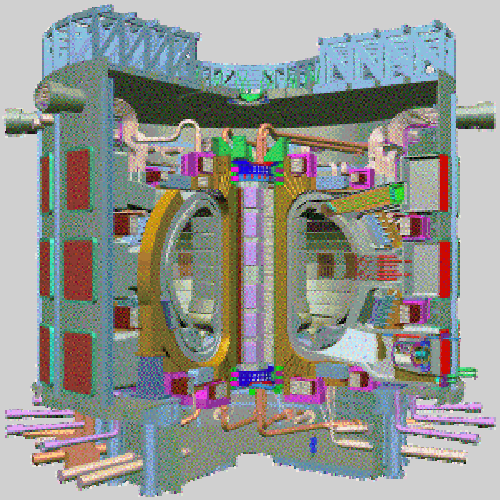
# Prospettive scientifiche e tecnologiche del progetto ITER

*G. Bosia*



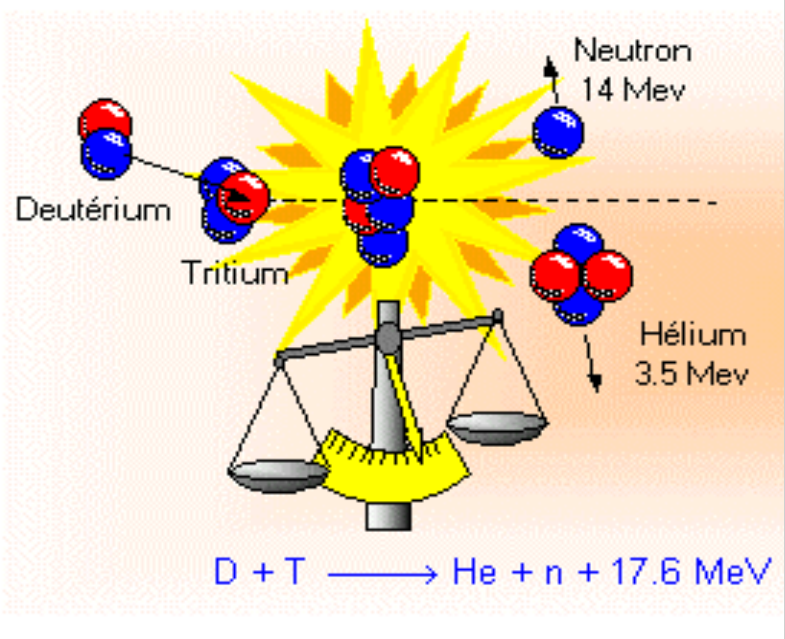
**Caffe INFN --- Torino, 5 Dicembre 2005**

# *Sommario*

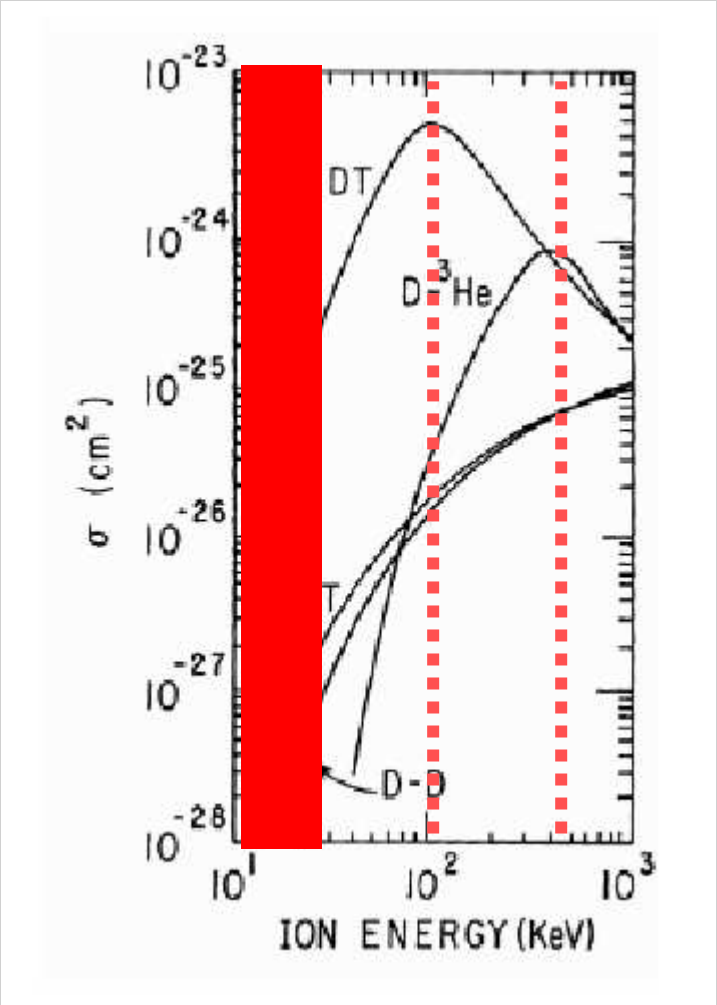
## PROGETTO ITER

- **Fusione a confinamento magnetico**
- **Il progetto ITER**
- **Descrizione della macchina**
- **Obiettivi del progetto**
- **Organizzazione**
- **Situazione attuale e prospettive**
- **Partecipazione al progetto**

# Reazioni di fusione utili

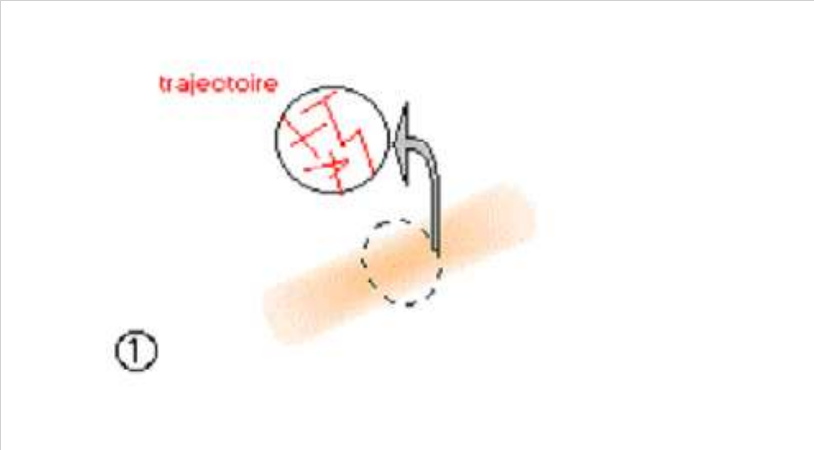



| | | | |
|---|---|---|---|
| D + T | ⟹ | $^4$He + n | + 17.6 MeV |
| D + D | ⟹ | $^3$He + n | + 3.3 MeV |
| | | T + p | + 4.0 MeV |
| D + $^3$He | ⟹ | $^4$He + p | + 18.3 MeV |
| ..... | | | |



# *Ricetta per un plasma termonucleare*

- Si comincia con una miscela di gas 50/50% D-T a bassa pressione ($10^{-3}$ mbar) a temperatura ambiente, confinato meccanicamente in una camera a vuoto

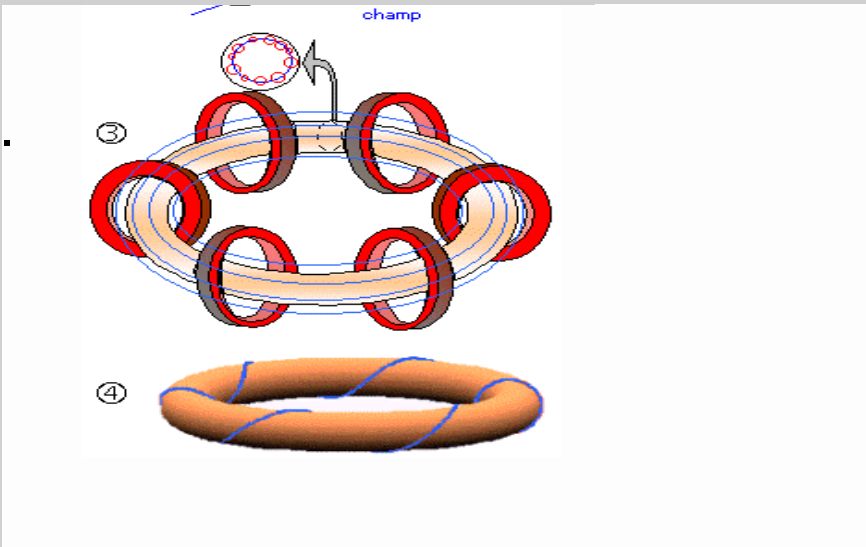



- Con l' applicazione di campi elettrici si produce un plasma di bassa temperatura di $D^+$ e $T^+$ ed $e^-$

- Si confina il plasma in una geometria toroidale con un campo magnetico elevato (6T).

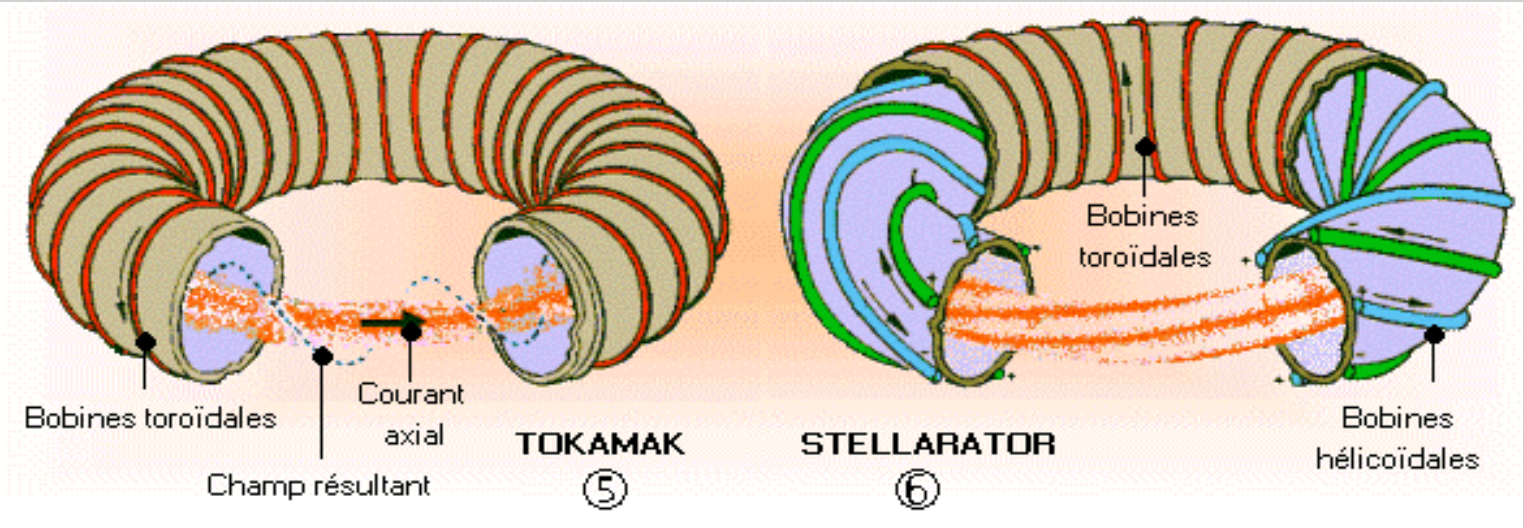
- Si stabilizza la colonna di plasma medialte un campo magnetico elicoidale

- Si scalda il plasma a temperature termo nucleari(~ 20 keV)

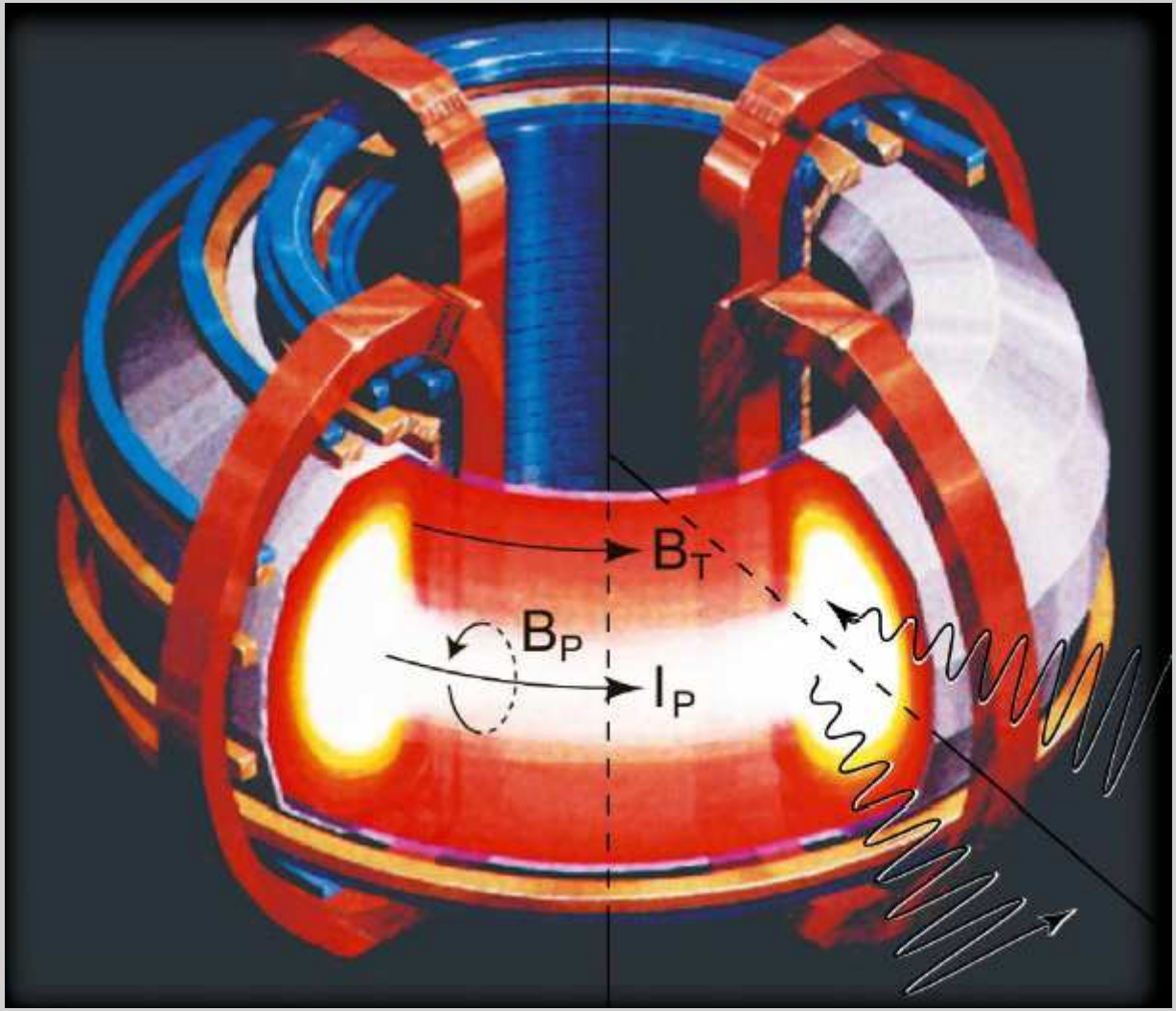


# Confinamento magnetico toroidale

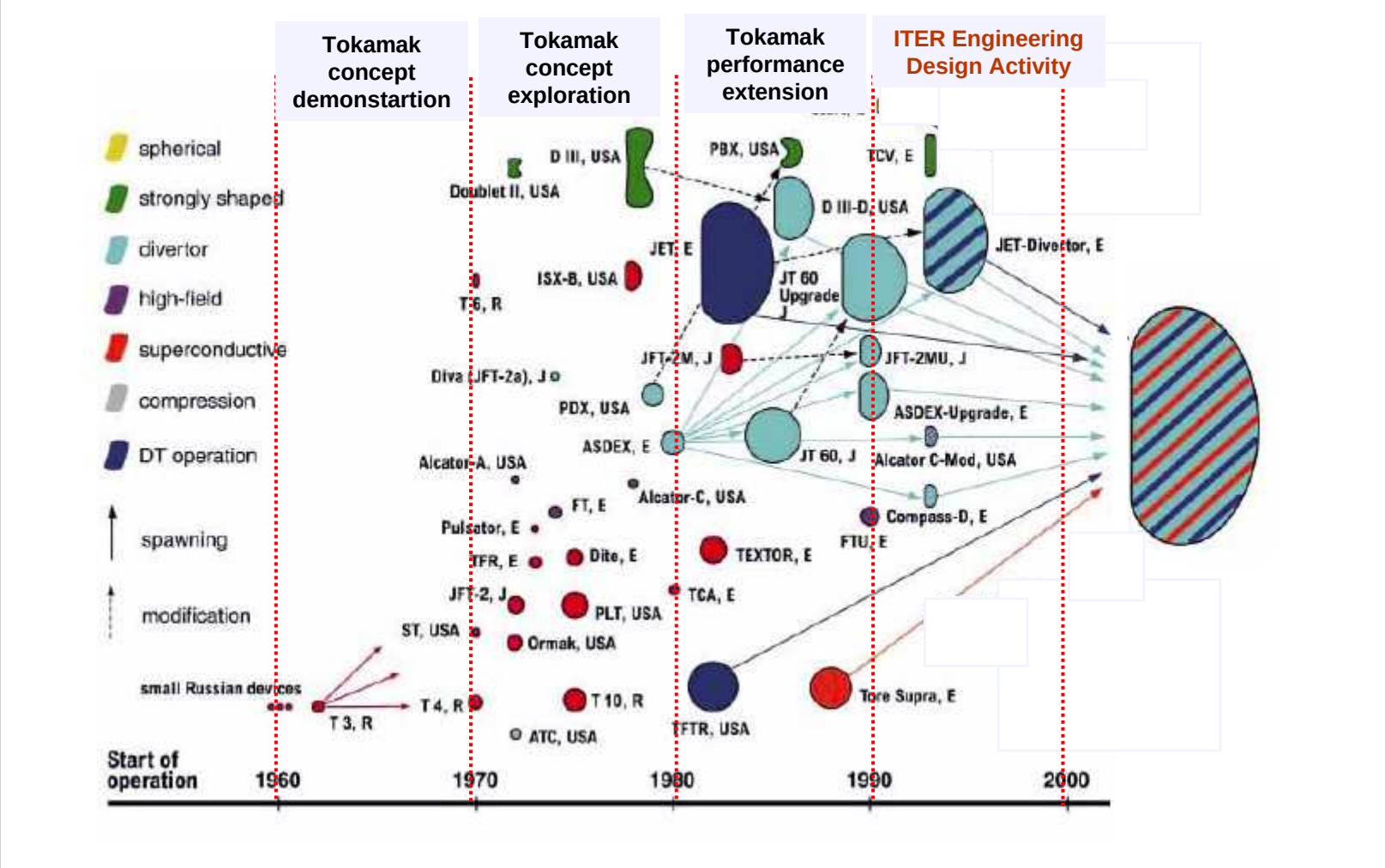
**Confinamento tipo Tokamak** **Confinamento tipo Stellarator**



# Confinamento Tokamak



# Evoluzione di dimensioni e forma di sistemi tokamak



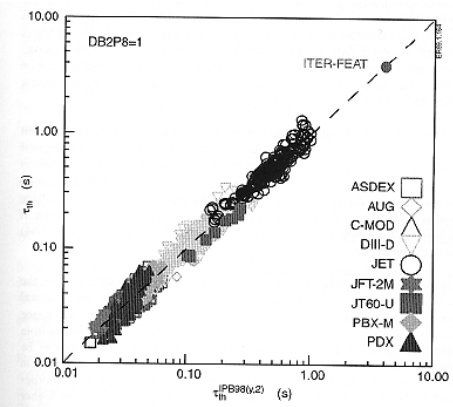
# Guadagno termonucleare

- **Fusion power density**

$$p_{fus} = E_{fus} n_d n_t \langle \sigma_{fus} v \rangle \sim n^2 T^2$$

- **Heat loss**

$$P_{loss} \cong \frac{3nT}{\tau_E}$$

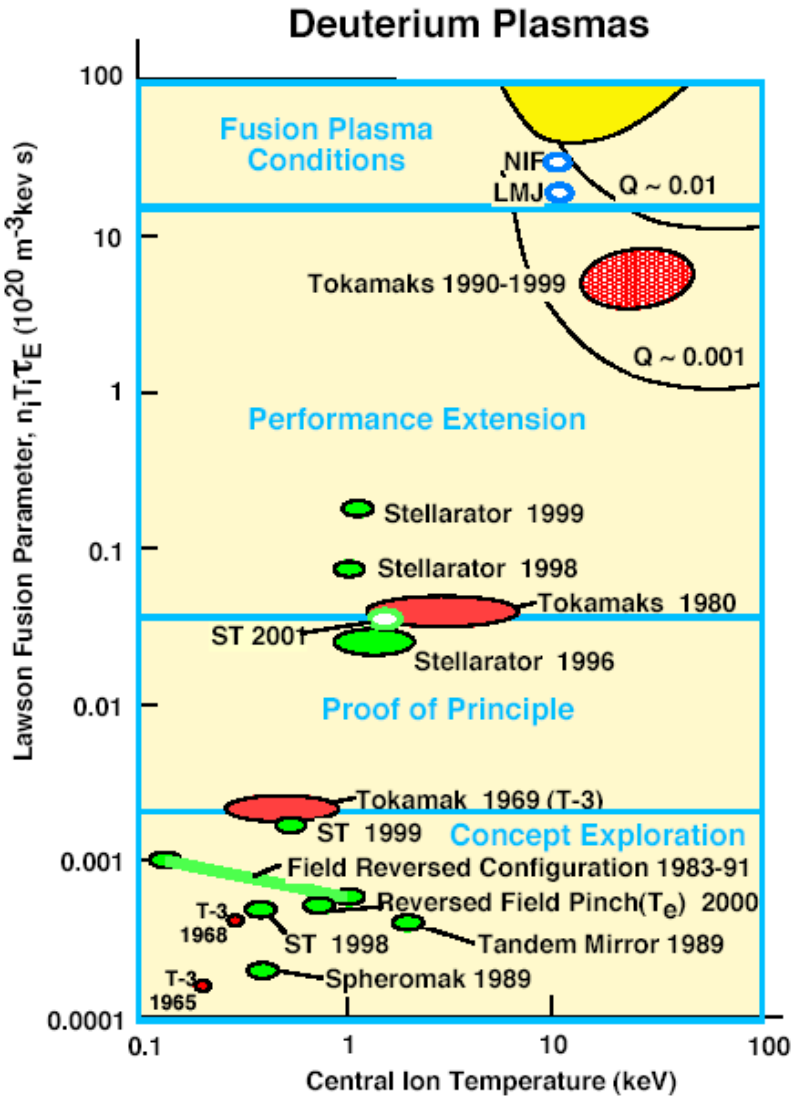


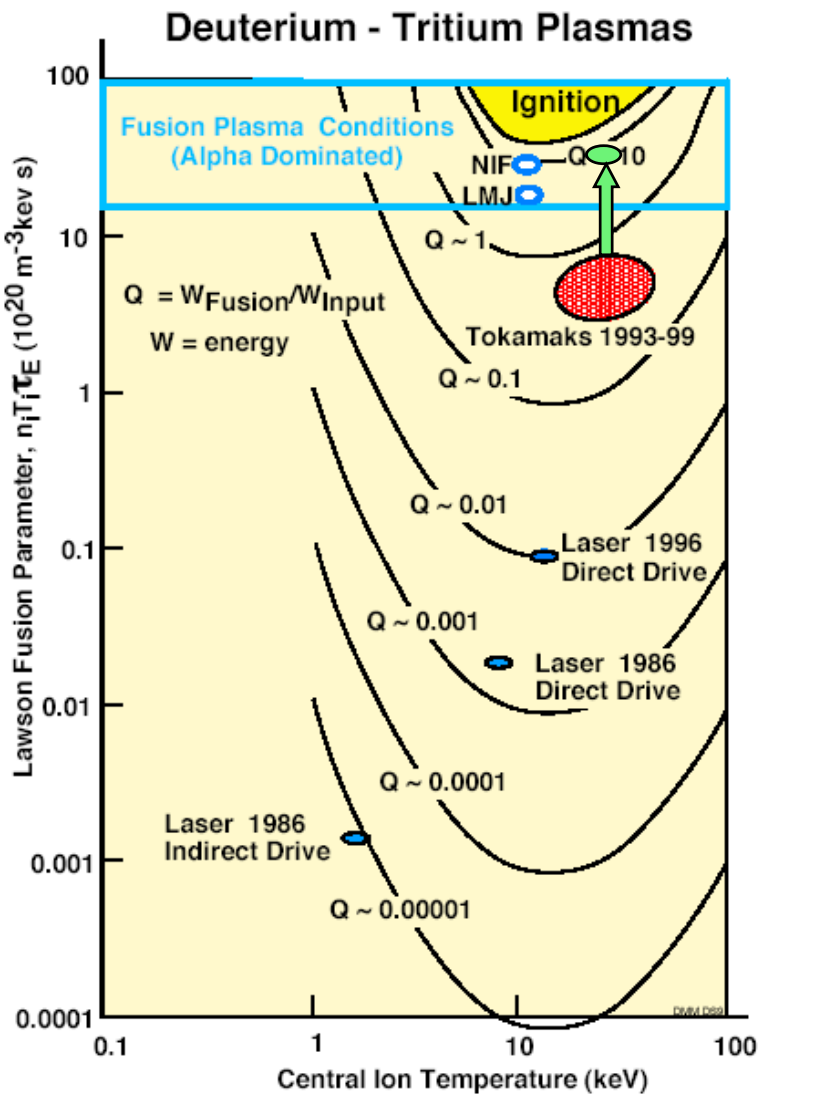

- **Fusion gain is determined by**

$$Q = \frac{P_{fus}}{P_{loss}} \propto nT\tau_E$$

- **Confinement time scaling:** $\tau_E \sim R\, a\, B_T$

# A che punto stiamo con la fusione nucleare ?



# Profili di densita' e temperatura

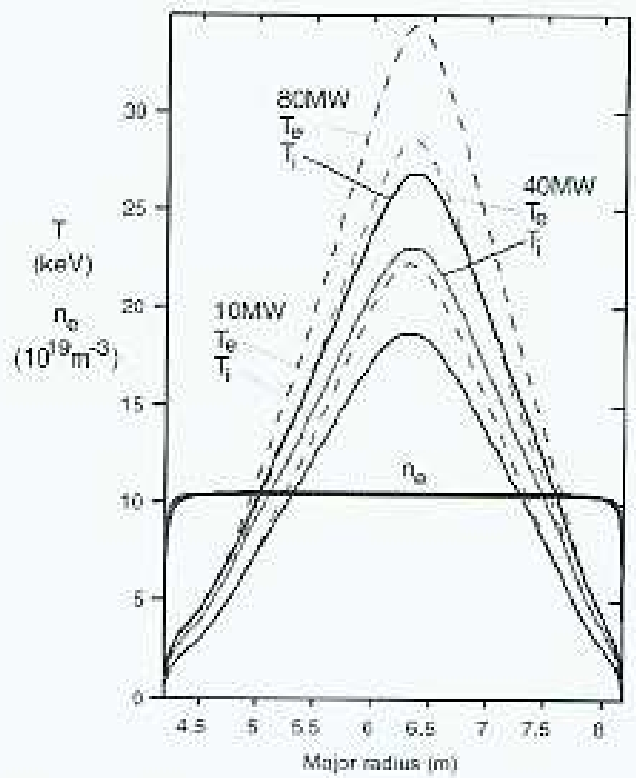



**Figure I.2.3.1-1 Temperature and Density Profiles at Nominal Plasma Current $I_p$ = 15.1 MA and $P_{aux}$ = 10, 40 and 80 MW**

# *Livelli di funzionamento di un reattore a fusione*

Un reattore a fusione e' essenzialmente un amplificatore di potenza con un guadagno che dipende dalla qualita' del plasma ($Q = n\tau T$) ma anche dalla capacita' di estrazione della potenza prodotta senza danno per le strutture di confinamento nucleare.

**Livelli di funzionamento del bilancio energetico**

Regime di Break - even : regime di funzionamento in cui il guadagno e' unitario. La potenza spesa per mantenere il plasma termonucleare e' uguale alla potenza termonucleare prodotta.

Regime di Driven - burn : regime di funzionamento a guadagno >1. La potenza potenza termonucleare prodotta e' maggiore di quella spesa a mantenere il plasma, ma un riscaldamento ausiliare e' necessario

Regime di Ignizione : in questo regime la reazione termonucleare e' mantenuta dai prodotti di fusione confinati ($\alpha$). Il plasma e' "ignito" da un riscaldamento ausiliario nel processo di formazione e successivamente si auto sostiene.

**Livelli di durata di funzionamento**

Steady state regime : Il funzionamento del reattore e' continuo

Pulsed regime : Funzionamento impulsato

I Tokamaks che finora hanno funzionato in D –T [**JET** (EU) ed **TFTR (**US)] hanno ottenuto Q ~ 1 per una durata di pochi secondi

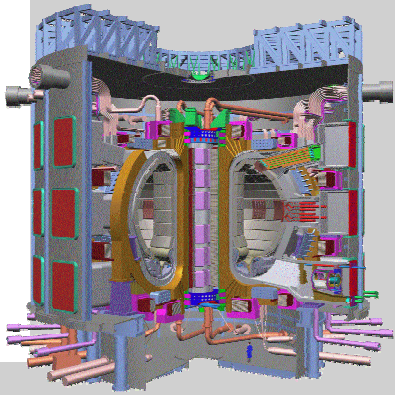
Il record di durata di funzionamento di un tokamak e' di circa 6 minuti ed e' stato ottenuto In Tore Supra (F)

# Obiettivi di ITER

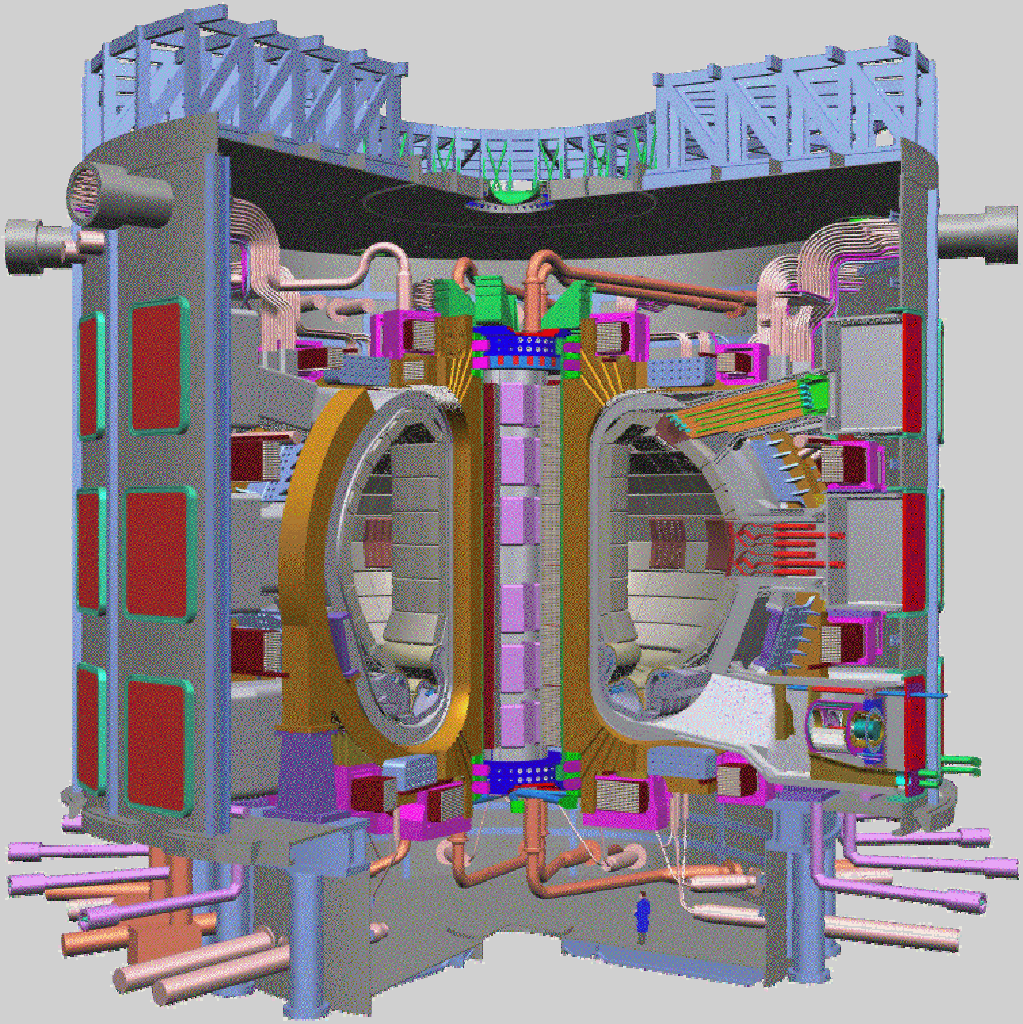
- **Programmatic**
  - Demonstrate the scientific and technological feasibility of fusion energy for peaceful purposes.

- **Physics:**
  - Produce and study a plasma dominated by $\alpha$-particle heating
  - Q~10: $P_{fusion} \sim 10 \times P_{external}$ ($P_{alpha} \sim 2 \times P_{external}$) for ≥ 300s
  - Q~5: aiming at $P_{fusion} \sim 5 \times P_{external}$ ($P_{alpha} \sim P_{external}$) for steady-state
  - retain the possibility of exploring "controlled ignition" (Q ≥ 30)

- **Technology:**
  - demonstrate integrated operation of technologies for a fusion power plant, except for material and component developments
  - average neutron wall load ≥ 0.5 $MW/m^2$ and average lifetime fluence of ≥ 0.3 MW years/$m^2$
  - test concepts for a tritium breeding module



# Parametri del plasma ITER



Plasma .Volume: 840 $m^3$

$B_T$ = 5.3 T

$I_P$ = 15 MA

$T_P$ = 8.7 keV

$n_P$ = : $1.1310^{20}$ $m^{-3}$

$P_{RF+NB}$ = 17+33 = 50 MW
$P_{OH}$ = 1 MW
$P_{rad}$ = 61 MW
$P_{tot}$ = 151 MW

$\beta_T$ = 2.8

$\beta_p$ = 0.72

$\tau_E$ = 3.4 s

$Z_{eff}$ = 1.72

Pulse length =300 s

Fusion Power: 500 MW

Q = 10

# Due scenari di riferimento di ITER

| Parameter | 400 MW | 500 MW |
|---|---|---|
| R/a (m/m) | 6.2/2.0 | 6.2/2.0 |
| Volume ($m^3$) | 831 | 831 |
| Surface ($m^2$) | 683 | 683 |
| Sep. length (m) | 18.2 | 18.2 |
| $S_{cross\text{-}sect}$ ($m^2$) | 21.9 | 21.9 |
| $B_T$ (T) | 5.3 | 5.3 |
| $I_p$ (MA) | 15.0 | 15.0 |
| $\kappa_x/\delta_x$ | 1.85/0.48 | 1.85/0.48 |
| $\kappa_{95}/\delta_{95}$ | 1.70/0.33 | 1.70/0.33 |
| $\iota_I(3)$ | 0.84 | 0.84 |
| $V_{loop}$ (mV) | 75 | 75 |
| $q_{95}$ | 3 | 3 |
| $\beta_N$ | 1.8 | 2.0 |
| $\langle n_e \rangle$ ($10^{19}$ $m^3$) | 10.1 | 11.3 |
| $\langle n_e \rangle / n_G$ | 0.85 | 0.94 |
| $\langle T_e \rangle$ (keV) | 8.8 | 8.9 |
| $\langle T_i \rangle$ (keV) | 8.0 | 8.1 |
| $\beta_T$ (%) | 2.5 | 2.8 |
| $\beta_p$ | 0.65 | 0.72 |

| Parameter | 400 MW | 500 MW |
|---|---|---|
| $P_{RF}+P_{NB}$ (MW) | 7+33 | 17+33 |
| $P_{OH}$ (MW) | 1 | 1 |
| $P_{TOT}$ (MW) | 121 | 151 |
| $P_{BRM}$ (MW) | 21 | 26 |
| $P_{SYN}$ (MW) | 8 | 8 |
| $P_{LINE}$ (MW) | 18 | 27 |
| $P_{RAD}$ (MW) | 47 | 61 |
| $P_{FUS}$ (MW) | 400 | 500 |
| $P_{LOSS}/P_{L\text{-}H}$ | 87/48 | 104/51 |
| Q | 10 | 10 |
| $\tau_E$ (s) | 3.7 | 3.4 |
| $W_h$ (MJ) | 320 | 353 |
| $W_{fast}$ (MJ) | 32 | 34 |
| $H_{H98\,(y,2)}$ | 1.0 | 1.0 |
| $\tau_{He}^*/\tau_E$ | 5 | 5 |
| $Z_{eff,ave}$ | 1.66 | 1.72 |
| $f_{He,,axis\,/\,ave}$ (%) | 4.3/3.2 | 4.4/3.2 |
| $f_{Be,axis}$ (%) | 2.0 | 2.0 |
| $f_{Ar,axis}$ (%) | 0.12 | 0.14 |

# Struttura meccanica di ITER

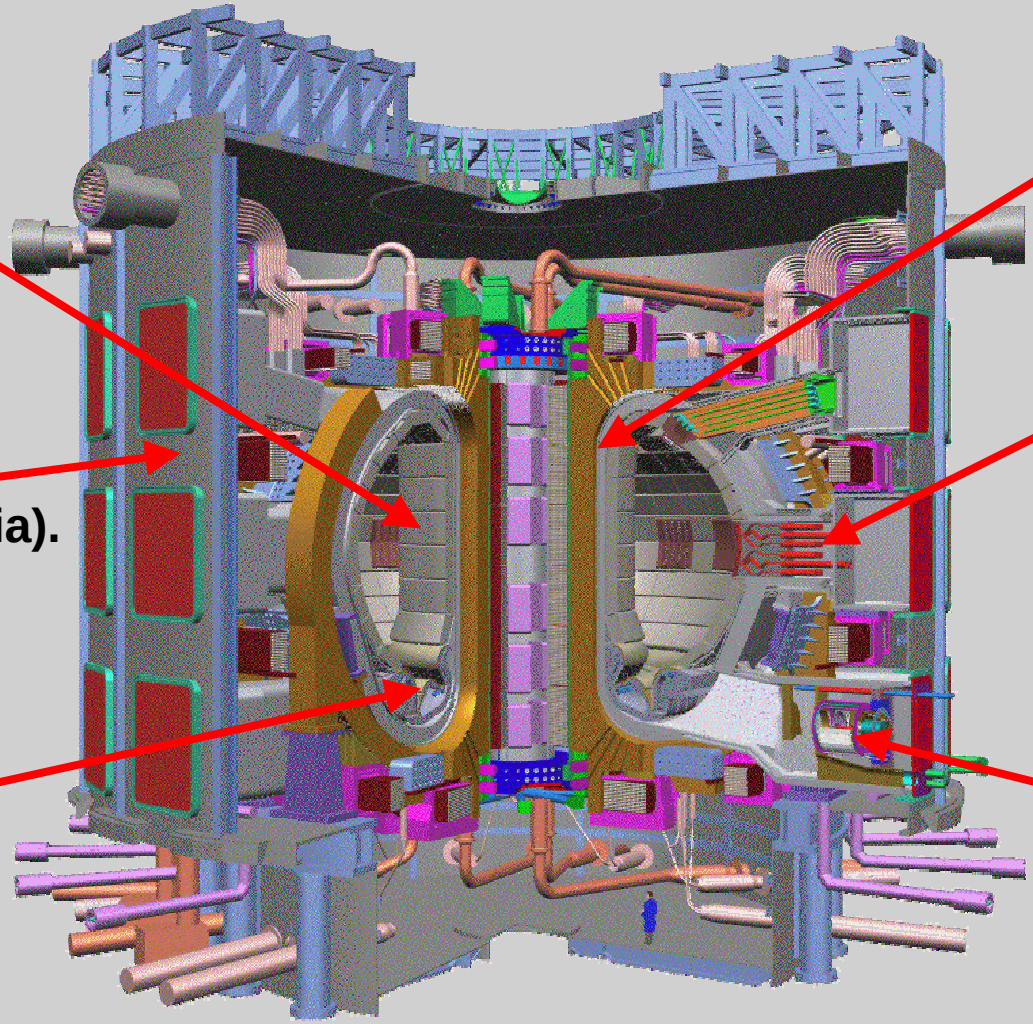
**Blanket**

**440 moduli**

**Criostato**

**24 m x 28 m (dia).**

**Divertore: 54 moduli**

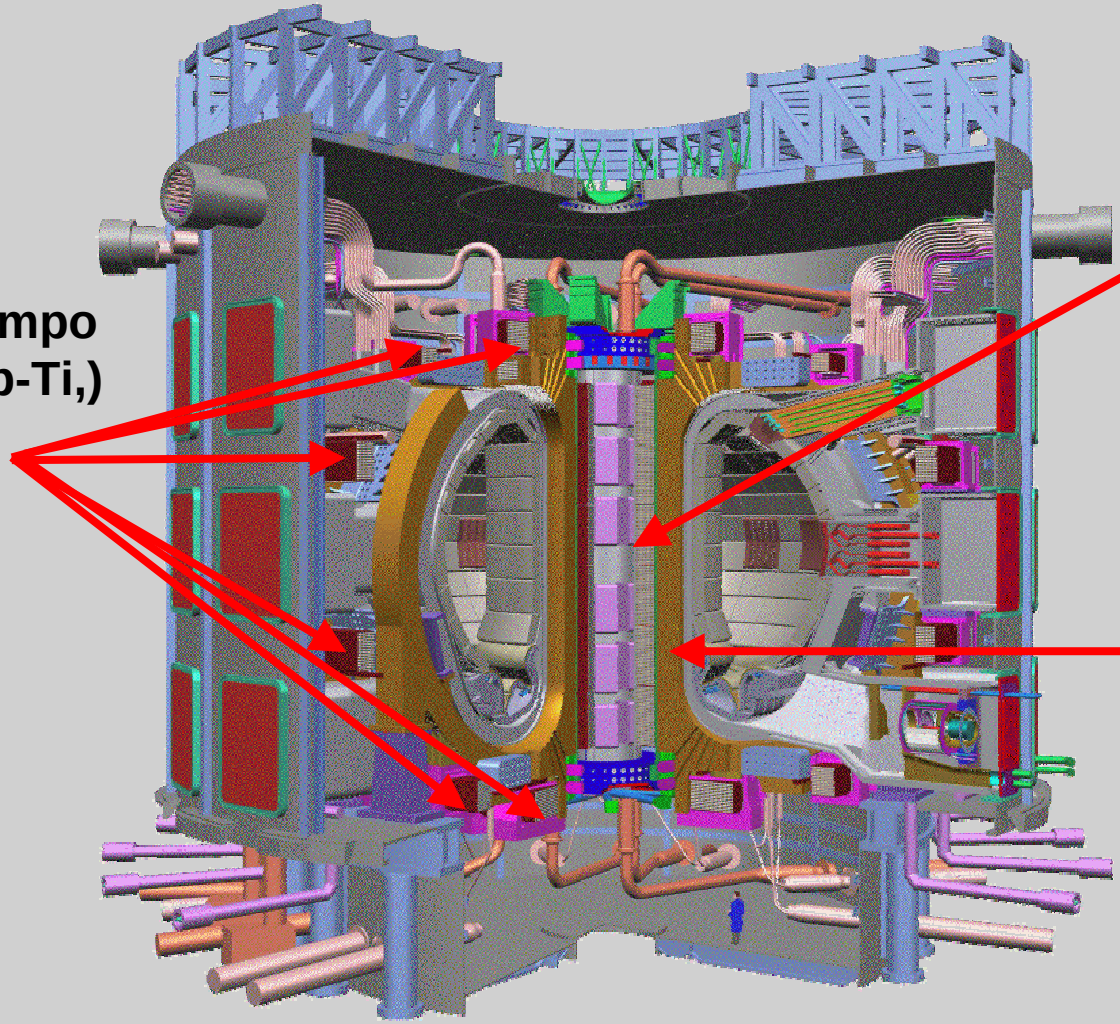


**Camera a vuoto**
**9 settori**

**36 Porte di accesso al plasma per**
- **Sistemi di riscaldamento**
- **Diagnostiche**
- **Limiters**
- **Breeding blankets**

**Crio-pompe**
**8 unita'**

# *Magneti di confinamento*

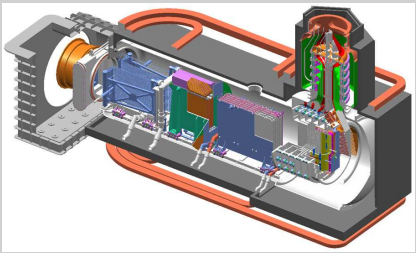


**Solenoide Centrale ($Nb_3Sn$), 6 bobine**

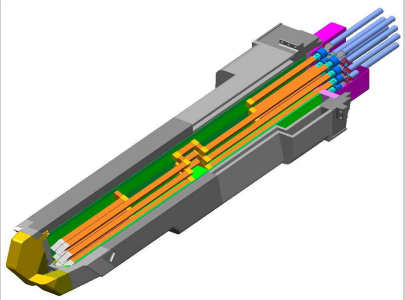
**Bobine di campo poloidale (Nb-Ti,) 6 bobine**

**Bobine di campo toroidale ($Nb_3Sn$), 18 bobine**

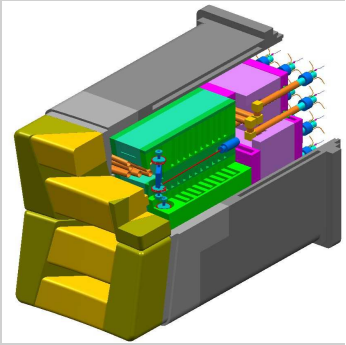
# Sistemi di riscaldamento



**EC Upper Port**

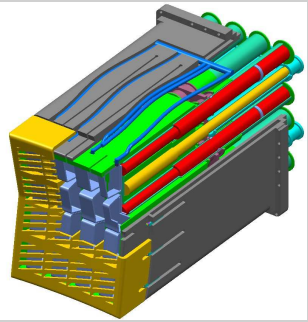


**EC**

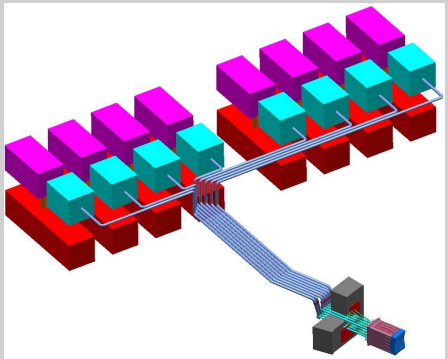


| | Startup | | Scenario 1 | | Scenario 2 | | Scenario 3 | | Scenario 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Power [MW] | Equat. ports | Power [MW] | Equat. ports | Power [MW] | Equat. ports | Power [MW] | Equat. ports | Power [MW] | Equat. ports |
| NB | 33 | 2 | 33 | 2 | 50 | 3 | 50 | 3 | 50 | 3 |
| IC | 20 | 1 | 40 | 2 | 20 | 1 | 40 | 2 | 20 | 1 |
| EC | 20 | 1 | 40 | 1(1) | 40 | 1(1) | 40 | 1(1) | 20 | 0(1) |
| LH | 0 | 0 | 20 | 1 | 20 | 1 | 0 | 0 | 40 | 2 |
| Total Installed | 73 | 4 | 133 | 6 | 130 | 6 | 130 | 6 | 130 | 6 |

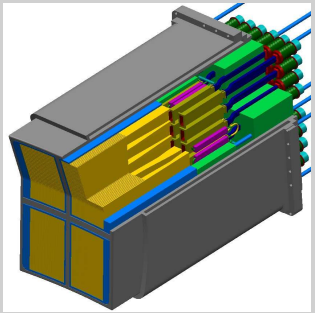
(1)EC H&CD uses 3 upper ports for the power upgrade



**RF Layout**



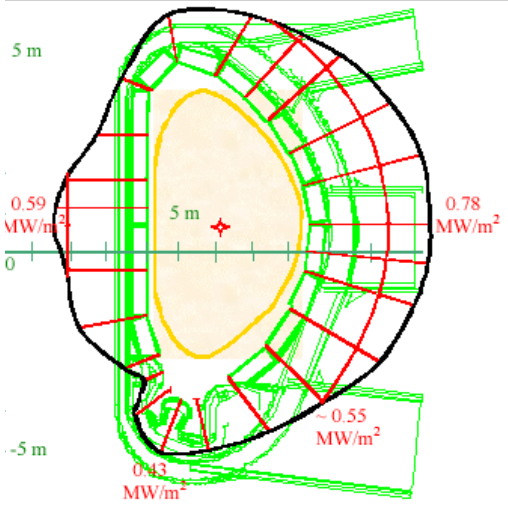
**LH**



# Radiazione in ITER

| | | |
|---|---|---|
| Fusion power | 500 | MW |
| Total average neutron fluence at the first wall | 0.3 | $MWa/m^2$ |
| Integrated full power operation time | 4600 | h |
| Peak burn duty cycle | 25 | % |
| Nominal number of pulses | 30000 | |

| Location | Neutrons | | Dose Rate | Fluence | Particle flux | Plasma radiation |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Typical diag. component* | > 0.1 MeV $n/m^2s$ | 14 MeV $n/m^2s$ | Gy/s | > 0.1 MeV $n/m^2$ | atoms $/m^2s$ | (peak) $kW/m^2$ |
| First Wall [1] | $3x10^{18}$ | $8x10^{17}$ | $2x10^3$ | $3x10^{25}$ | $\sim 5x10^{19}$ | 500 |




## Effects

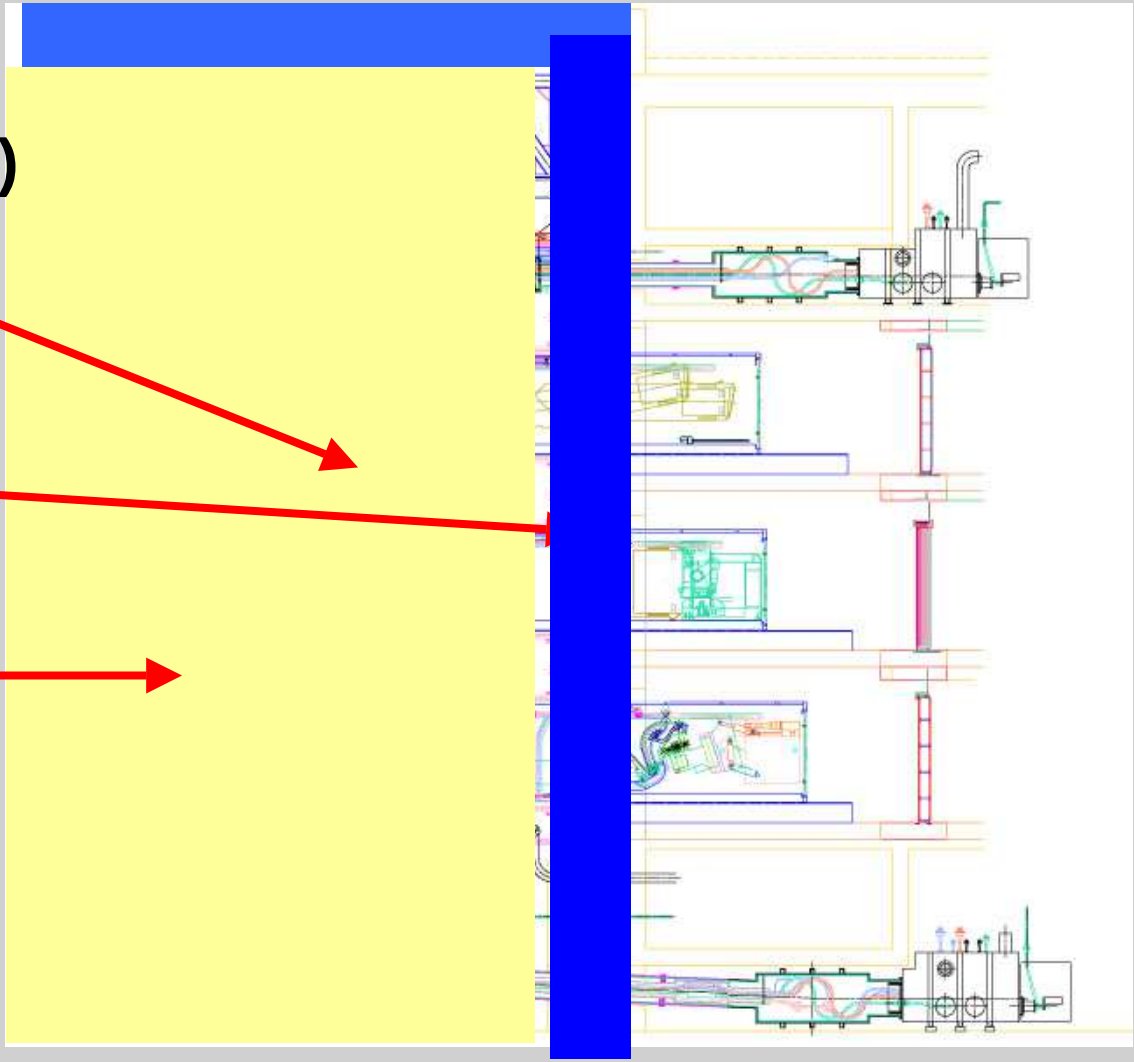
damage and gas production rates in in-vessel components,
local nuclear responses in supeconducting magnets,
integral nuclear heating in the TFC and intercoil structures,
neutron fluxes and residual radiation doses at maintenance locations,
activation of structural components

# Barriere di confinamento del trizio e aree irradiate

**Prima barriera**
**(Blanket e Camera a vuoto)**

**Seconda barriera**
**(Bio-shield)**

**Area irradiata**



# *ITER Engineering Design Activity (EDA)*

**ITER e' stato progettato in un periodo di 10 anni (1991- 2001) da una equipe internazionale (ITER Team) formata da ricercatori provenienti da 5 Partners (EU, US, RF, JA), distribuita in tre siti (Garching-EU, S.Diego-US, Naka-JA, con l' appoggio, per gli sviluppi R&D di Home Teams appartenenti a ciascun Partner**

**Si e' inizialmente progettata un reattore funzionante in regime di ignizione, arrivando nel ad un Rapporto Finale di Progetto (FDR), sottoposto nel 1998 all' analisi dei governi dei diversi Partners. La spesa di costruzione del reattore fu ~ 10 G$.**

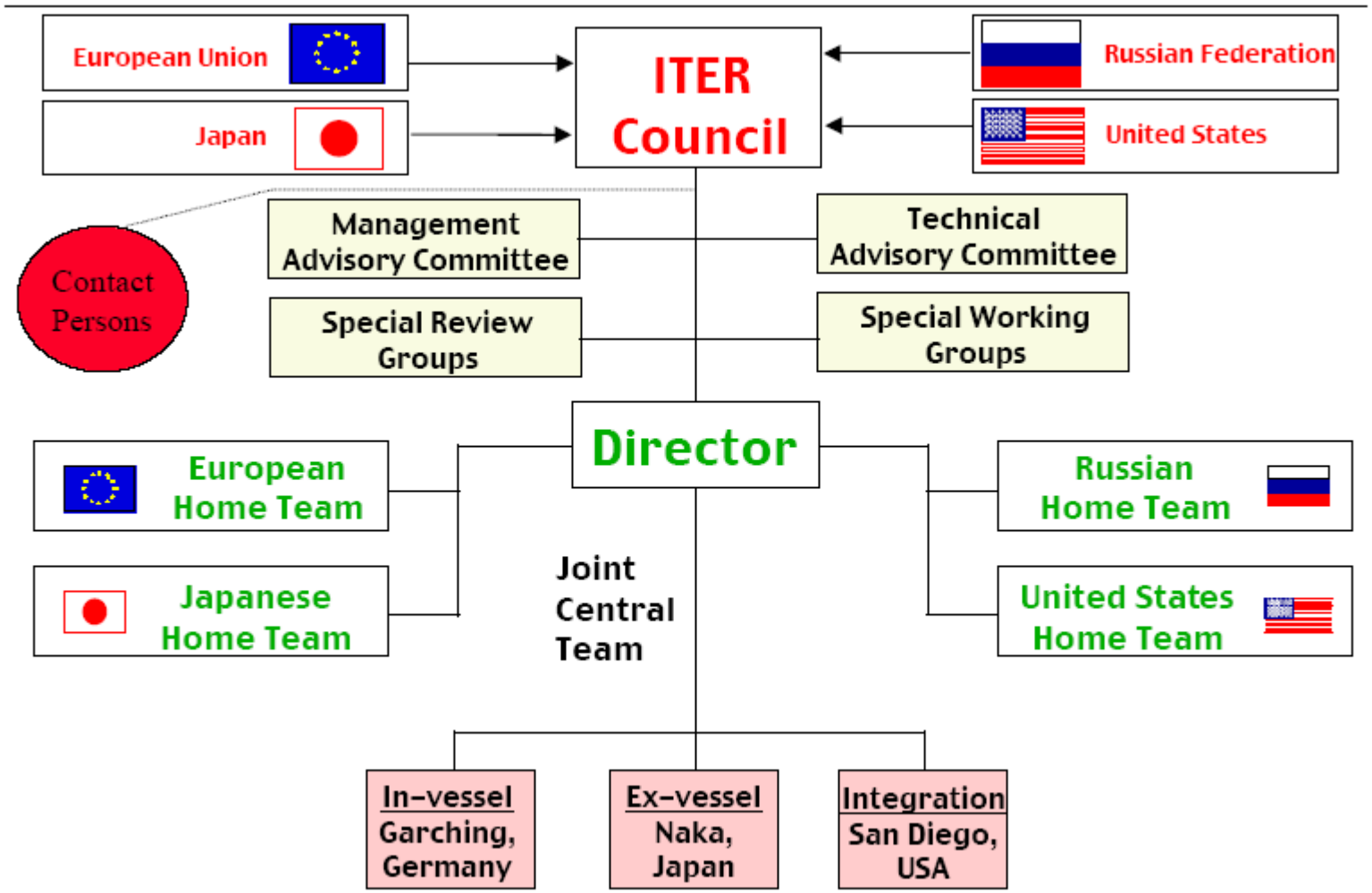
**Il costo del progetto fu ritenuto eccessivo da alcuni Partners, e dopo varie discussioni, gli US si ritirarono dal progetto e gli altri 3 Partners decidero di continuare, imponendosi una revisione del progetto per una macchina funzionante in regime "driven burn" il cui costo non superasse i 5G$**

**La revisione fu effettuata nei due anni successivi utilizzano ove possibile i risultati del progetto precedente, ed un nuovo progetto e Rapporto Finale fu presentato nel 2001, che fu accettato dai Governi dei 3 Partners.**

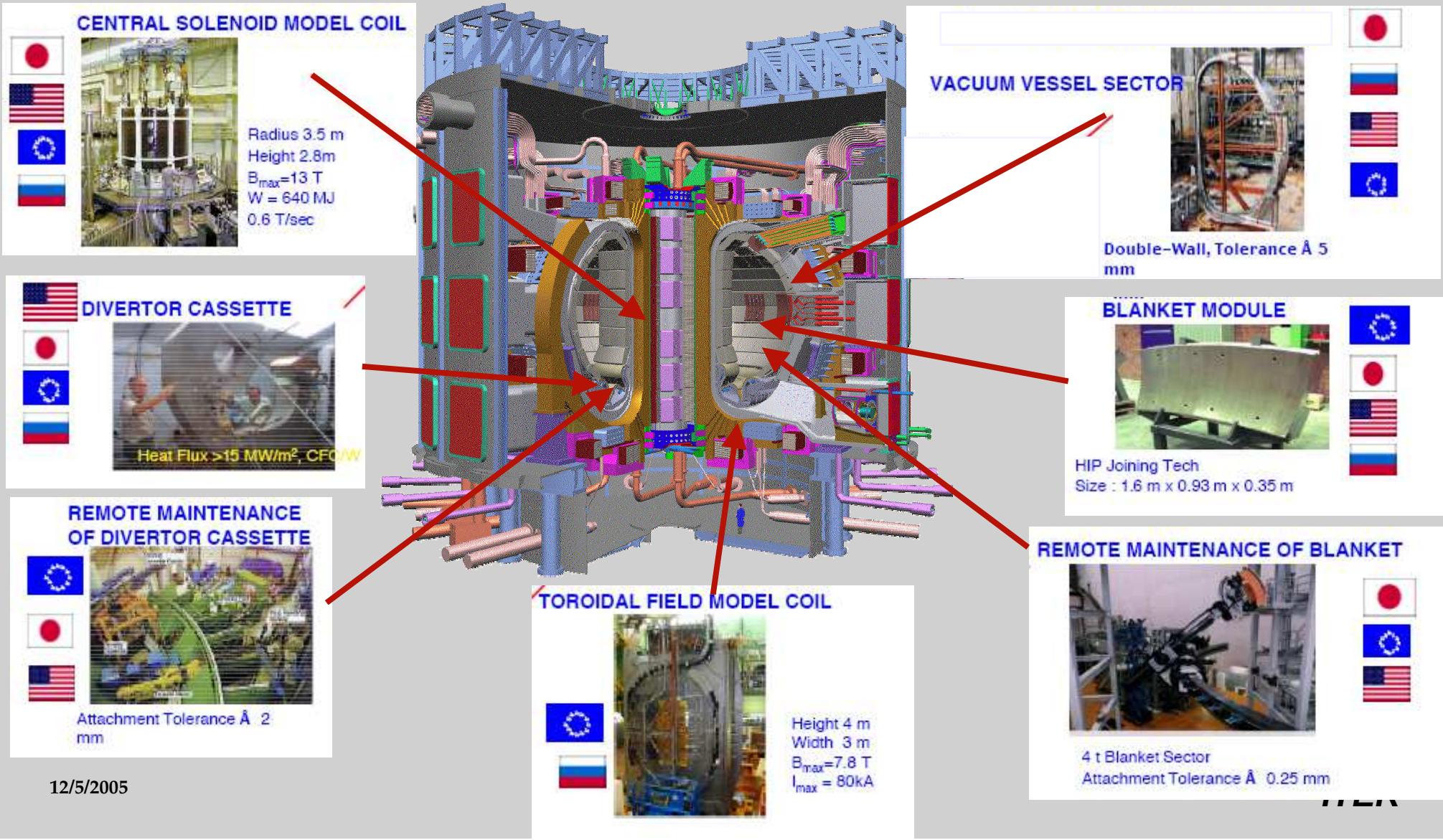
**Nel 2002 gli US decidono di rientrare nel progetto ITER, accettandone i risultati**

**Nel periodo 2002- 2005 anche la Corea del Sud, la Cina Popolare entrano nel progetto**

# Struttura di gestione di ITER EDA

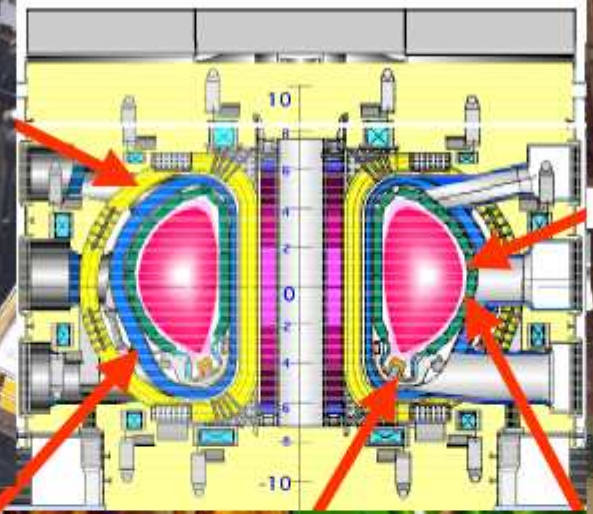


# *In EDA, progetto e tecnologia di base sono stati sviluppati…*

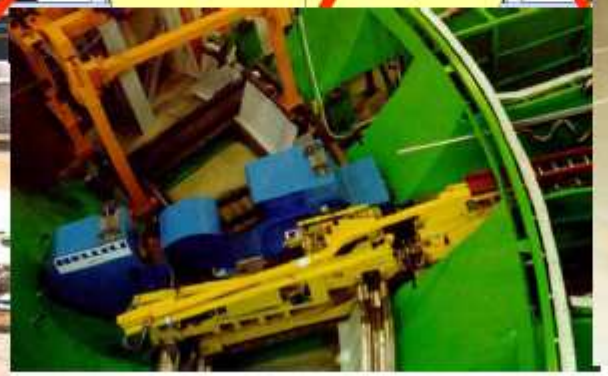


# ….e ne e' stata data la dimostrazione di fattibilita' industriale…

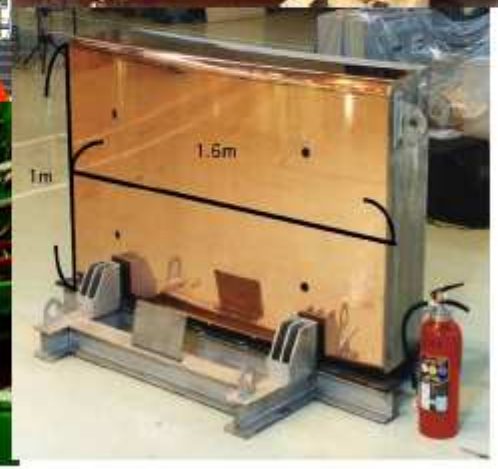
TFModel Coil



Vacuum Vessel Sector

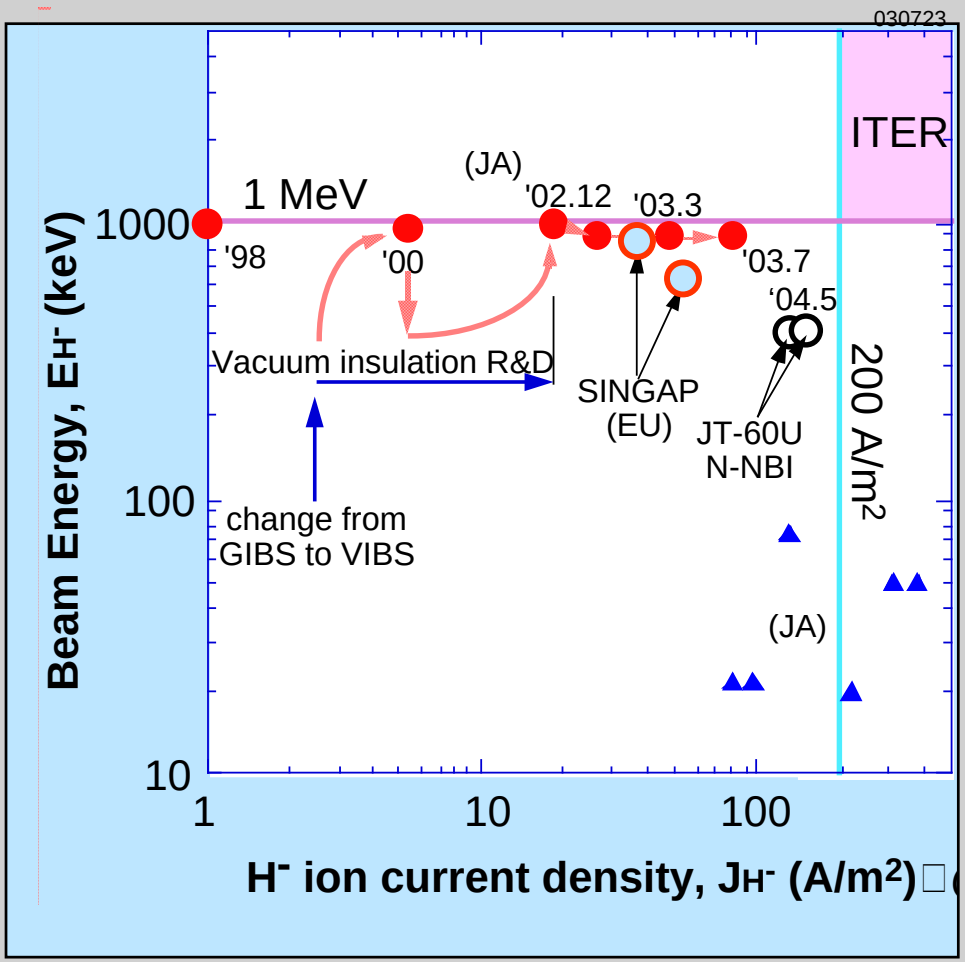


Remote Handling Tool of Divertor




Blanket and its Remote Handling Tool

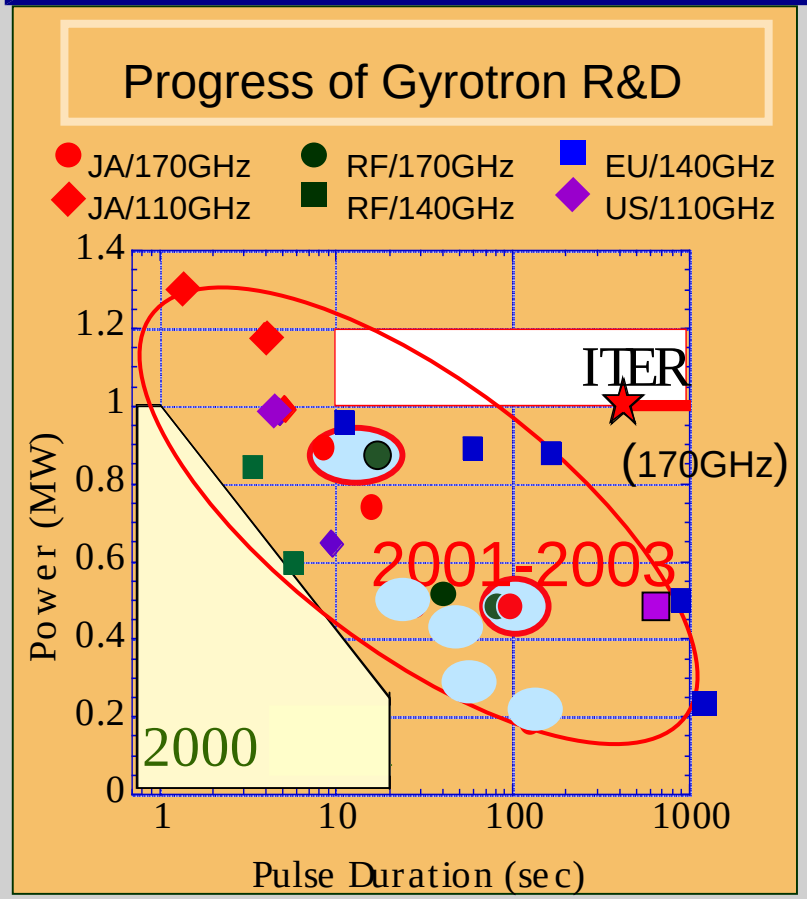
# ....ma non tutto e' stato fatto: NBI R&D largamente incompleta...

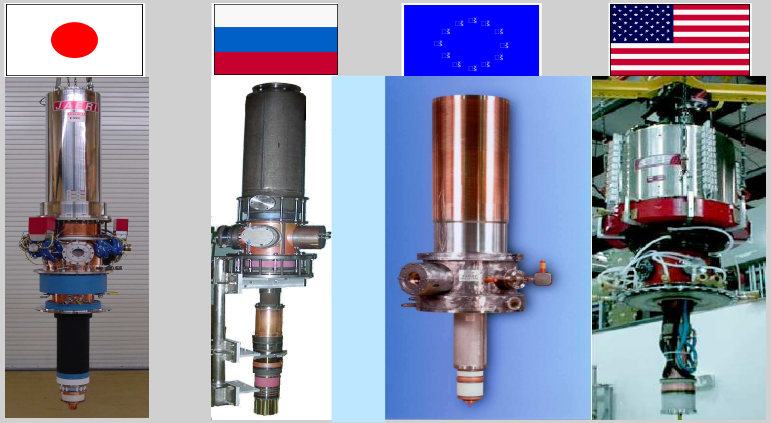



| Beam energy | Negative ion current ($H^-$) | Negative ion current density ($H^-$) |
|---|---|---|
| **ITER** | | |
| **1 MeV** | **40 A** | **200 A/m²** |
| **MeV accelerator (achieved) 1), 2)** | | |
| **0.8 MeV** | **0.14 A** | **102 A/m²** |
| **JT-60U N-NBI** | | |
| **0.41 MeV**<br>**0.40 MeV** | **20.4 A ($H^-$)**<br>**17.4 A ($D^-$)** | **150 A/m²**<br>**130 A/m²** |

Note 1) Power supply is limited to max. 1 A.
2) Heat removal of beam dump was limited to 100A/m². After the modification, try to produce the required beam (200 A/ m²).

# .....e sorgenti ECRH non sono ancora disponibili.....



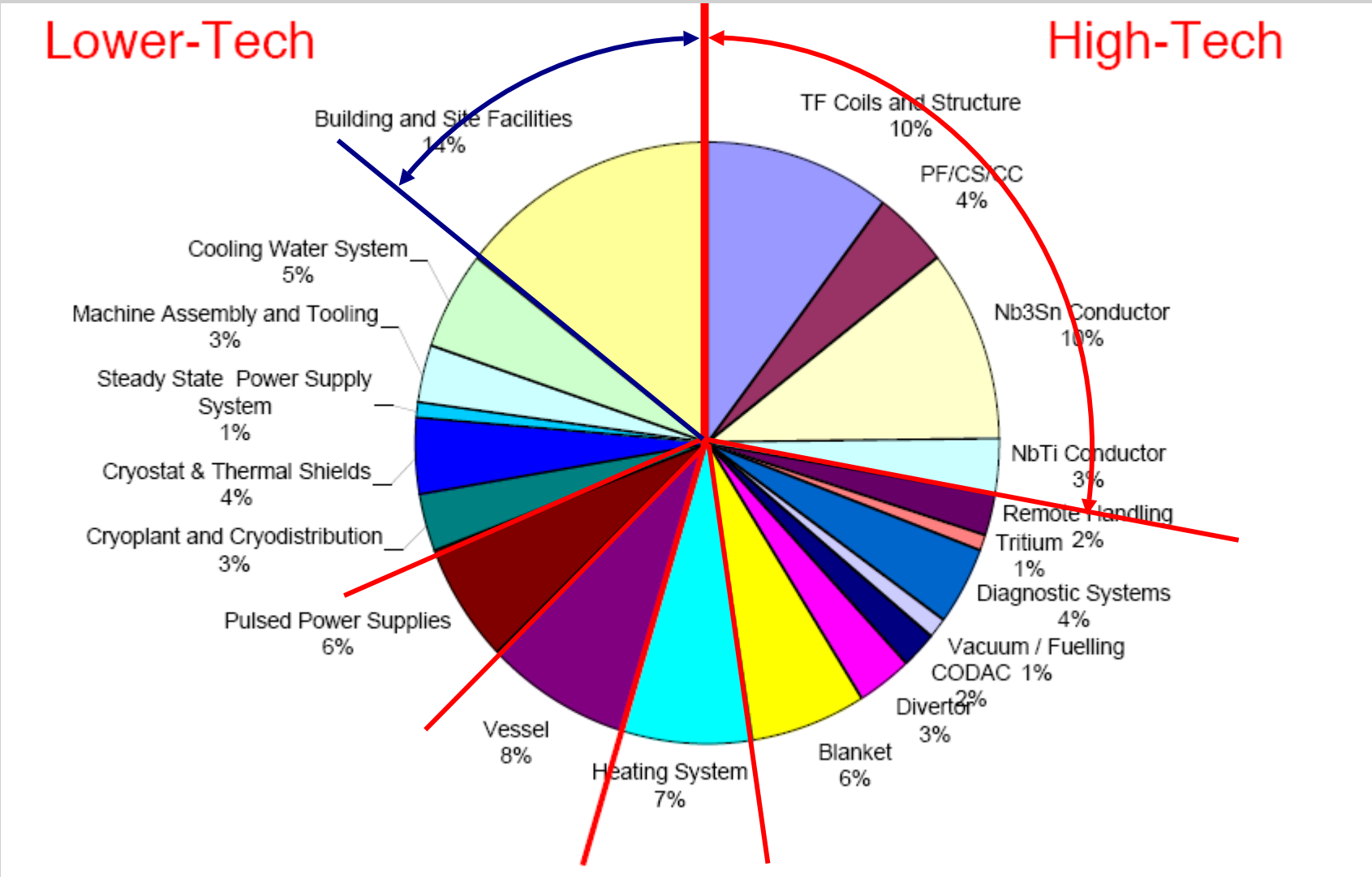



| Japan | Russia | EU | USA |
|---|---|---|---|
| 170GHz | 170GHz | 140GHz | 110GHz |
| 110GHz | 140GHz | | 140GHz |

Test of 170 GHz/1 MW in CW operation (> 400 sec) is in progress.

***e dovranno essere sviluppate durante il periodo di costruzione***

# Suddivisione dei costi di costruzione per sistema



# *Suddivisione dei costi di costruzione tra Partners*

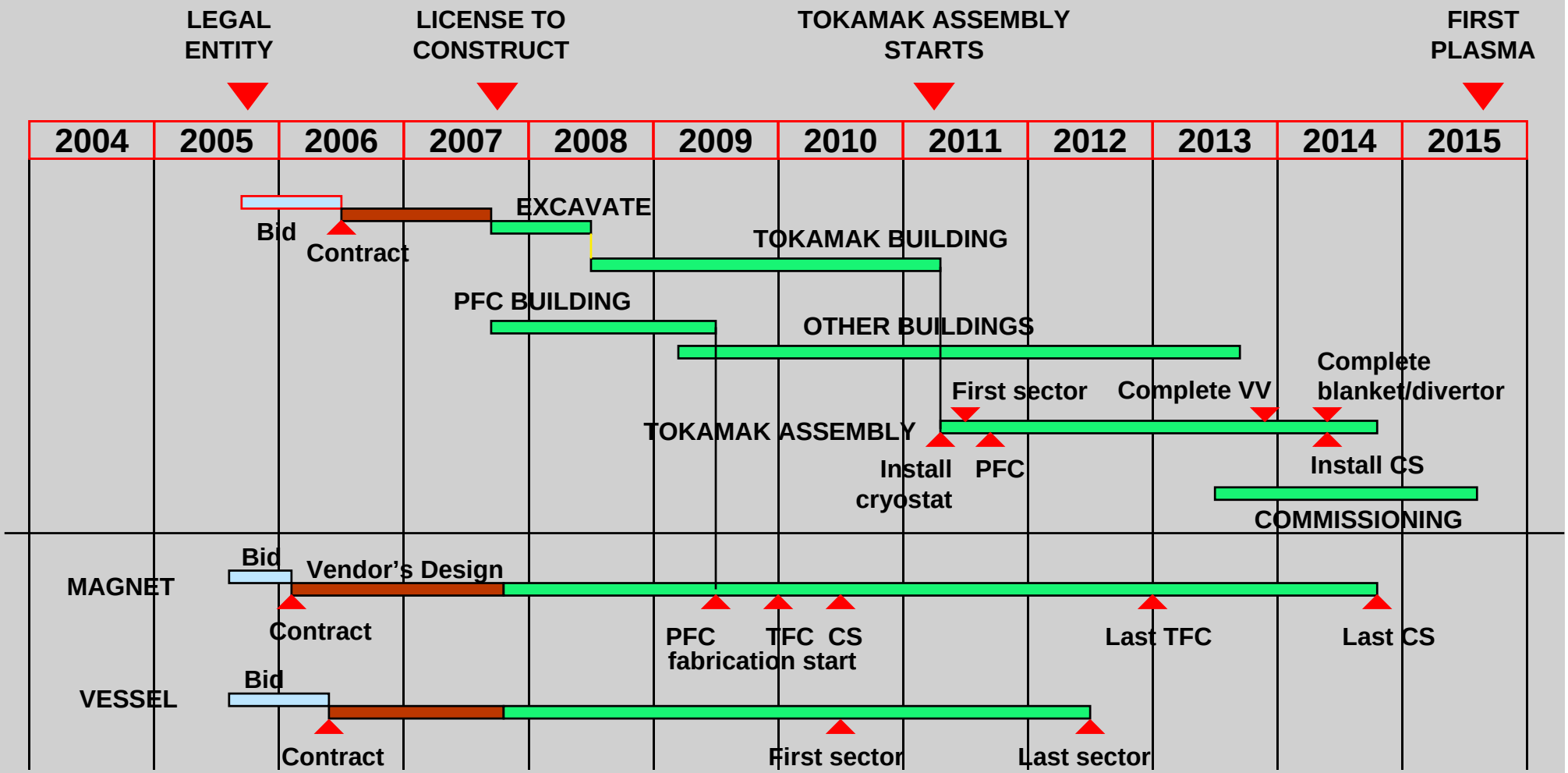
- **EU:** TF(0.5), conductors, cassette and outer target, vac.pumps, div. RH, casks (0.5), isotope sep., IC, EC, diag.
- **JA:** TF(0.5), conductors, inner target, blanket RH, EC, diag.
- **KO:** conductors, vessel ports (0.67), blanket (0.2), assembly tools, thermal shield, T storage, AC/DC (0.65), diag.
- **CN:** magnet supports, feeders, correction coils, conductors, blanket (0.2), cryostat, gas injection, casks (0.5), HV substation, AC/DC (0.35), diag.
- **RF:** PF1, conductors, vessel ports (0.33), blanket (0.2), port limiters, flexibles, dome and PFC tests, Discharge circuits, EC, diag.
- **US:** CS(0.5), conductors, blanket (0.1), vac.pumps, pellet inj., vessel/in-vessel cooling, tok exh. proc., IC, EC, diag.

| Party | Share | Total |
|---|---|---|
| CN / KO / RF/US | 10% each | 40% |
| EU (Host) | 36%+Flex(a) | 50% |
| JA (Non-Host) | 10%+Flex(b) | 10% |

- **Fund (10%):** Feeders, Shielding, viewing, NB, RH, Hot cell eq., cryodist., CODAC, installation and test, other sundry items

Host provides Buildings and Utilities.
Remaining allocation (Flex.) depends on site.

# Programma di costruzione



# *Acquisizione dei componenti nel periodo di costruzione*

**L' acquisizione dei componenti costitutivi della macchina da parte del progetto ITER avverra' "in kind". Ciascun Partner fornirà componenti pronti per l'istallazione, avendoli acquisiti a proprie spese su specifiche e disegni sviluppati in comune, sulla base di una suddivisione di costi gia' negoziata in linea di principio**

**I costi di produzione industriale saranno sostenuti dai vari Partners in un modo indipendente dal loro costo reale.**

**Questo metodo permette in pratica una levitazione arbitraria dei costi di costruzione , ma richiede una ferrea organizzazione preventiva ed esecutiva del progetto, dato che errori di produzione di un Partner o mancanza di coordinamento tra le produzioni di Partners differenti si riflettono con ritardi nel progetto ed aumenti di costo.**

**Significativi rischi di gestione del progetto**

# *Coinvolgimento dell' industria in ITER*

**La partecipazione dell' industria al progetto ITER puo' avvenire a due livelli :**

1. **di fornitura di sistemi ed impianti di grandi dimensioni ma di livello tecnologico commerciale, mediante gare e contratti di procurement durante il periodo di costruzione della macchina (edifici, sistemi meccanici, alimentazioni elettriche, criogenia, idraulica, servizi)**
2. **In programmi di ricerca e sviluppo su sistemi e/o tecnologie nuove o non completamente sviluppate, in collaborazione con gli Enti europei (ELE, EFDA, Consorzio Industriale per la Fusione) e nazionali (ENEA) che coordinano la ricerca e sviluppo, in vista di di una fornitura industriale del prodotto finito (supraconduttori, sistemi di riscaldamento, robotica, diagnostiche, T-handling, sicurezza nucleare)**

**E' essenziale che, in particolare il convolgimento in questa secondo tipo di partecipazione avvenga al piu' presto con una partecipazione diretta nella fase di sviluppo.**

# *Coinvolgimento dell' Universita' in ITER*

**Il progetto ITER si sviluppera' su un periodo di 30 anni, un tempo confrontabile o piu' lungo del periodo attivo di un ricercatore**

**In particolare in Europa, che prtecipera' al progetto con il 50% del costo del progetto e' necessario preparare giovani ricercatori ed ingegneri che sappiano utilizzare in un modo efficiente queste risorse.**

**E' ovvio che queste persone dovranno essere selezionate nelle Universita, ed addestrate nei centri di ricerca.**

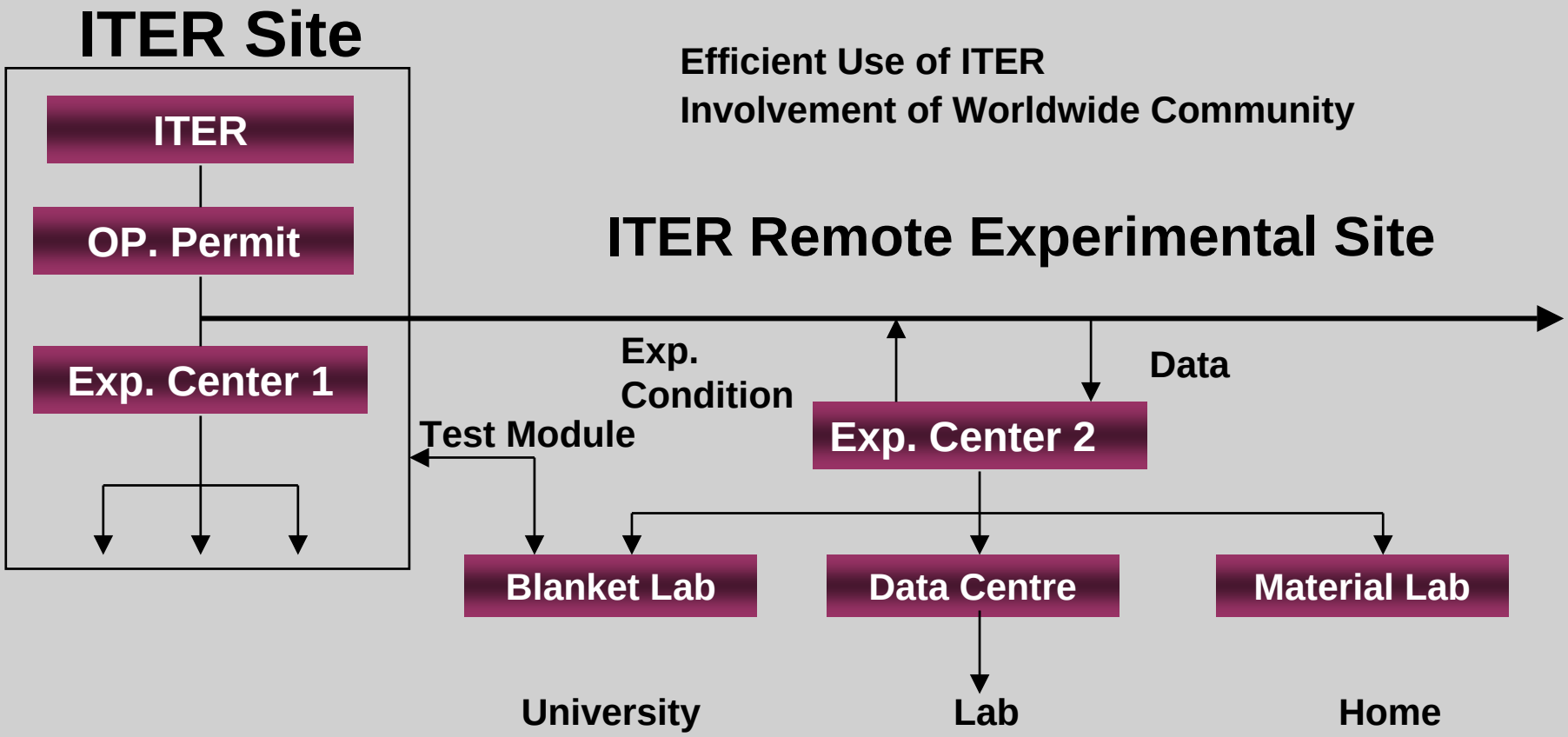
**La UE ha iniziato un programma di addestramento specifico per il progetto ITER (EURATOM Fusion Training Scheme - EFTS) su temi di ricerca considerati prioritari**

**Areas covered:**

- **heating systems**
- **diagnostics**
- **magnet systems**
- **remote handling equipment**
- **fuel cycle**
- **control and data acquisition**
- **plasma facing materials**

**system engineering**

# *Sperimentazione di collaborazione scientifica ed industriale*

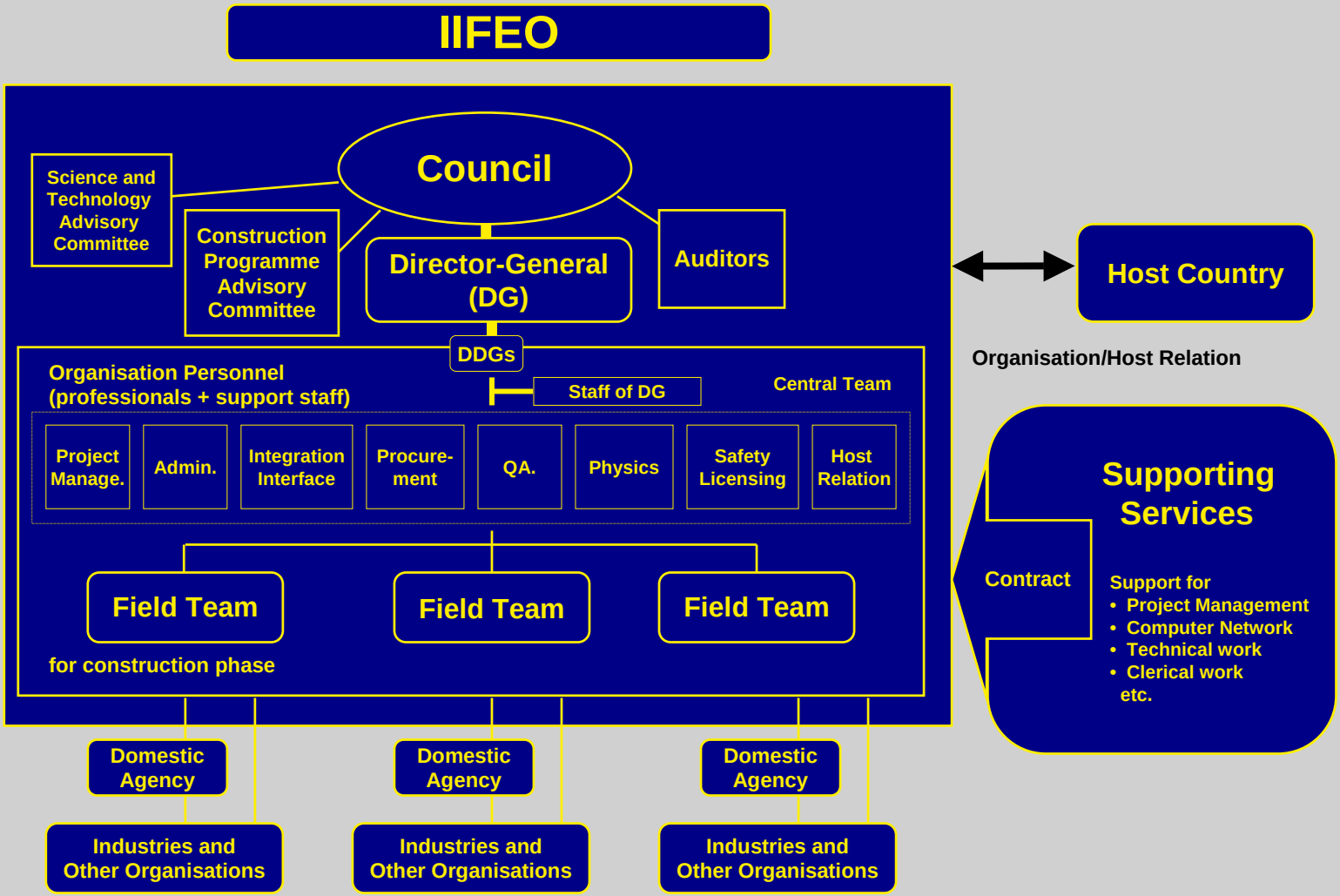



**Example:** 3 shift/day on site (night shift for monitoring and support of remote experiment)

1 or 2 shift(s)/day on remote experimental sites

Base programme: 2 shift/day operation/experiment on-site

# ITER International Fusion Energy Organisation



# Sito di ITER a Cadarache (Bouche du Rhône )