



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 Firenze, 22 giugno 2023*



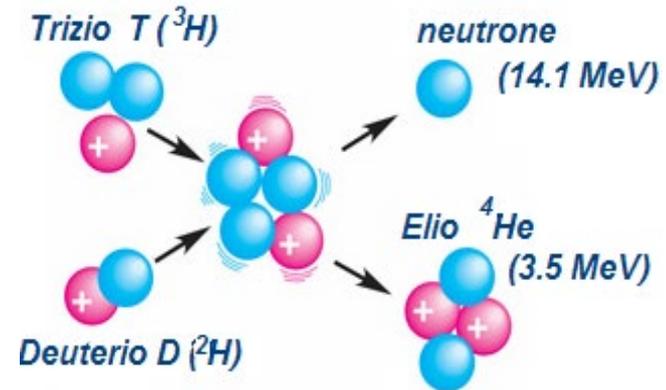
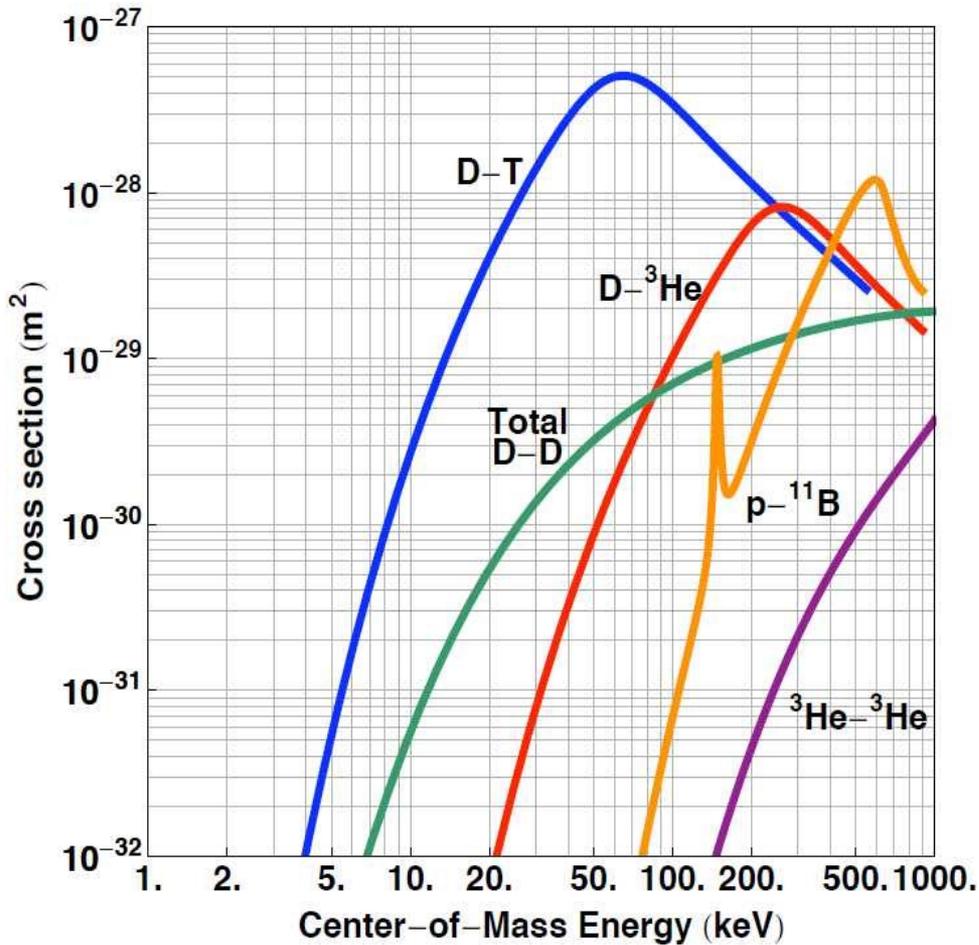
1101 0110 1100  
0101 0010 1101  
0001 0110 1110  
1101 0010 1101  
1111 1010 0000



# SOMMARIO

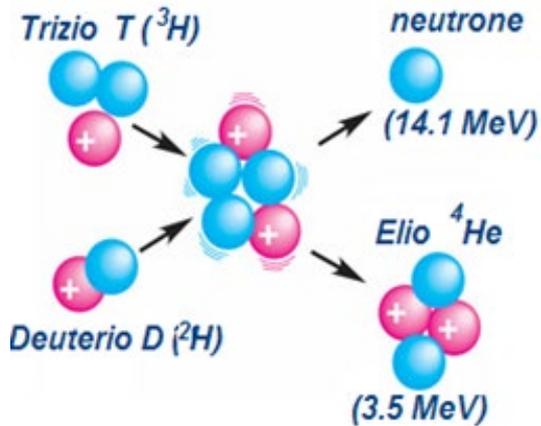
- 1. A che punto siamo**
- 2. I recenti risultati di JET**
- 3. Il reattore sperimentale ITER**
- 4. Cosa resta da fare – la Roadmap europea sulla fusione**
- 5. L'esperimento italiano DTT**

# Energia da fusione



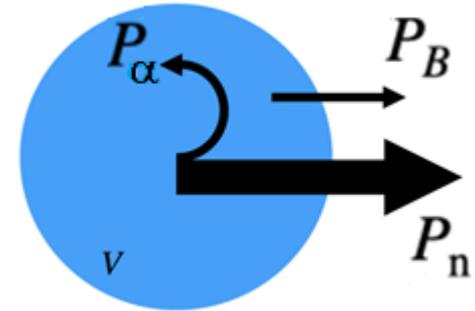
- Reazione D-T: sezione d'urto più alta a temperature più basse
- Temperatura  $T \geq 10^8 \text{ K}$  (10 keV)
- Plasmi termonucleari «confinati» (non funzionerebbe in sistemi fascio-bersaglio, fascio-fascio)

# Ciclo DT

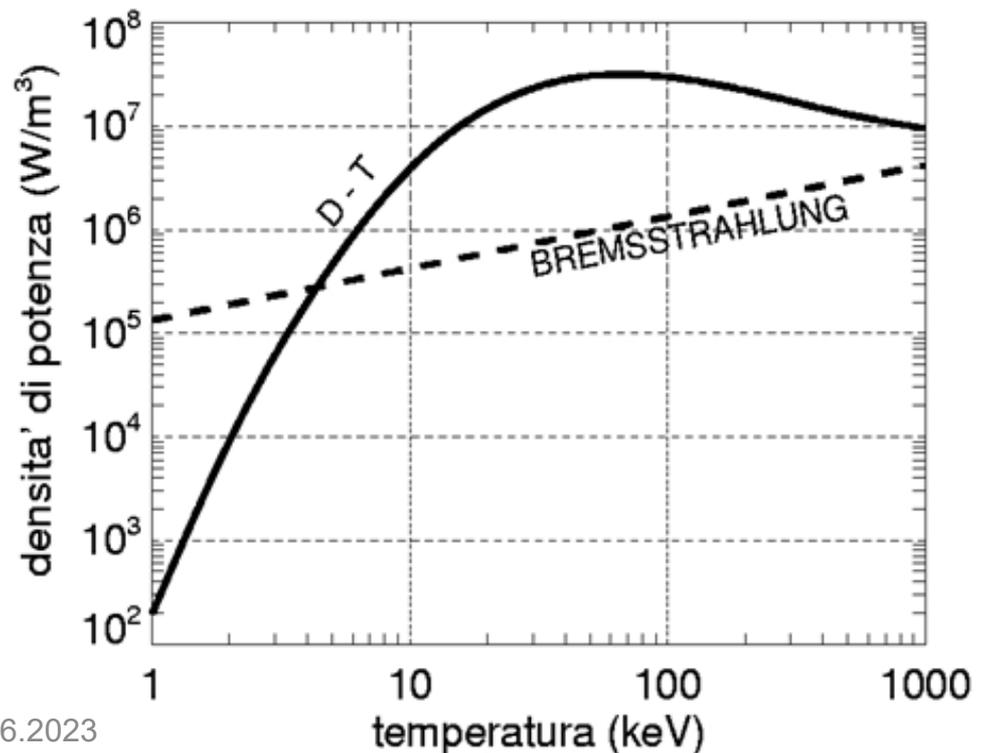


$P_n = 80\% P_{\text{fus}}$  in uscita dal plasma, convertita in energia elettrica

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

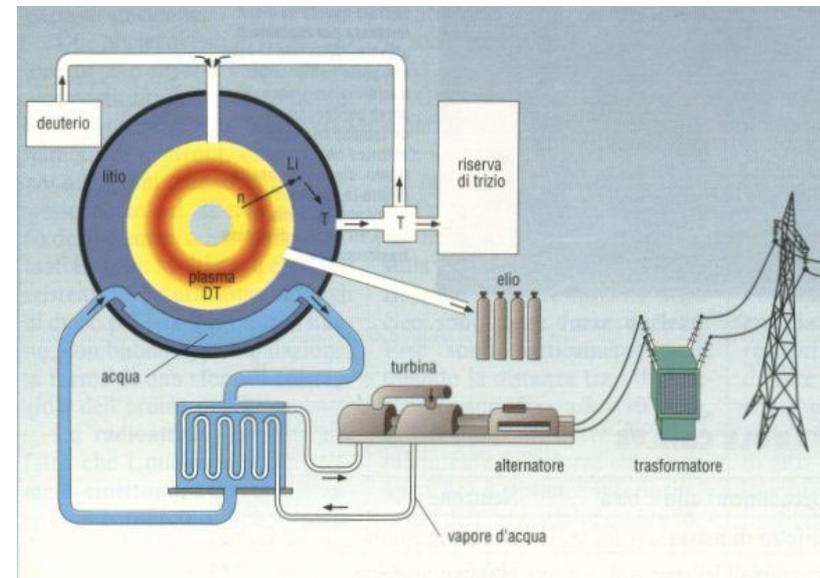
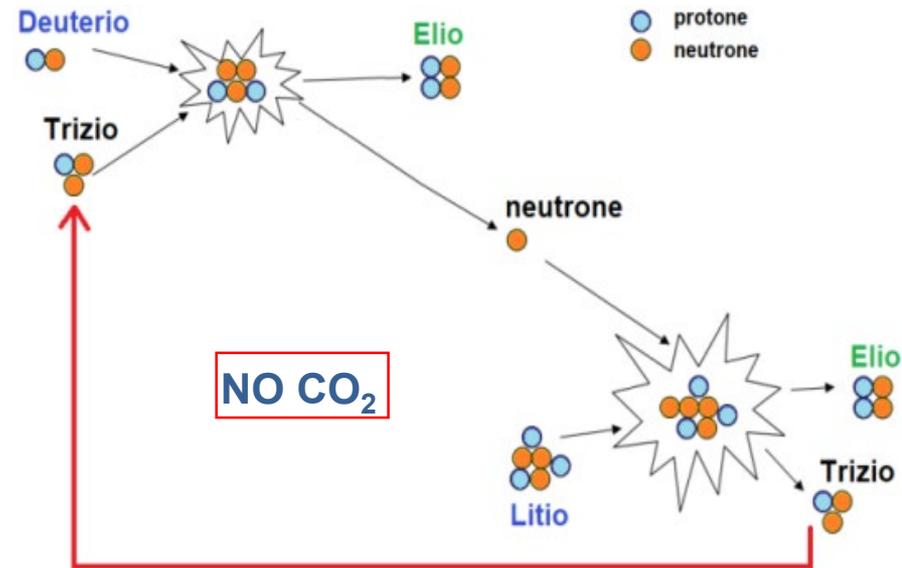


- Perché la potenza delle alfa sia maggiore di quella persa per irraggiamento (bremmstrahlung) serve  $T > 4.3 \text{ keV}$

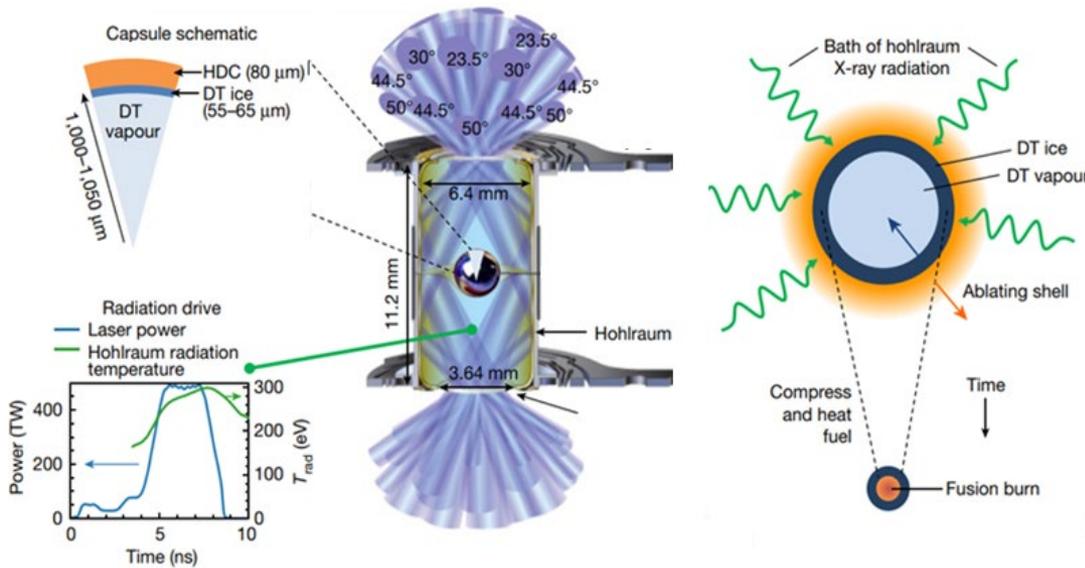


# I vantaggi della fusione

- Il combustibile, **Deuterio e Litio**, è praticamente illimitato
- **(37 kg D + 111 kg  ${}^6\text{Li}$ ) /  $\text{GW}_{\text{Fus}}$  / y**
- **~ 400.000 ton / 0.5 miliardi  $\text{m}^3$  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. 1-2 secoli con un'opportuna scelta dei materiali.



# Diversi approcci alla fusione

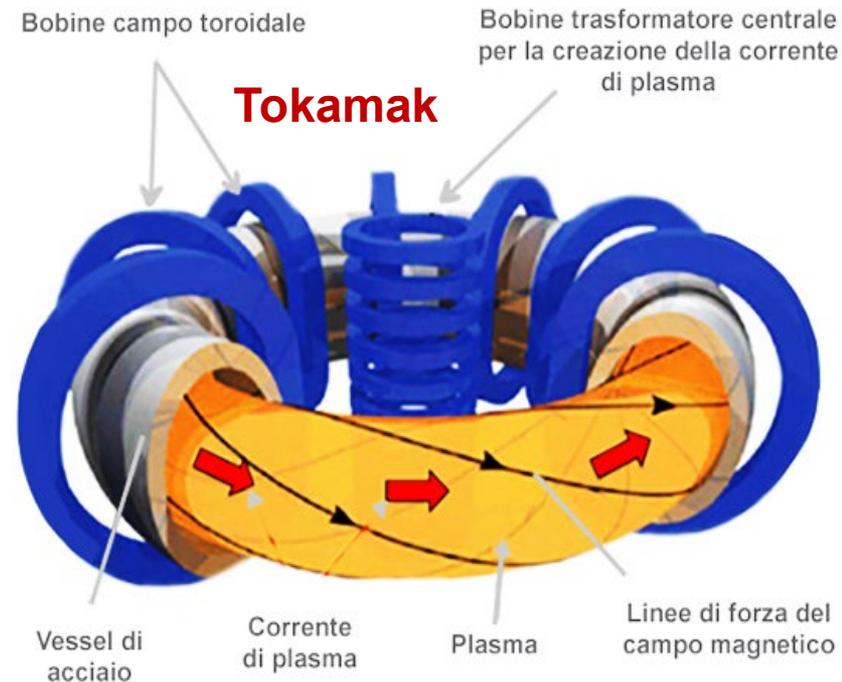


## Fusione inerziale

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 ( $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ), 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:

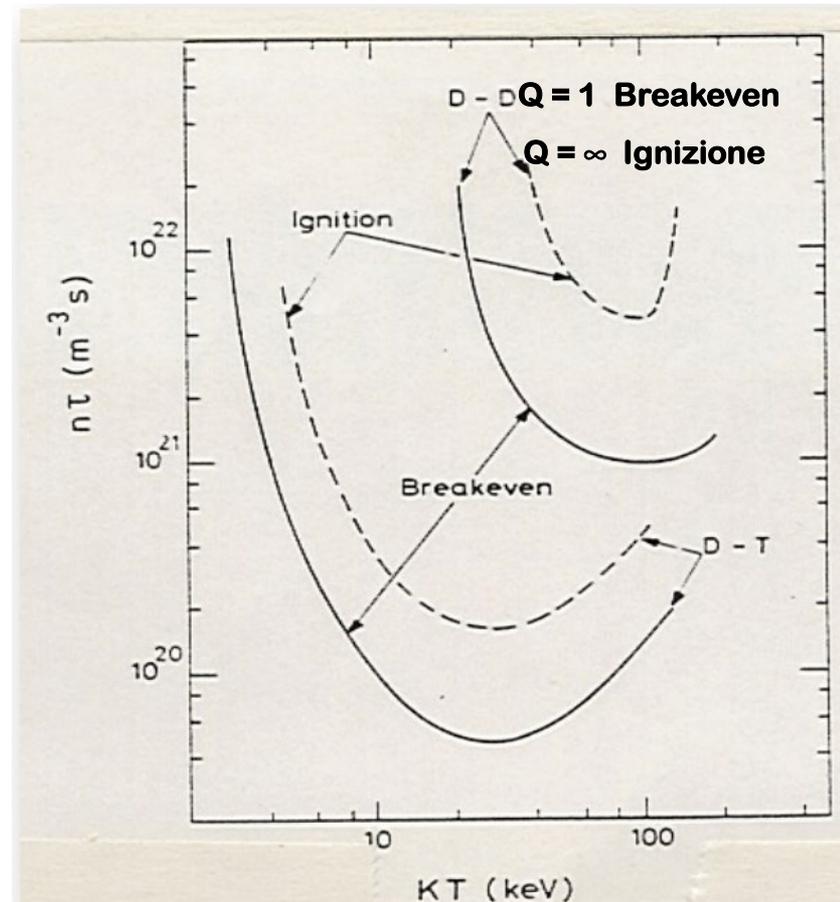
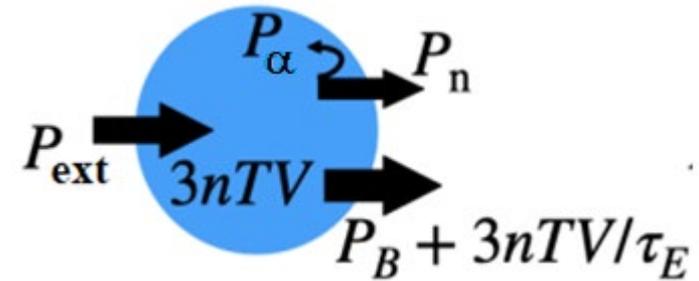
- per radiazione (bremsstrahlung),  $P_B \propto n^2 T^{1/2}$ ,
  - per trasporto,  $P_T = 3nTV/\tau_E$
- $\tau_E$  = tempo caratteristico di confinamento dell'energia

## Potenza in entrata:

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

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

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



# 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)**

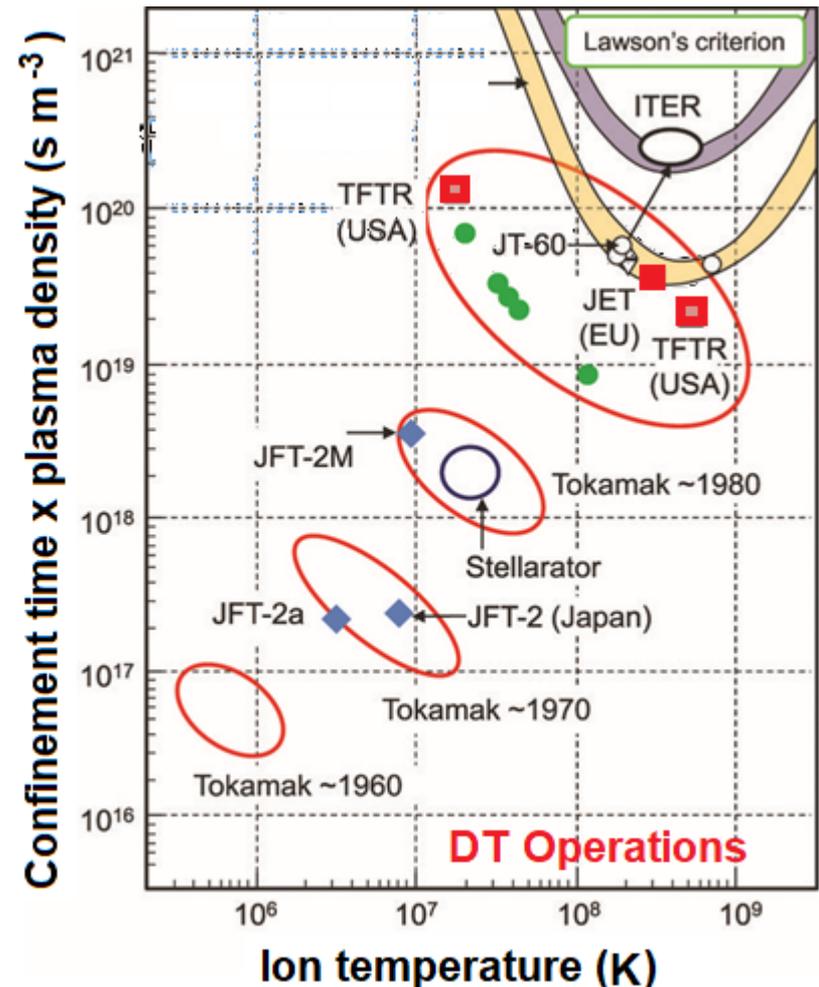
✓1997  $E_{\text{fus}} = 22 \text{ MJ}$ ,  $P_{\text{fus}} = 16 \text{ MW}$   $Q = 0.65$ .  
( $P_{\text{ext}} = 25 \text{ MW}$ )

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

- NIF (LLNL, US)**

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

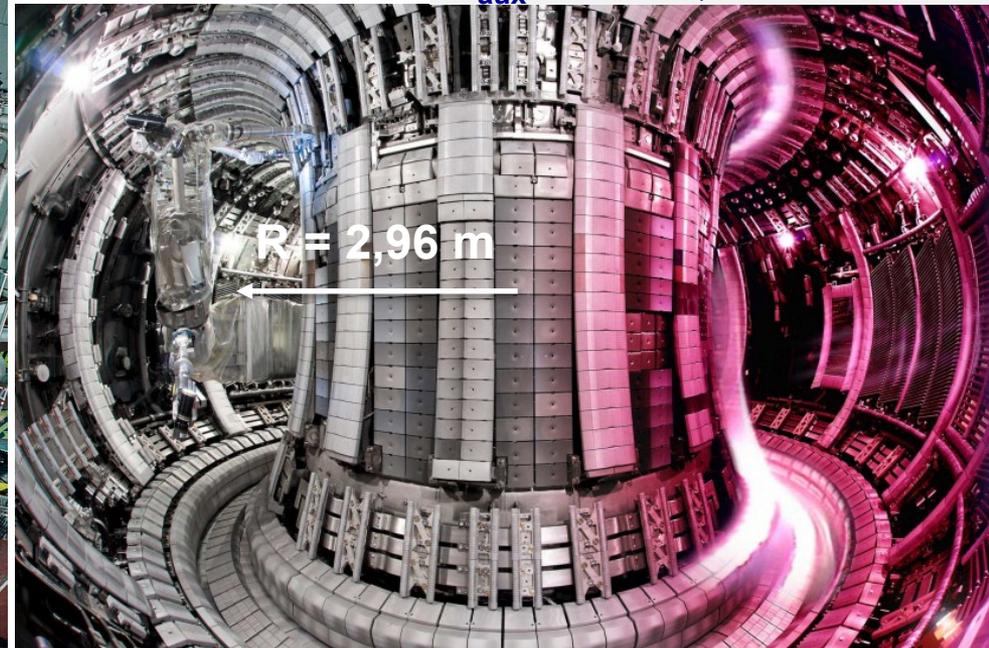
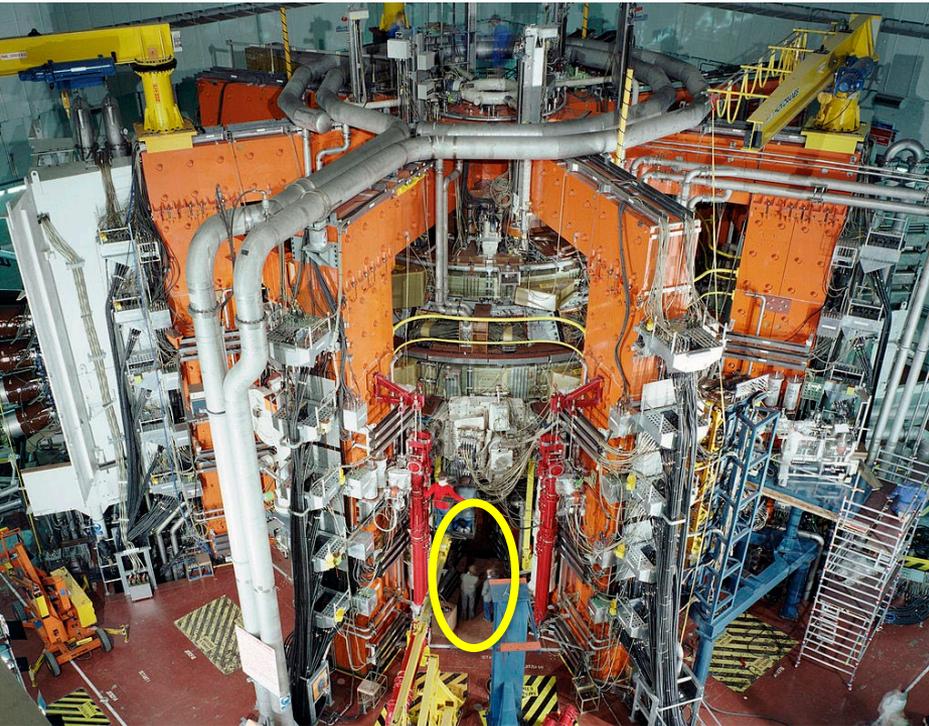
✓2022  $E_{\text{fus}} = 3.15 \text{ MJ}$  a fronte di **2.05 MJ** di energia assorbita dal plasma



# 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

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

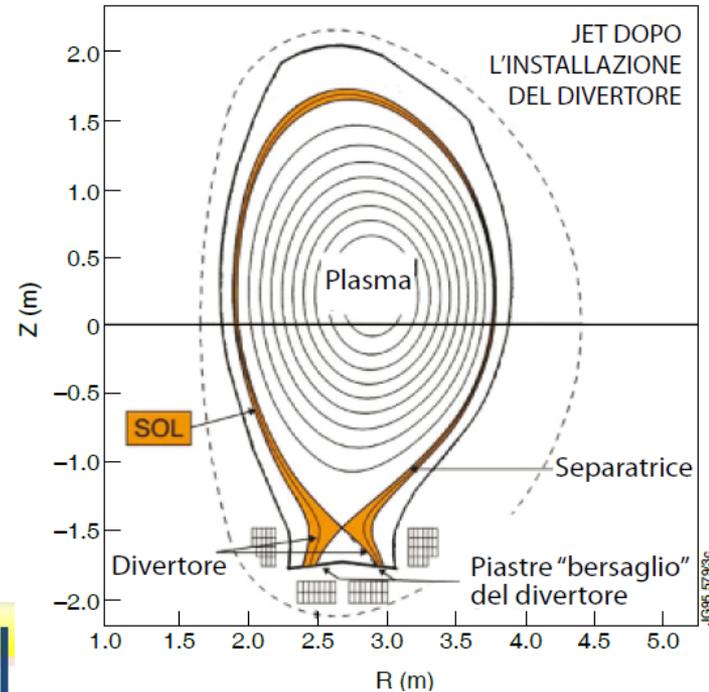
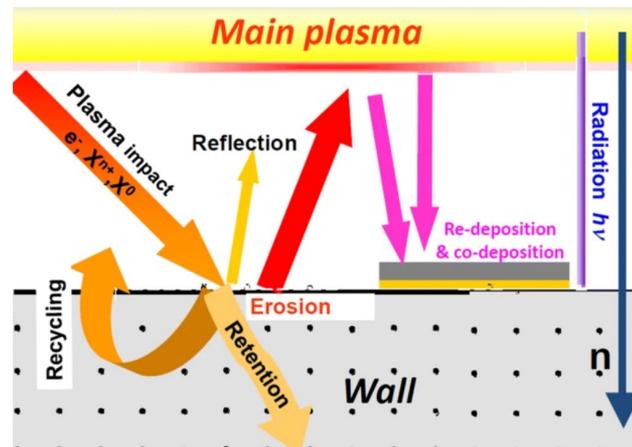


# Il divertore

- Fuori dall'ultima superficie magnetica chiusa (**separatrice**), le particelle non confinate vengono convogliate verso il **divertore**

→ 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/m<sup>2</sup> in ITER**



# Campagna in DT al JET - 2021

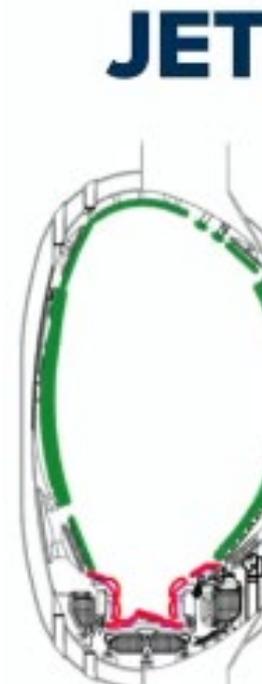
**JET ITER-like Wall** (tutta in carbonio prima del 2011)

**Be per la prima parete,**

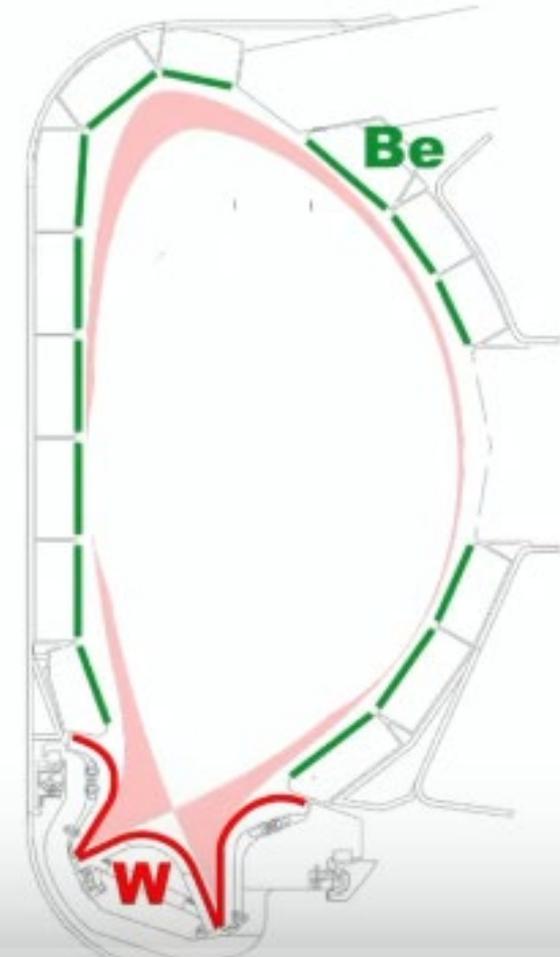
- basso numero atomico
- buona conducibilità termica
- no erosione chimica
- basso tasso di sputtering
- ma bassa resistenza a shock termici

**W per il divertore (e prima parete)**

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

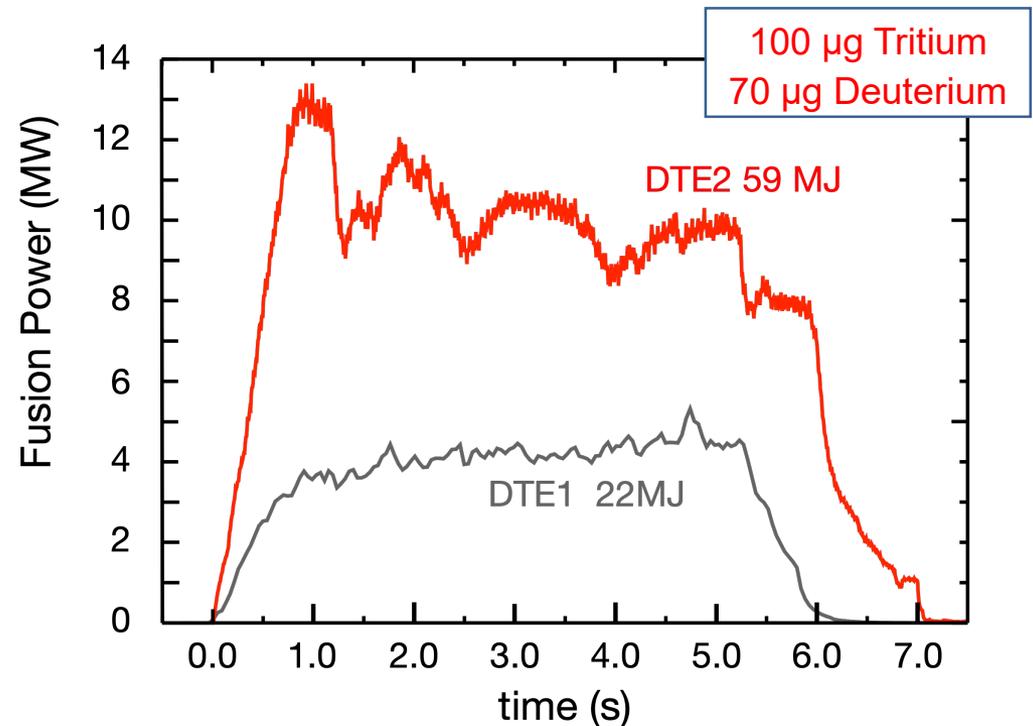
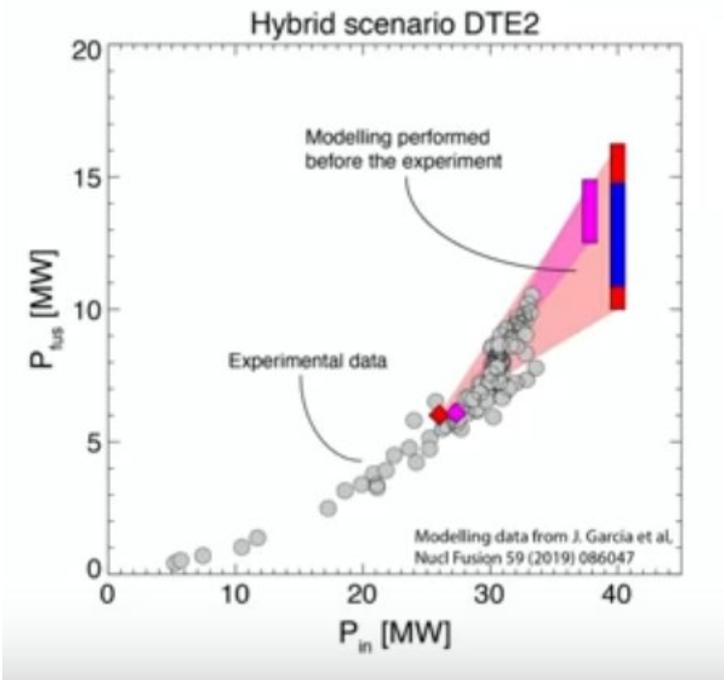


**ITER**



# 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

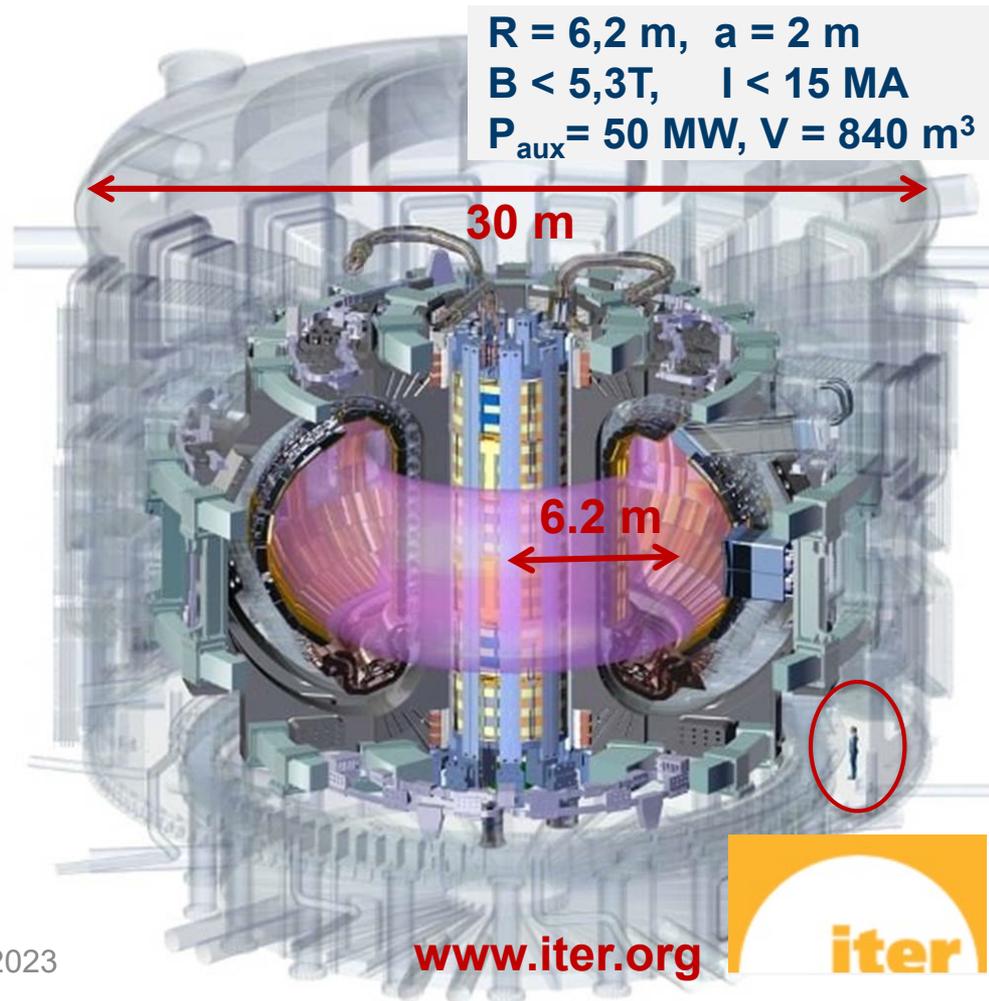


# ITER : il prossimo passo

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

## Obiettivi:

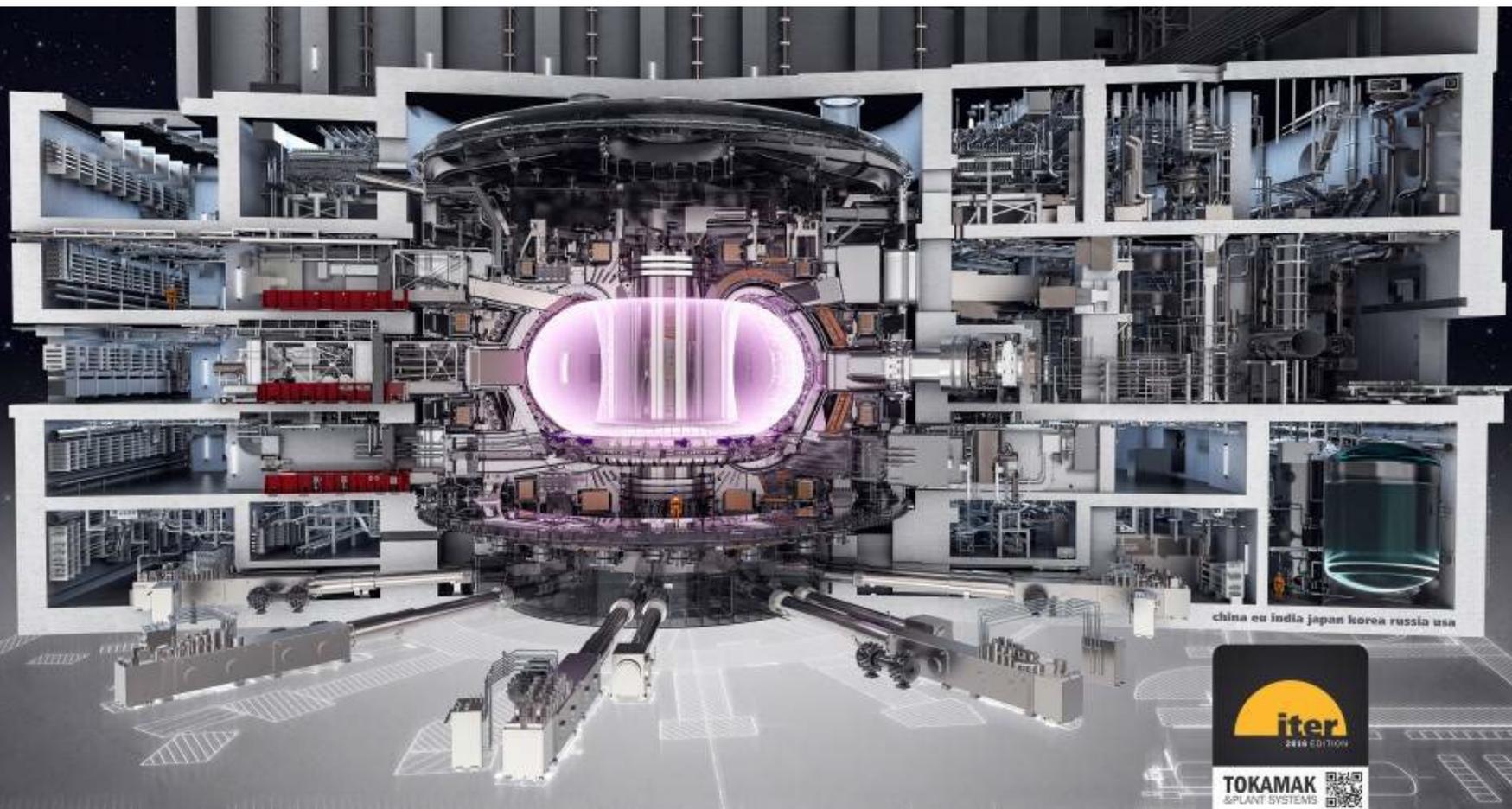
- dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione
- $Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{ext}} = 10$
- **500 MW** di potenza di fusione a fronte di **50 MW** di potenza iniettata nella camera di reazione per impulsi della durata di **alcune centinaia di secondi fino a circa un'ora**



# ITER: il sito (Cadarache, Francia)



# L'Edificio Tokamak



# ITER: la base fisica

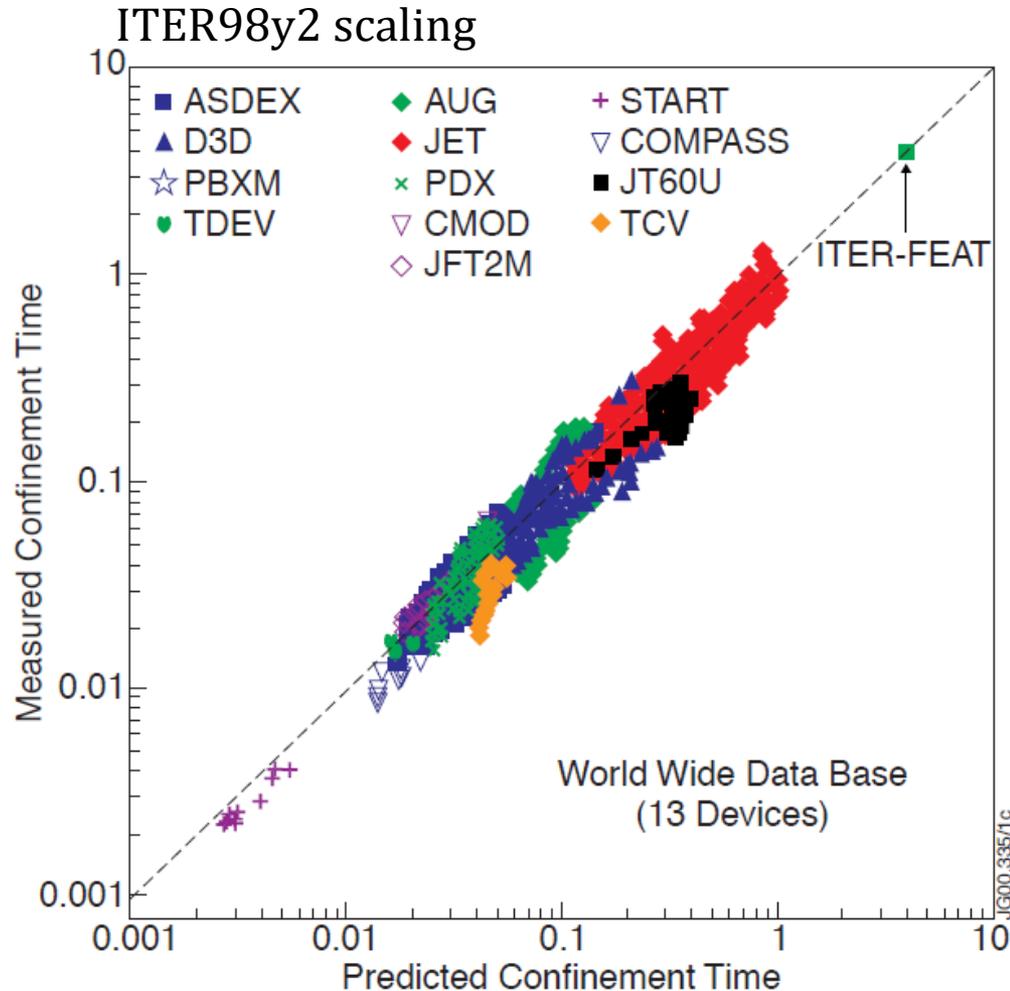
- La base fisica di ITER è solidamente fondata sui risultati ottenuti nei vari esperimenti sin qui condotti
- Rispetto agli esperimenti attuali ITER rappresenta una estrapolazione sufficientemente piccola da renderci confidenti nel raggiungimento degli obiettivi ma al tempo stesso significativa per la 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  $T=20keV$ )

$$Q=10$$



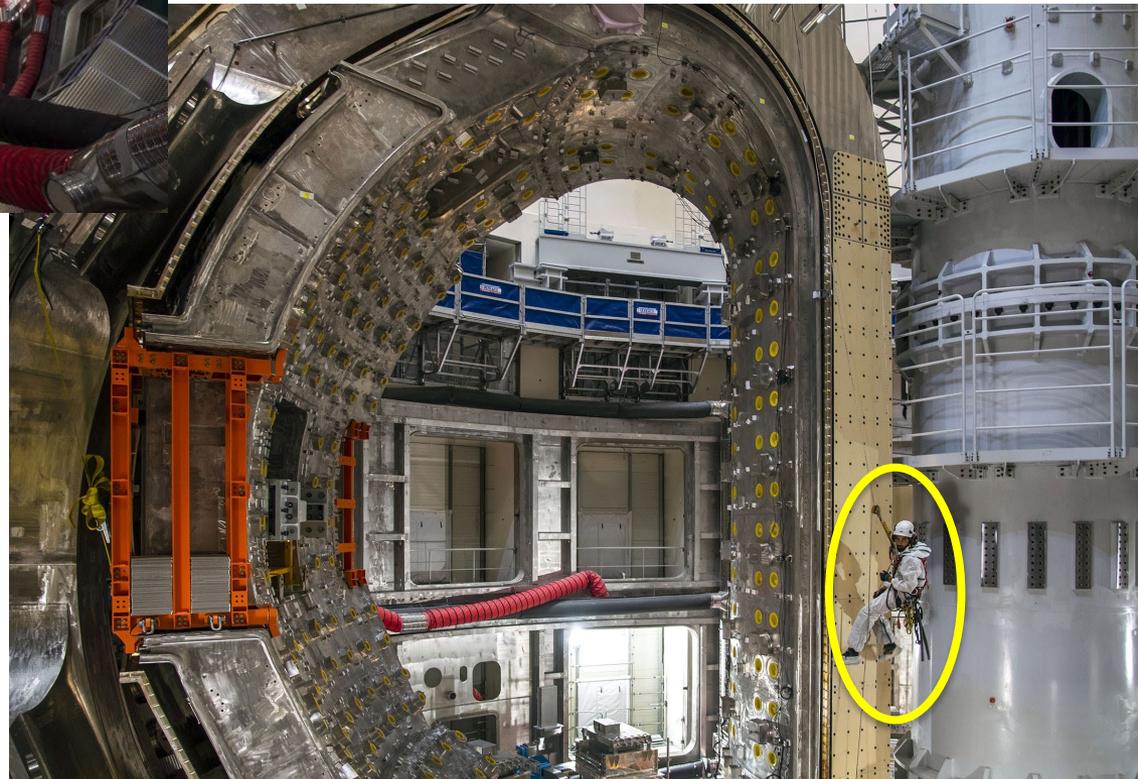
$$\tau_{E,98y2} \propto I_p R_o^2 B^{0.15} P^{-0.69} n^{0.41}$$

# ITER: l'assemblaggio

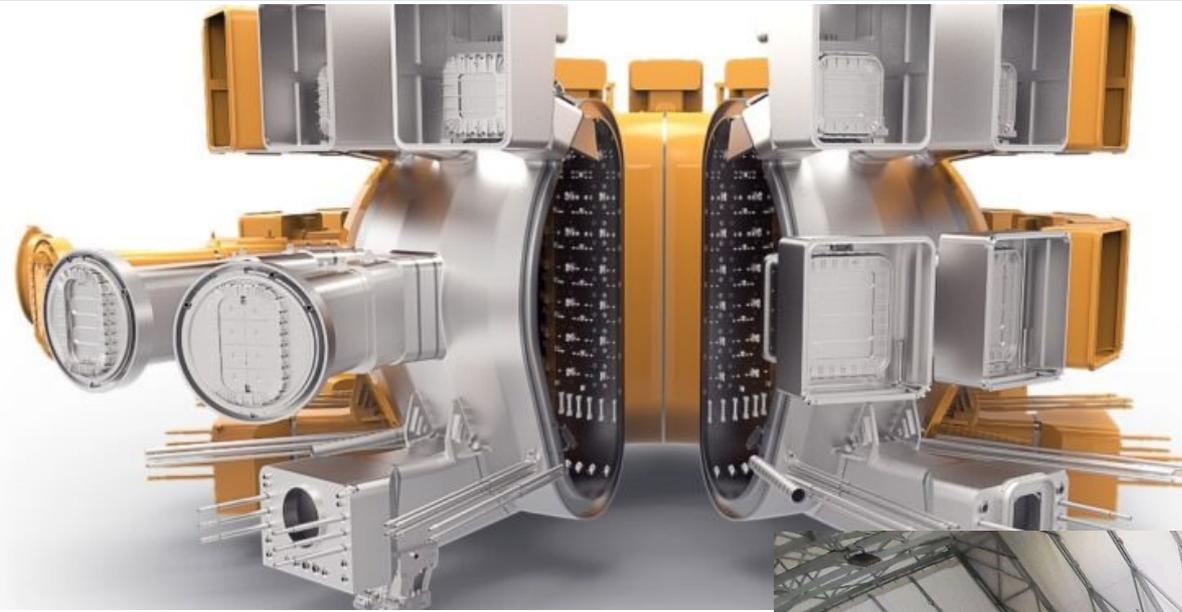


L'interno del criostato con la bobina poloidale n.6 e dummy solenoide centrale

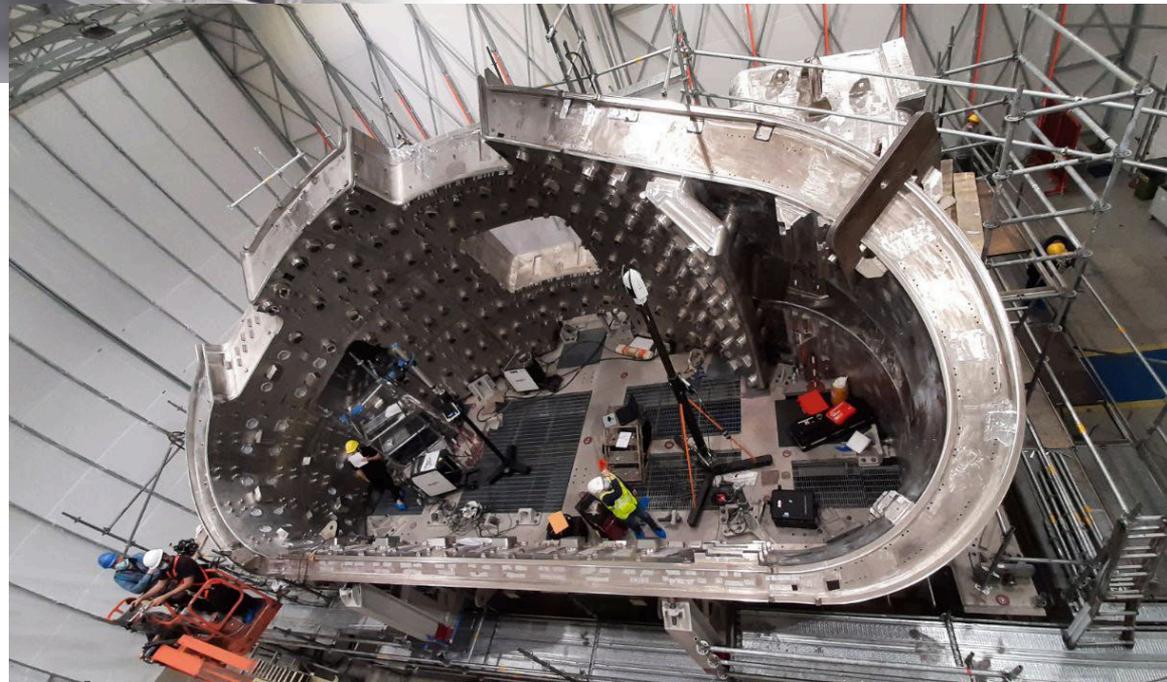
Il primo settore del vacuum vessel in sede all'interno del criostato.



# ITER: Vacuum vessel e blanket

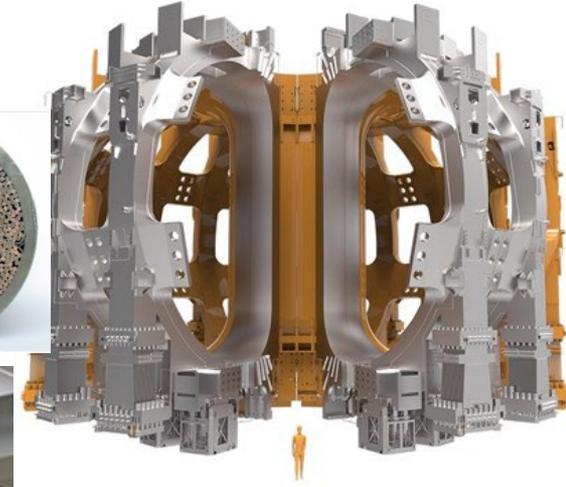
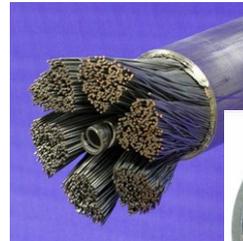


9 settori di Vacuum vessel  
di cui 5 costruiti in Italia dal  
**Consorzio Ansaldo,  
Mangiarotti Walter Tosto**



# ITER: magneti superconduttori del campo toroidale

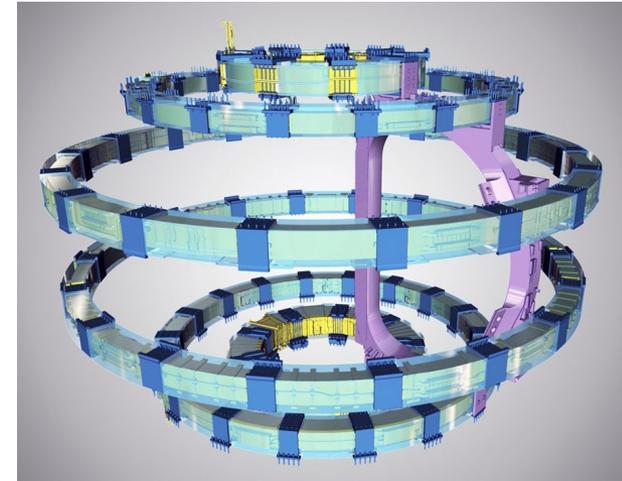
- **18 bobine superconduttrici**
  - Raffreddamento LHe (4 K, 0.6 MPa)
  - Corrente nominale 68 kA
  - Campo magnetico di picco 11.8 T
  - ~ 82 kms di Nb<sub>3</sub>Sn Cable in Conduit Conductor
  
- **10 delle 18 bobine costruite in Italia**
  - **ENEA/TRATOS/CRIOTEC** parte dei cavi in Nb<sub>3</sub>Sn
  - **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**

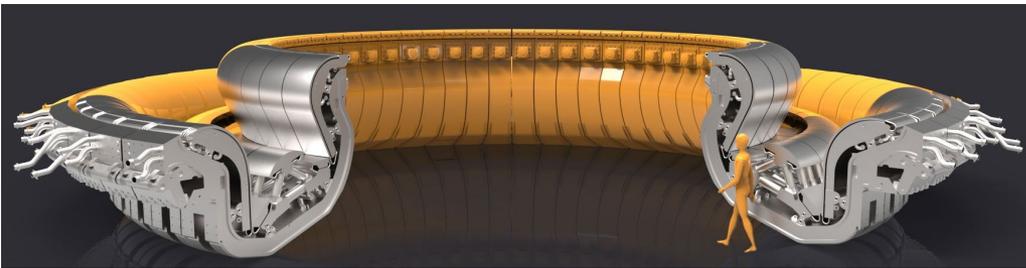
**Alsytom/SEIV, France (handling and impregnation)**

**CNIM, France e Criotec Impianti, Italy**

**(manufacturing and cold testing)**



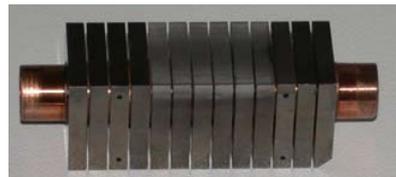
# ITER: il divertore (target e supporto)



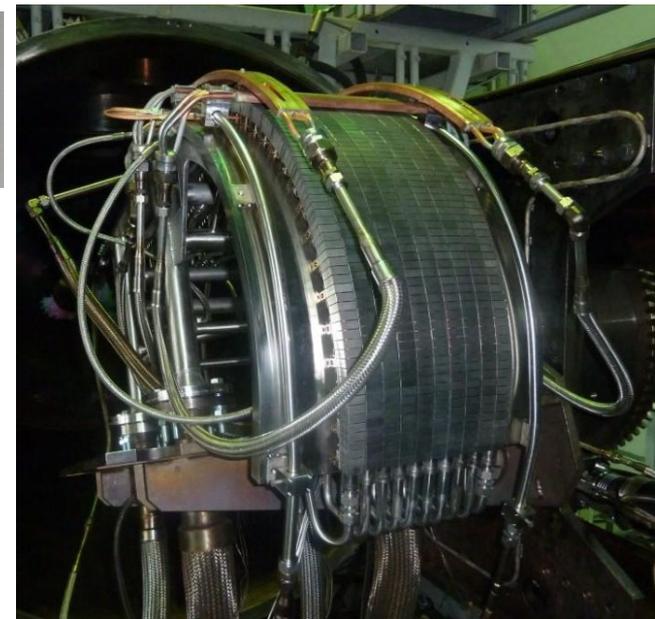
54 "cassette" di support ai target realizzate tutte in Italia da **Walter Tosto**



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  $5 \text{ MW/m}^2$  per 5000 cicli e  $20 \text{ MW/m}^2$  per 300 cicli di 10 s ciascuno



# Sistemi di riscaldamento

## Iniettori di neutri (NBI)

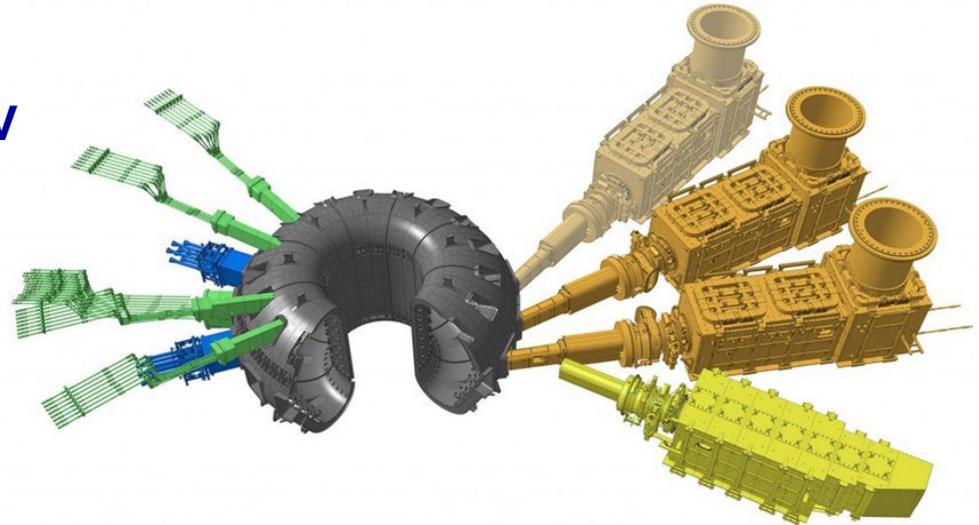
2 iniettori, **16.5 MW** ciascuno,  $E_b = 1 \text{ MeV}$

## 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

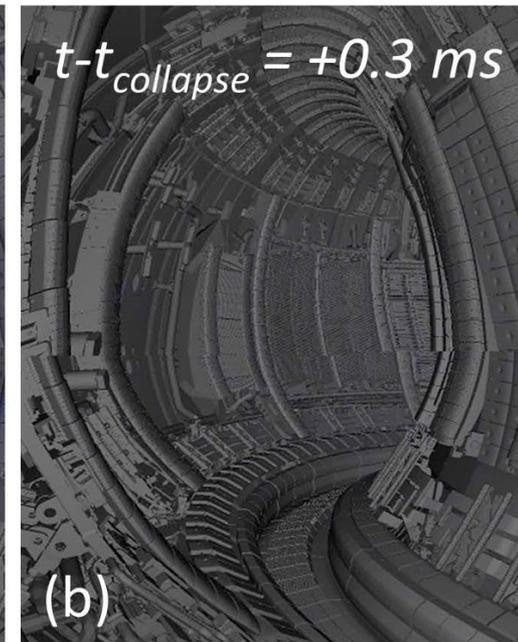
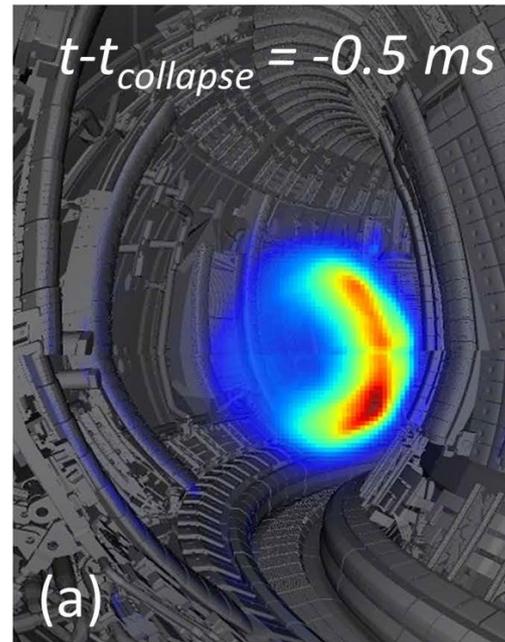
Dimostrazione delle  
performance del NBI in termini  
di potenza, energia e durata  
simultaneamente



# ITER: dimostrazione dell'energia da fusione

## Sviluppo e dimostrazione delle operazioni con «burning plasma» a $Q=10$

- 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	UniToscia
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/](http://www.euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/)

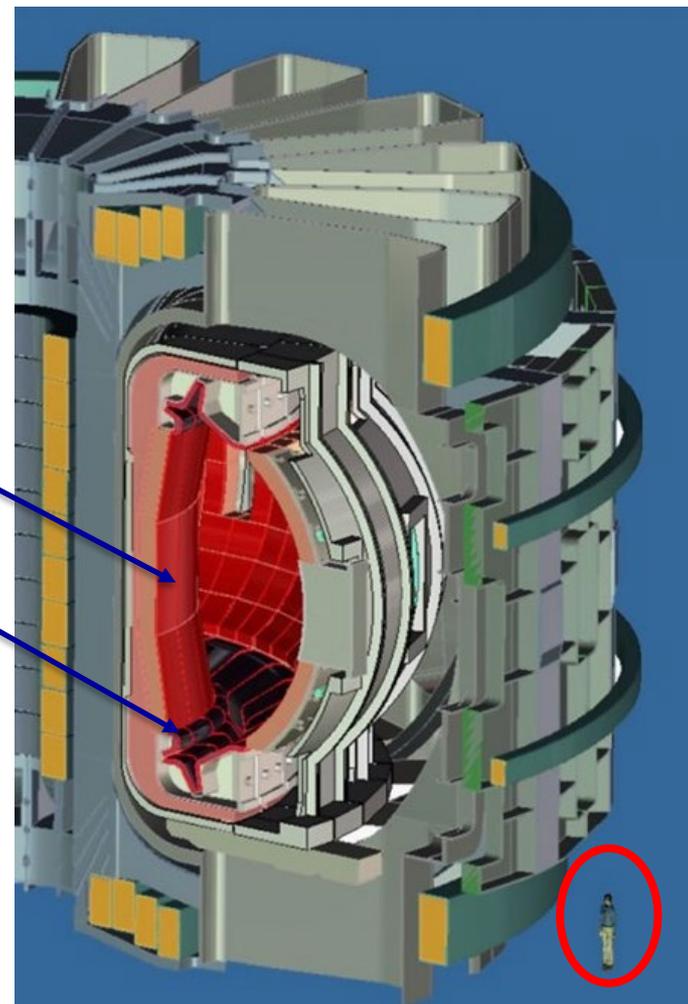
# La Roadmap europea per la fusione

**Obiettivo:** 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.

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

Blanket  
triziogeno

Divertore



# M3. Neutron tolerant materials

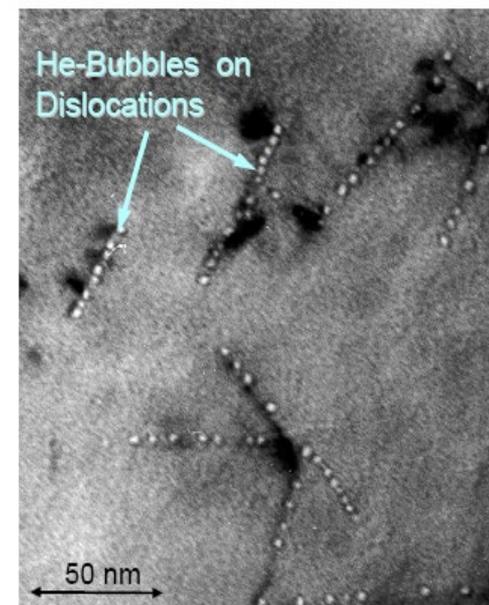
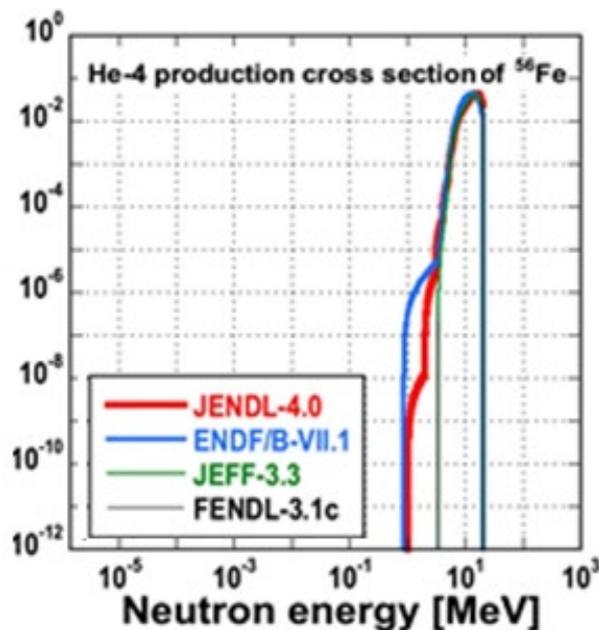
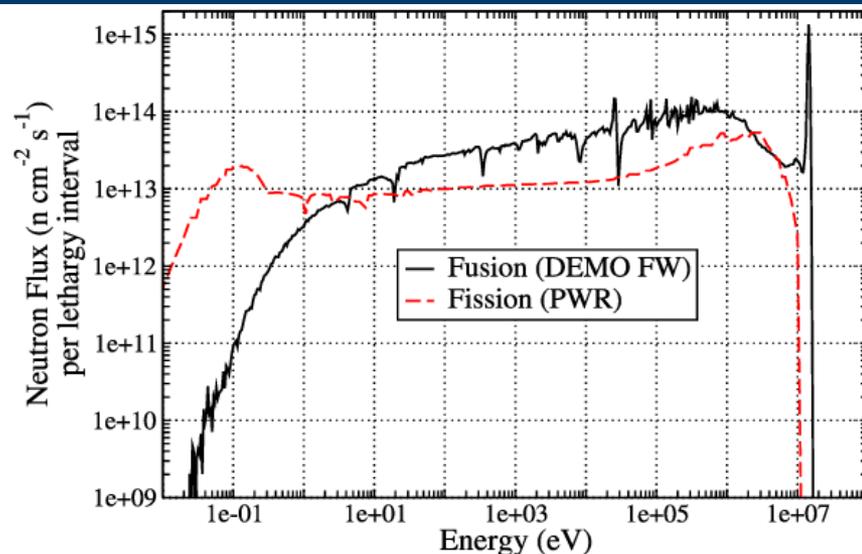
Lo spettro in energia dei neutroni di fusione è più «duro» rispetto a quello di fissione

→ 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

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

**EUROFER (9CrWVTa)**  
 (350°C – 600°C).

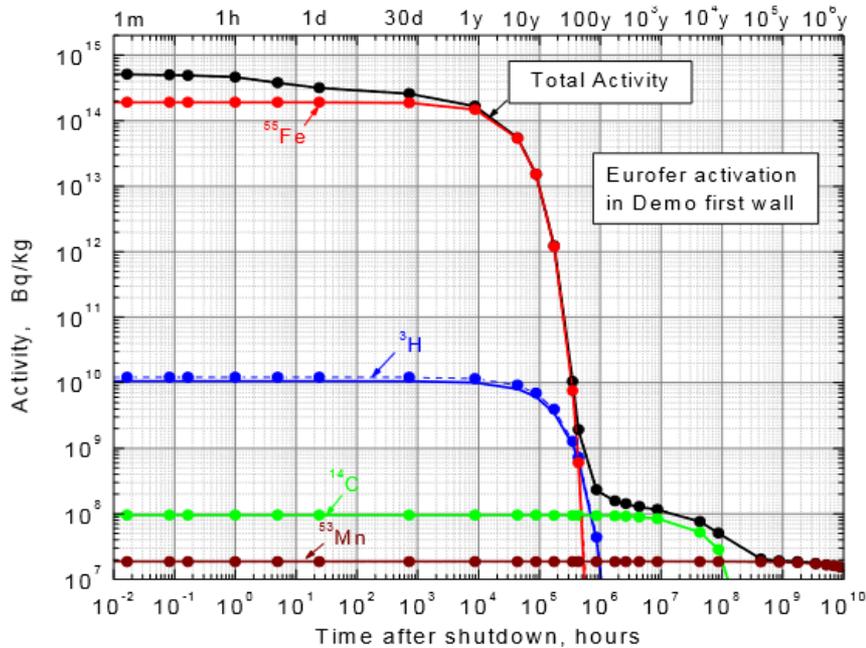


Fig. 1a: Specific activity [Bq/kg]

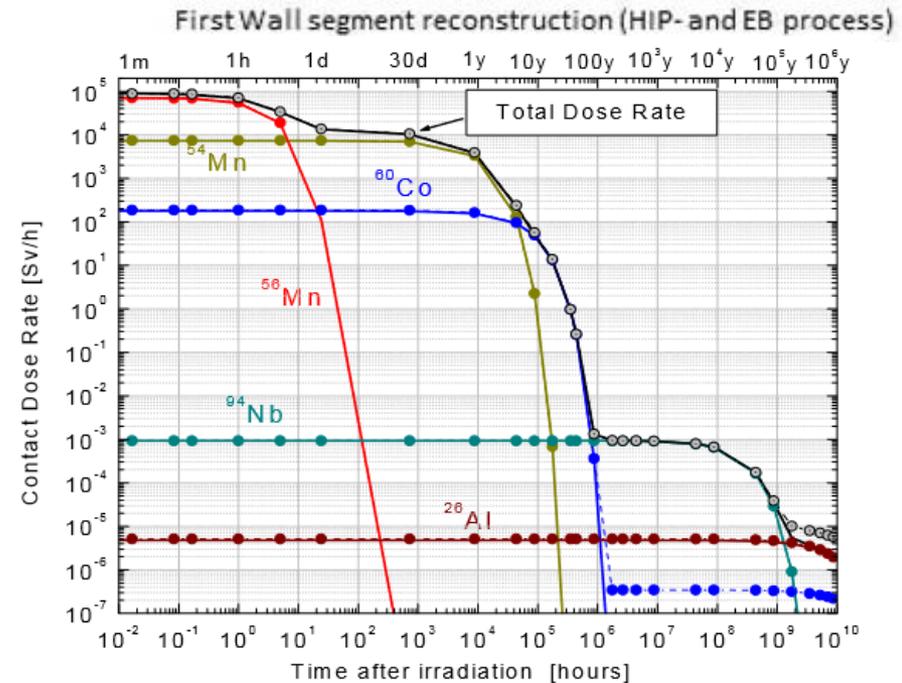


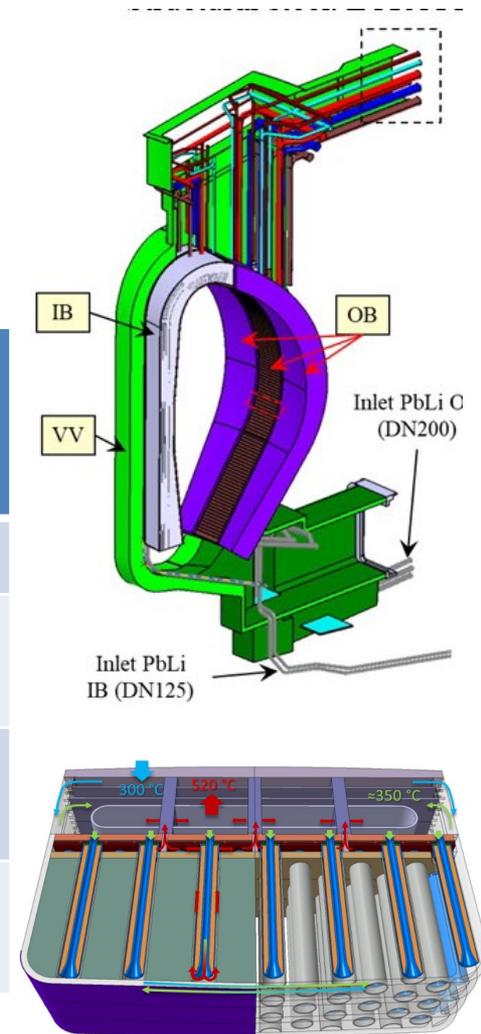
Fig. 1b: Contact  $\gamma$ -dose rate [Sv/h]

# M4. Tritium self-sufficiency

Autosufficienza T/n > 1

~ 55.6 kg / GW<sub>FUS</sub> / y

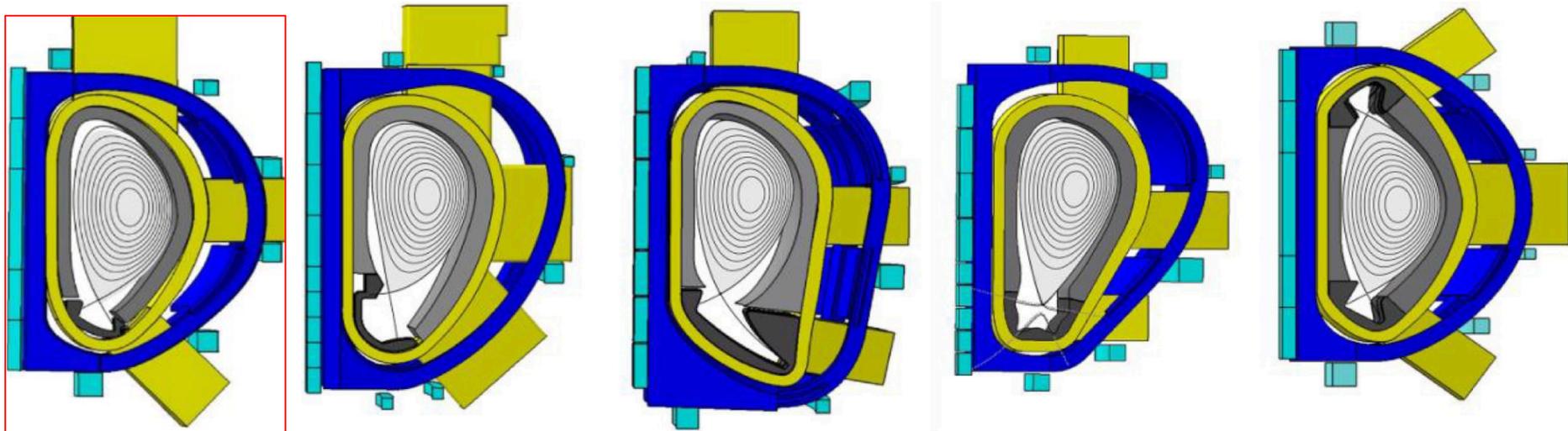
	Mantello liquido (LiPb)	Mantello solido (ceramico di Litio/Be)
<b>Materiale strutturale</b>	EUROFER	EUROFER
<b>Breeder</b>	PbLi, <sup>6</sup> Li @90%	Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> / Li <sub>2</sub> TiO <sub>3</sub> pebble bed, Li @60%
<b>Moltiplicatore di neutroni</b>		Beryllide (TiBe12)
<b>Refrigerante</b>	Water 295-328°C	He 300-520°C



## M2. Heat-exhaust systems:

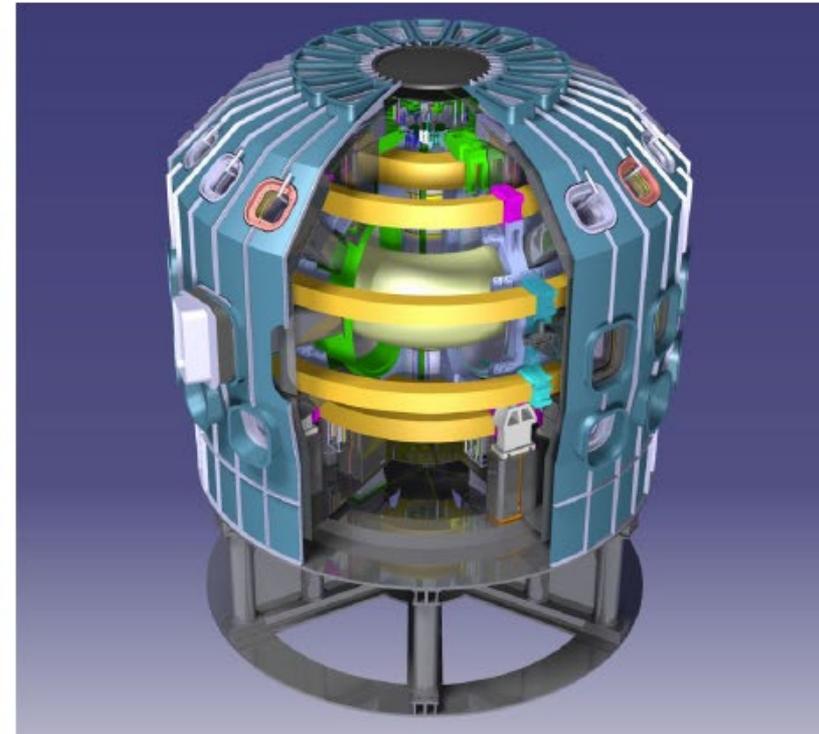
Divertore di DEMO: fino a  $60\text{MW/m}^2$  (~ come sulla superficie del Sole)

- 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).

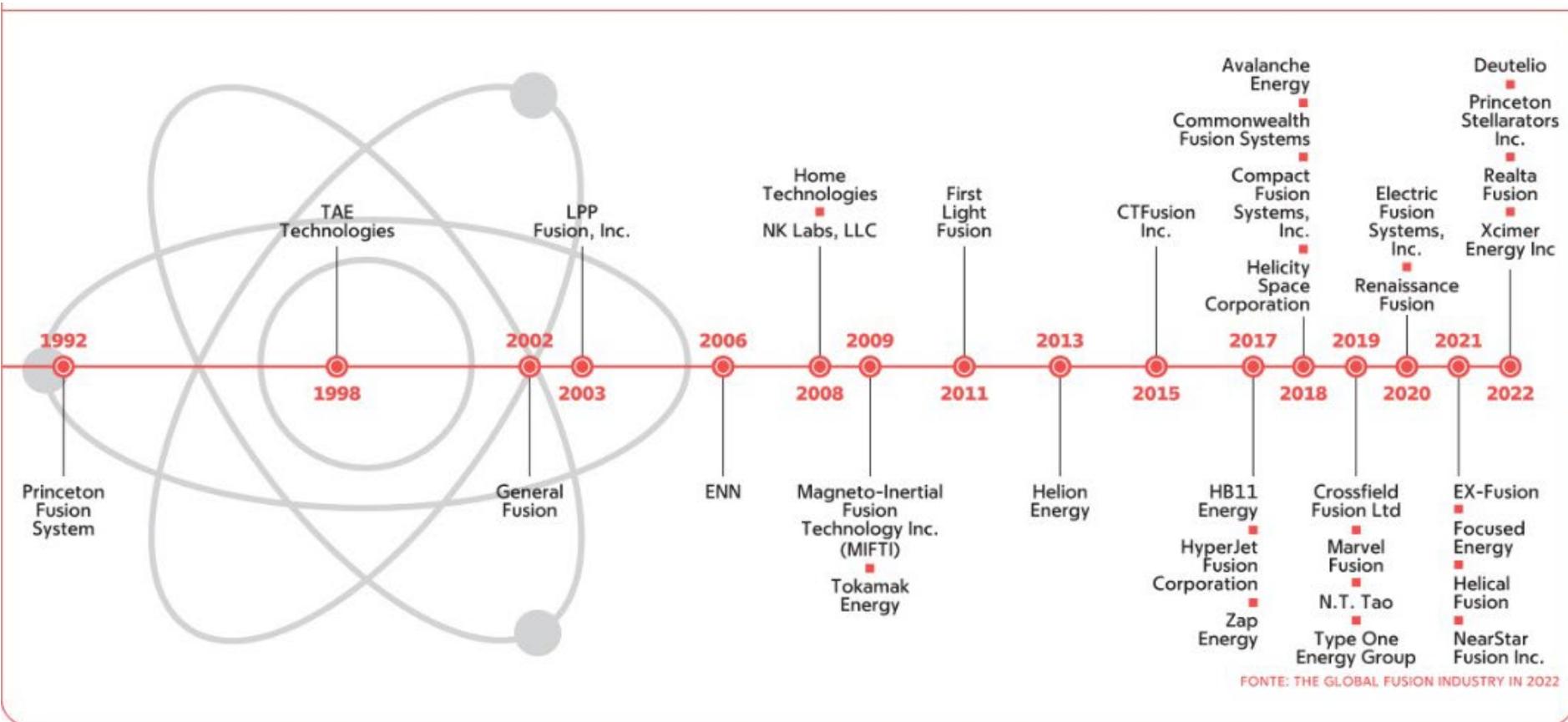
# M2. Heat-exhaust systems: Divertor Tokamak Test facility (DTT)



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

# Investimenti privati nella fusione



# 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



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



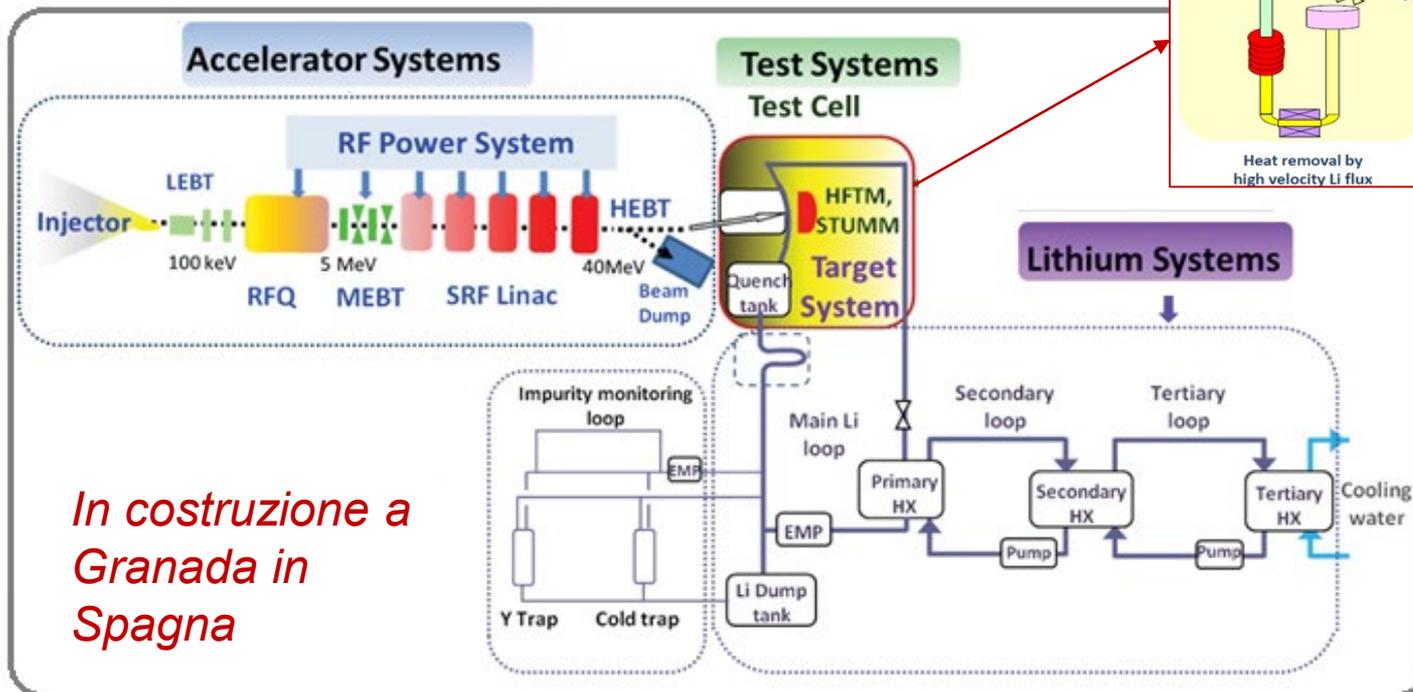
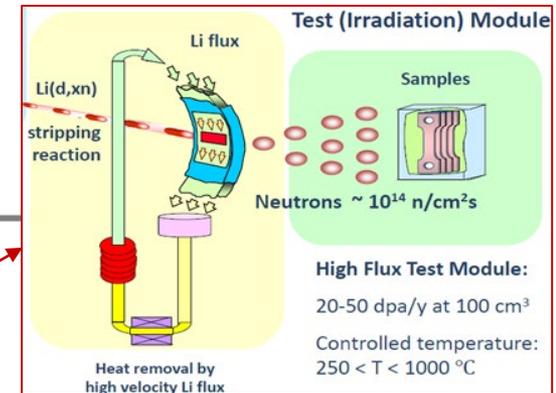
[paola.batistoni@enea.it](mailto:paola.batistoni@enea.it)

# 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*

# Risultati della nuova campagna DT al JET (2021)

- Studio dell'effetto isotopico – conferma dell'effetto positivo dell'aumento della massa sul confinamento

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

