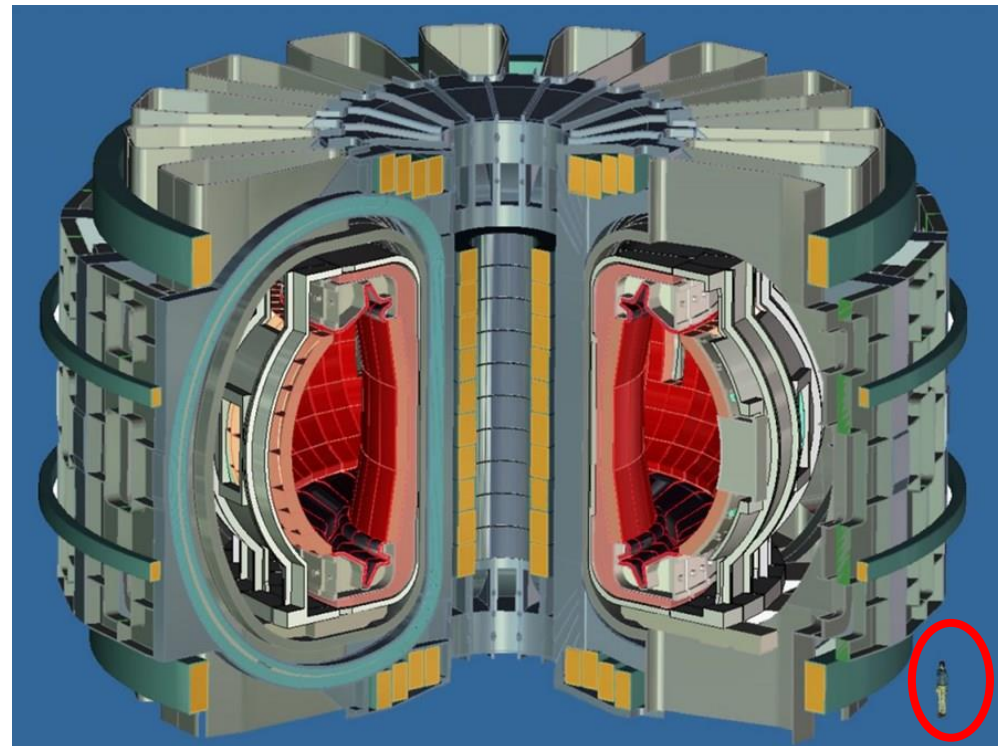
Performance del plasma
Guadagno in energia

**Tecnologie
del reattore**



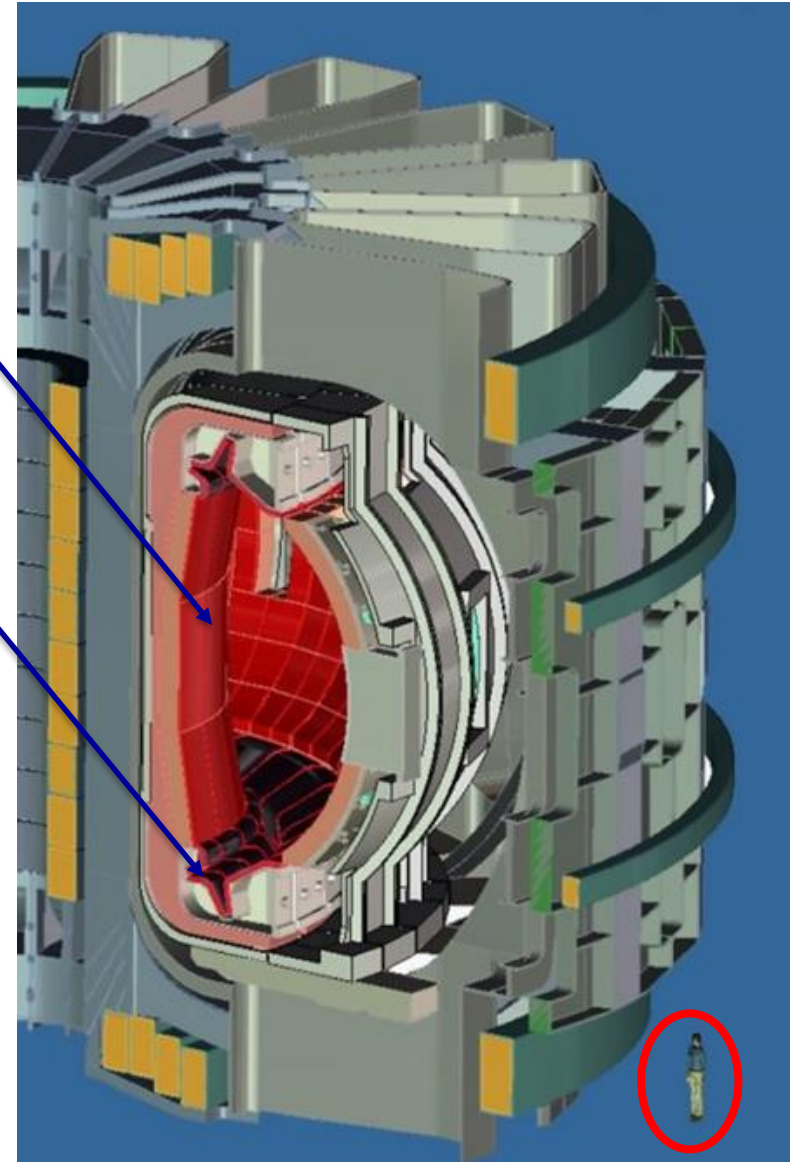
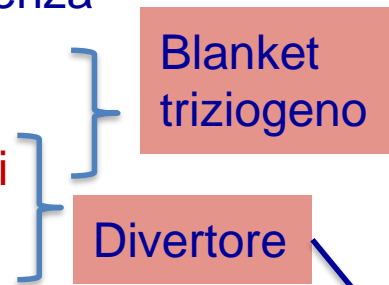
Materiali
Produzione di trizio
Smaltimento del calore

Sicurezza
Economicità



Le «mission» della Roadmap

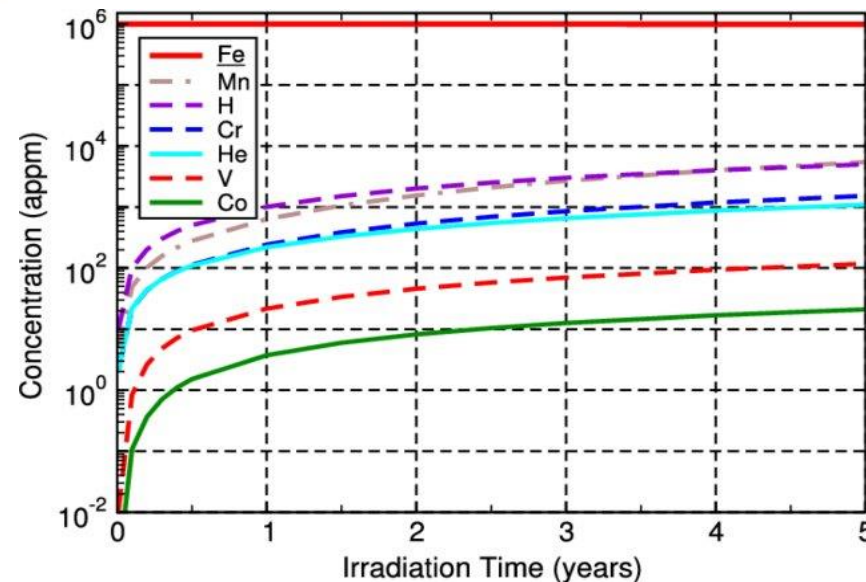
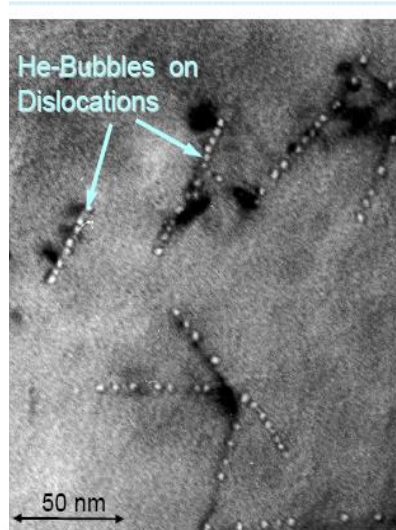
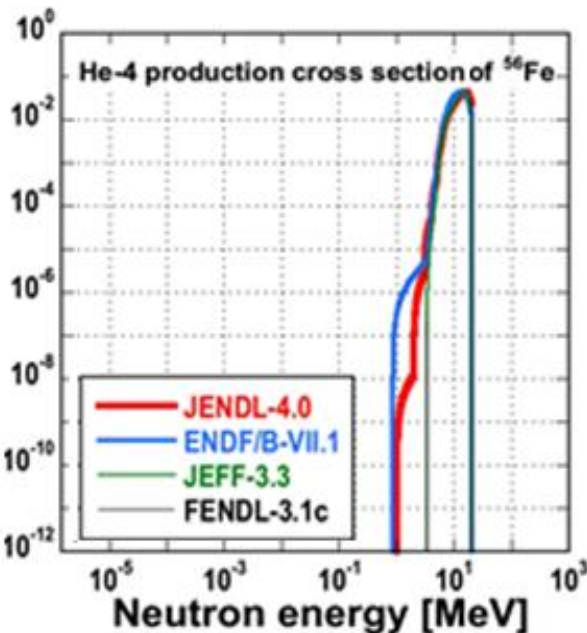
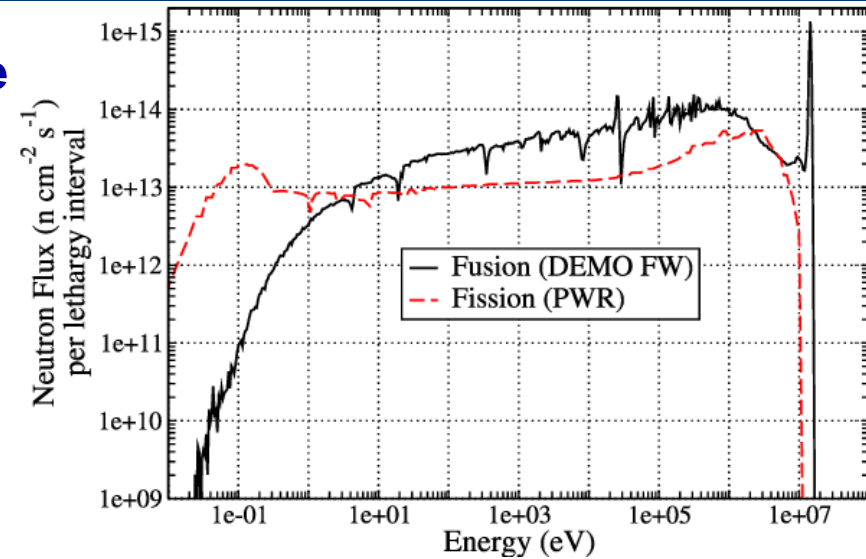
- Regimi di plasma ad alta potenza
- Autosufficienza per il trizio
- Materiali resistenti ai neutroni
- Estrazione del calore
- Progetto integrato di DEMO
- Sicurezza intrinseca
- Economicità



M3. Neutron tolerant materials

Lo spettro in energia dei neutroni di fusione è più «duro» rispetto a quello di fissione

- He (appm) /dpa ~ 10
- Degradazione delle proprietà fisiche e termo-meccaniche
- Maggiore infragilimento ad alta temperatura dovuto alla produzione di elio
- Trasmutazioni

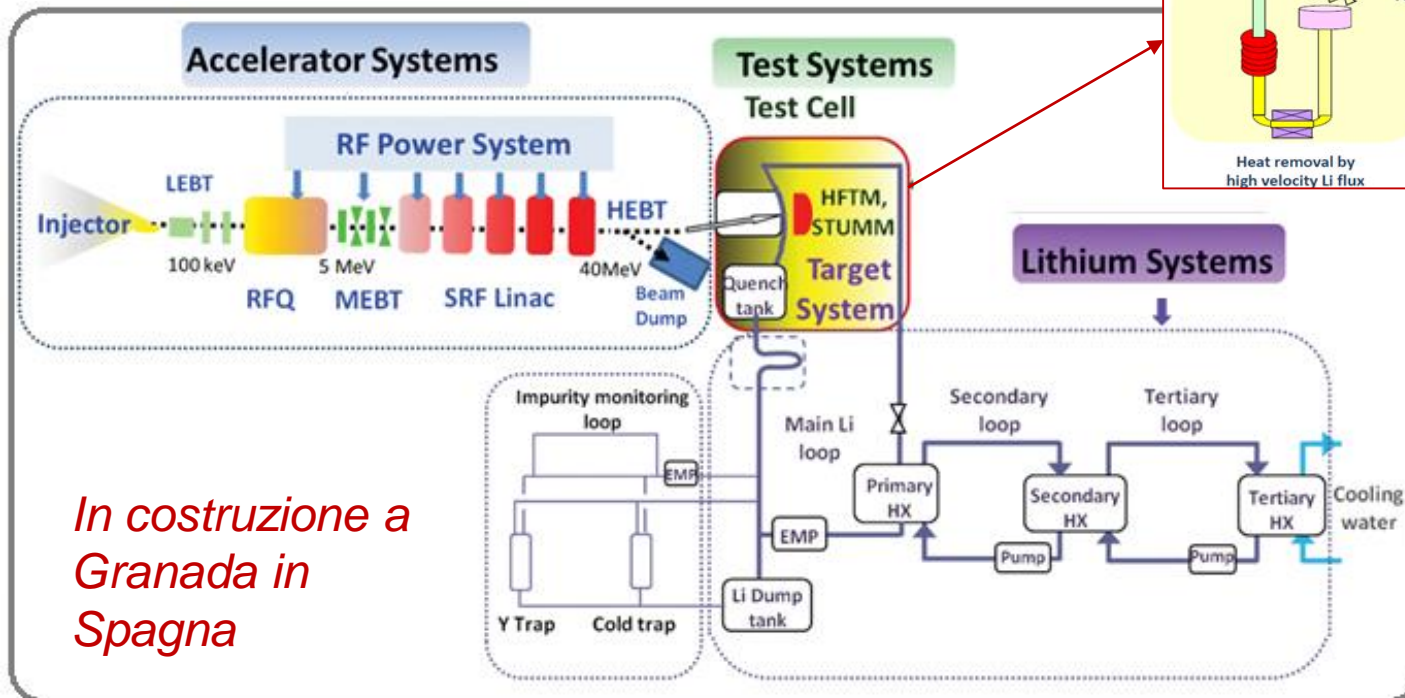
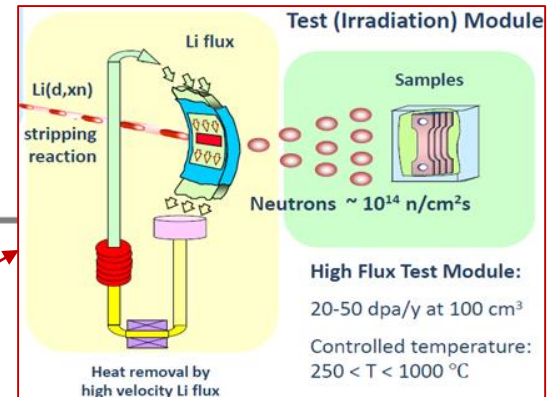


M3. Neutron tolerant materials

IFMIF-DONES: Sorgente di neutroni per la qualifica dei materiali per DEMO

- Singolo fascio D, 125 mA, E=40 MeV
- Sezione del fascio <math><20\text{ cm} \times 50\text{ cm}</math>
- Target liquido di Litio - Velocità $\sim 15\text{ m s}^{-1}$
- 20 dpa/a in condizioni controllate di temperatura
- Flusso neutronico $10^{18}\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$

**Acciai RAFM 8–10% Cr
W and Cu alloys**



*In costruzione a
Granada in
Spagna*

M3. Neutron tolerant materials

Acciai Ferritici Martensitici ad attivazione ridotta (RAFM)
 Mo, Nb, Co, Ni sostituiti con W, V, Ta

EUROFER (9CrWVTa)
 (350°C – 600°C).

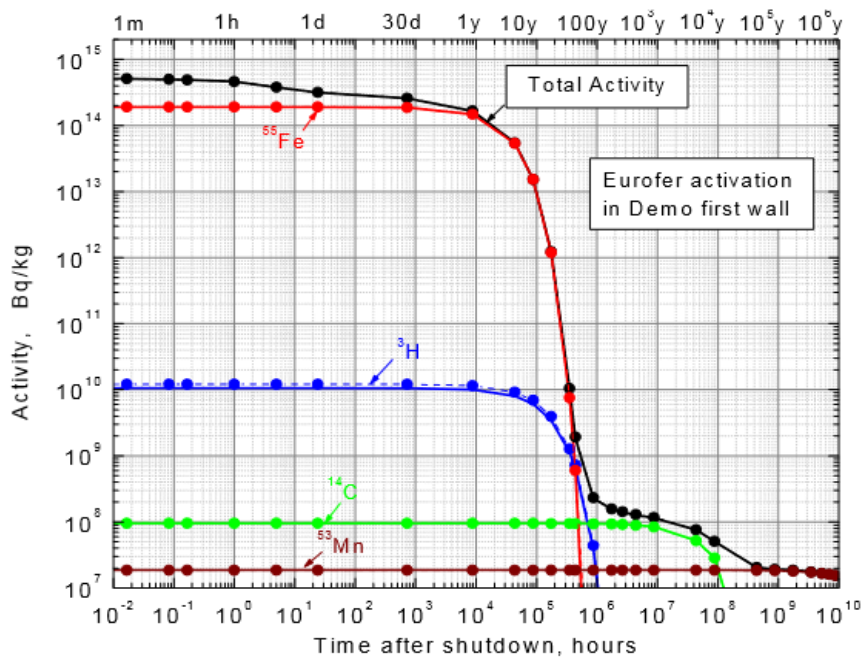


Fig. 1a: Specific activity [Bq/kg]

First Wall segment reconstruction (HIP- and EB process)

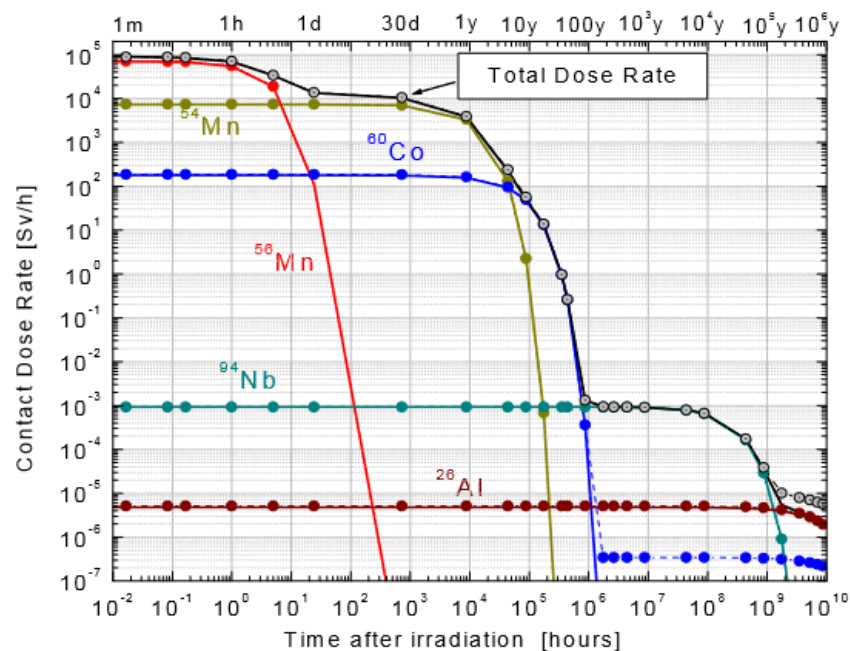


Fig. 1b: Contact γ -dose rate [Sv/h]

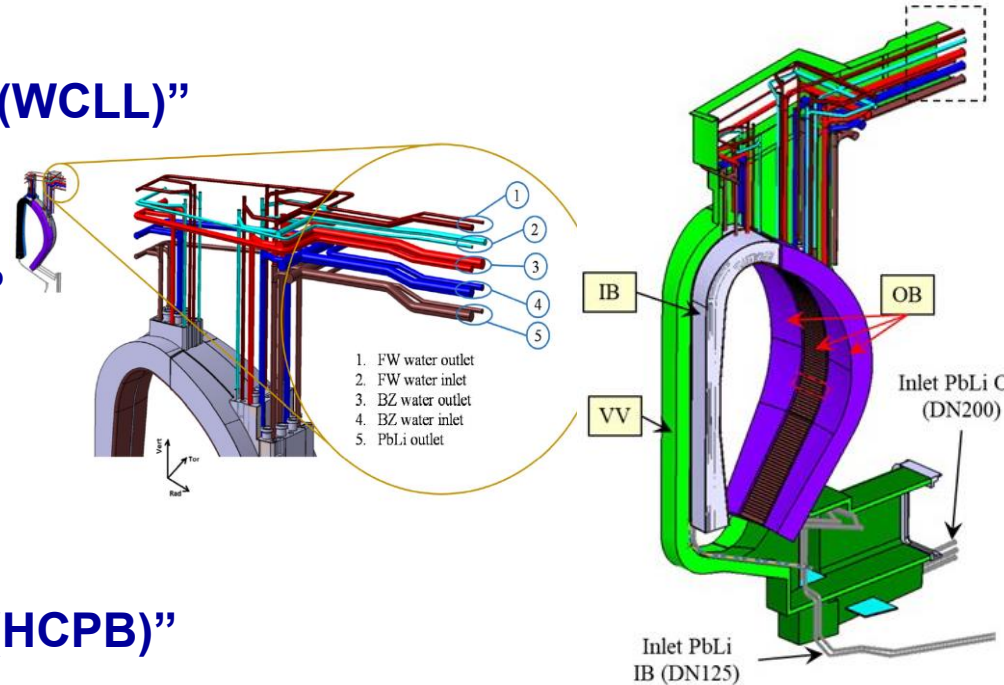
M4. Tritium self-sufficiency:

autosufficienza $T/n > 1.1$
 $\sim 55.6 \text{ kg} / \text{GW}_{\text{Fus}} / \text{y}$

Mantello “Water Cooled Lithium Lead (WCLL)”

Structural Material: EUROFER

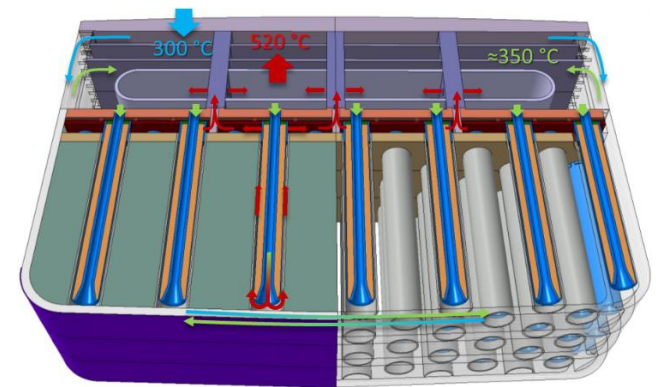
- **Breeder/neut. multiplier:** PbLi, ${}^6\text{Li}$ at 90%
- **Coolant:** Water 295-328°C @ 15.5 MPa
- T extraction from recirculating PbLi



Mantello “Helium Cooled Pebble Bed (HCPB)”

Structural Material: EUROFER

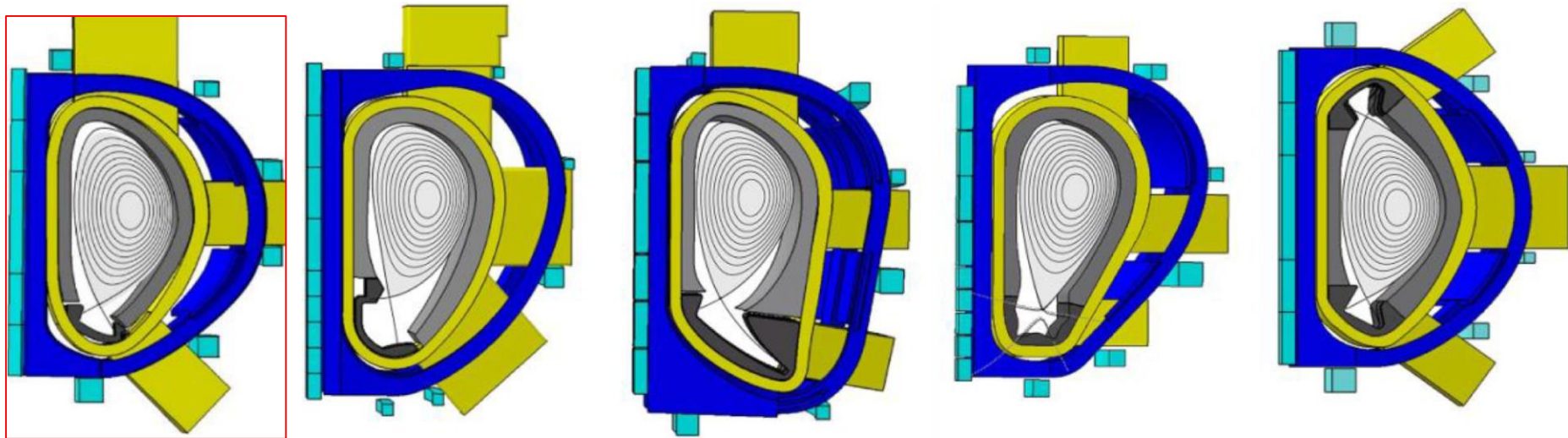
- **Breeder:** $\text{Li}_4\text{SiO}_4 / \text{Li}_2\text{TiO}_3$ pebble bed, Li at 60%
- **Neutron multiplier:** Beryllide (TiBe12)
- **Coolant:** He 300-520°C @ 8 Mpa
- T extraction with purge Helium



M2. Heat-exhaust systems:

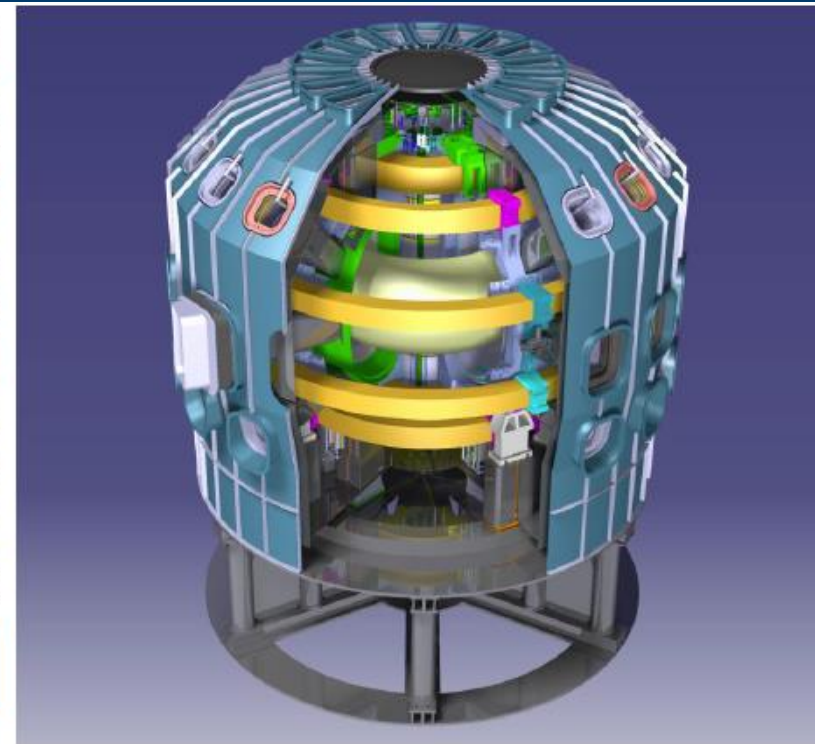
Divertore di DEMO: fino a 60MW/m^2 (~ come sulla superficie del Sole)

- La soluzione adottata per ITER potrebbe non essere sufficiente per DEMO
- ✓ sviluppo di regimi altamente radiativi → maggiore potenza persa per radiazione
- ✓ Configurazioni alternative con maggiore superficie “bagnata” sul divertore



Da sinistra: **ITER-like divertor**, X divertor, super X divertor, snowflake divertor, double null divertor).

M2. Heat-exhaust systems: Divertor Tokamak Test facility (DTT)



Tokamak superconduttore dedicato allo sviluppo e dimostrazione di soluzioni alternative per il divertore di DEMO

	DTT	ITER	DEMO
R (m)	2.19	6.2	9.1
a (m)	0.7	2	2.93
A	3.1	3.1	3.1
I_p (MA)	5.5	15	19.6
B (T)	6	5.3	5.7
Heating P_{tot} (MW)	45	120	460
P_{sep}/R (MW/m)	15	14	17
Pulse length (s)	95	400	7600

Conclusioni

- L'Europa persegue l'energia da fusione come elemento importante del futuro mix energetico
- ITER è l'esperimento chiave della Roadmap
- In parallelo a ITER stiamo sviluppando le tecnologie per progettare, costruire e operare in sicurezza un reattore dimostrativo DEMO:
 - ✓ ragionevole estrapolazione da ITER
 - ✓ Validazione delle tecnologie e innovazione
 - ✓ Integrazione dei criteri di sicurezza e licenziabilità
 - ✓ esperienza industriale maturata per ITER
- L'obiettivo è di produrre energia elettrica da fusione intorno alla metà del secolo – e di avere soluzioni disponibili tra 15 anni da oggi!.

Paola Batistoni

paola.batistoni@enea.it



```
1101 0110 1100  
0101 0010 1101  
0001 0110 1110  
1101 0010 1101  
1111 1010 0000
```

