

# *Lezione 15*

## *Sistemi di confinamento magnetico toroidali*

G. Bosia  
Universita' di Torino

## *Sistemi di confinamento tipo Stellarator*

Un modo per produrre un campo toroidale con trasformata rotazionale è quello dello 'Stellarator', nel quale, oltre alle normali bobine toroidali, vengono impiegati degli avvolgimenti elicoidali attorno alla camera da vuoto

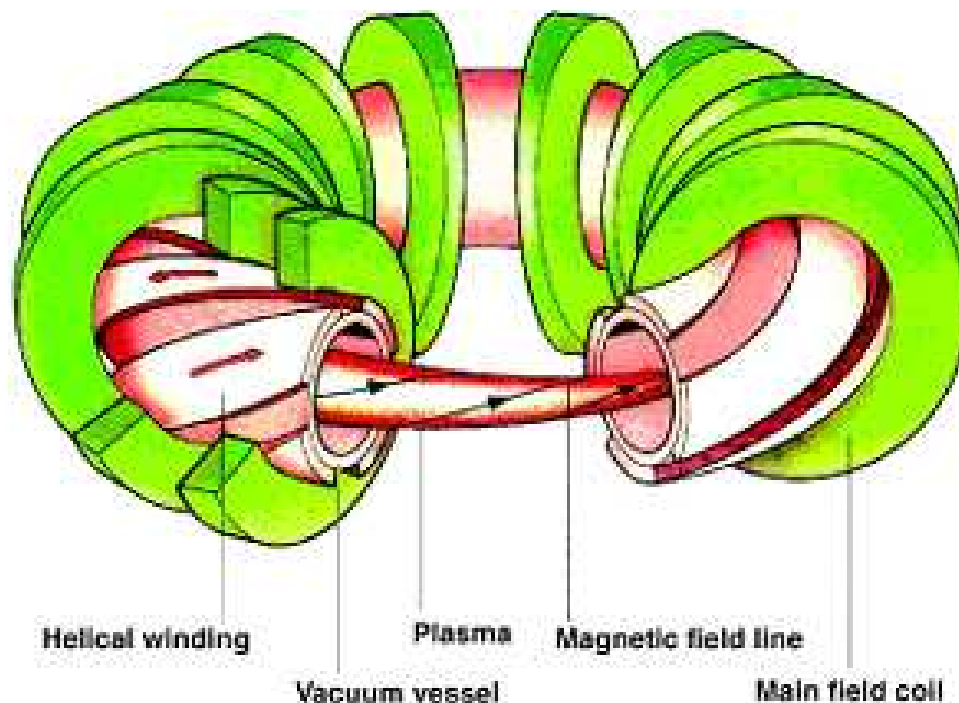
Questi avvolgimenti aggiuntivi generano un campo magnetico elicoidale nella camera toroidale, la cui direzione varia man mano che ci si sposta lungo il toro,

Questa configurazione è stata inventata da Spitzer al PPPL e ha la proprietà di poter confinare, al suo interno, un plasma in cui non fluisce alcuna corrente assiale.

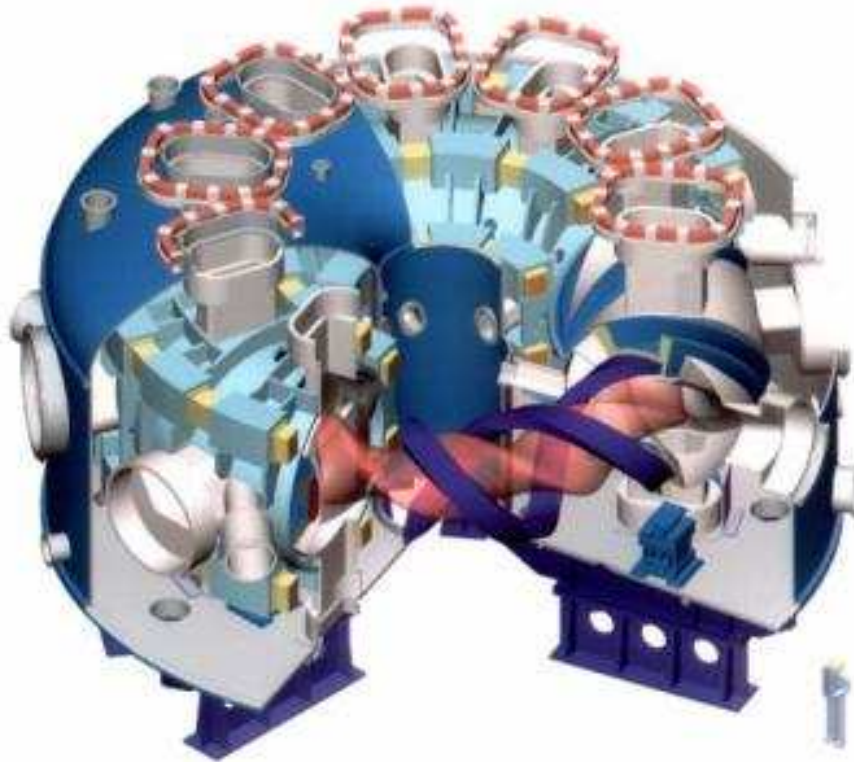
La struttura di confinamento è pertanto fornita completamente da campi magnetici imposti dall'esterno

La configurazione magnetica dello Stellarator è relativamente complessa perché per la produzione dei campi sono necessarie bobine di forma piuttosto complessa e di grande precisione meccanica e non è certo che possa essere utilizzato come base per un reattore.

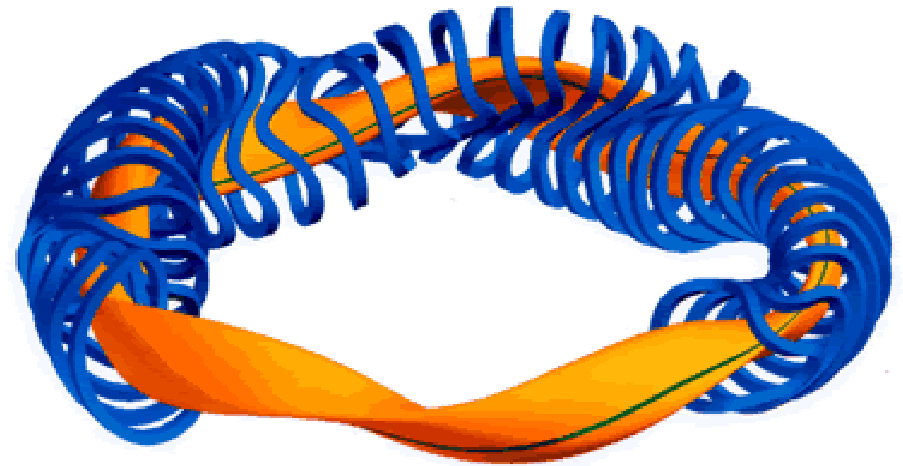
In queste lezioni considereremo solo brevemente questa configurazione magnetica.



## *Stellarator*



LHC (Japan)



Wendelstein - X (Germania)

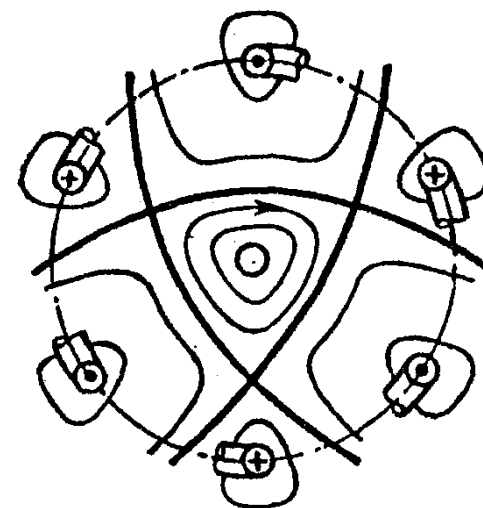
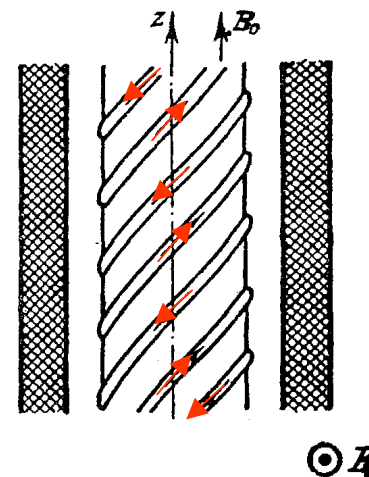
## *Sistemi toroidali tipo “stellarator”*

Per dare un'idea della geometria delle linee del campo risultante che si genera dalla sovrapposizione di campi toroidale e elicoidale, possiamo semplificare il problema sostituendo la camera toroidale con un cilindro rettilineo, infinito.

Assumiamo che il campo trasversale sia prodotto da un avvolgimento di  $2l$  conduttori avvolti ad elica disposti simmetricamente attorno alla superficie esterna del cilindro; le correnti in questi conduttori siano di uguale intensità, ma opposte in direzione in conduttori adiacenti.

Quando il campo creato da un avvolgimento ad elica di questo tipo è sovrapposto al campo uniforme assiale di un solenoide rettilineo semplice, le linee di forza si avvolgono attorno all'asse di simmetria del cilindro.

Se si sceglie una linea di forza passante per un punto interno al cilindro e non troppo periferico, e la si segue lungo il tubo per una distanza più lunga del passo dell'avvolgimento elicoidale esterno, si può vedere facilmente che la linea di forza gradualmente ruota attorno all'asse del cilindro. Essa giace naturalmente su una 'superficie magnetica'<sup>1</sup>.

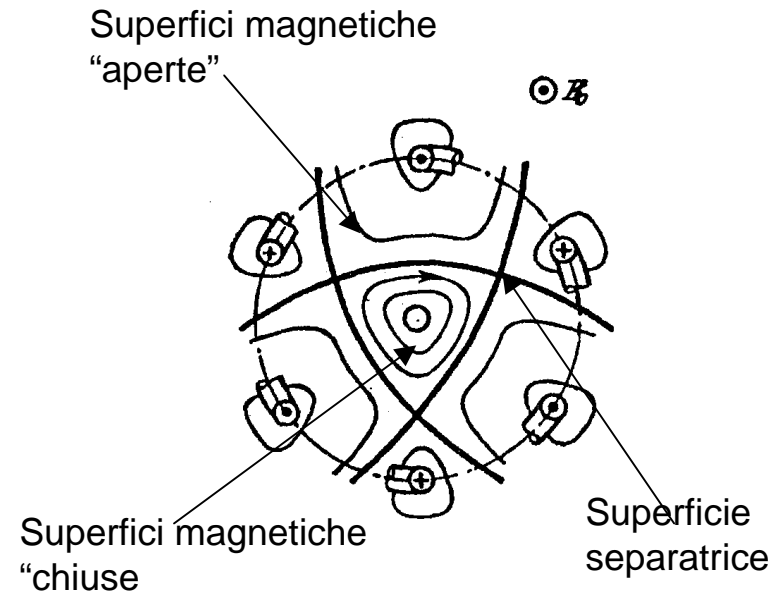




## *Sistemi toroidali tipo “stellarator”*

In figura e' mostrata una sezione delle superfici magnetiche nel caso  $\ell = 3$ . In questa struttura multipolare di campo magnetico si possono individuare superfici magnetiche “chiuse” su cui giacciono linee di forza di campo magnetico che si avvolgono attorno all'asse magnetico e non attraversano le pareti del “ contenitore” ed “aperte” ovvero superfici magnetiche le cui linee di forza si chiudono attorno ai conduttori elicoidali attraversando il contenitore ”. La zona di confinamento del plasma e' ovviamente limitata all'interno della prima categoria di superfici.

La superficie magnetica intermedia, che separa regioni dello spazio con superfici magnetiche a topologia diversa, si chiama "separatrice".



Caratteristici di questa superficie sono i vertici (punti X) La posizione della 'separatrice' ha grande importanza pratica, perché le particelle del plasma risultano confinate da linee di campo a forma elicoidale solo se esse si trovano nella regione di spazio delimitata dalla separatrice.

Se si aumenta la corrente negli avvolgimenti elicoidali lasciando inalterato il campo magnetico assiale, la separatrice si comprime verso l'asse del cilindro e vi è quindi una riduzione del volume della regione adatta a confinare il plasma.

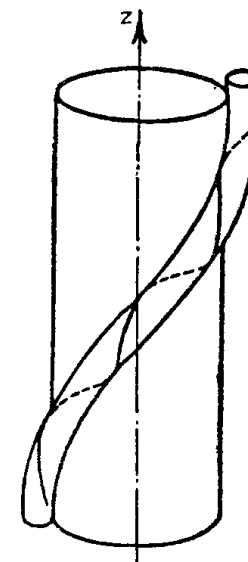
## *Sistemi toroidali tipo “stellarator”*

All' interno della 'separatrice', una linea di *forza* che giace su una superficie magnetica chiusa ha anche essa un andamento ad elica lungo la direzione dell'asse del cilindro, ma essa “spiralizza” più in fretta di quanto non faccia la sezione normale della superficie magnetica, e pertanto si avvolge diverse volte attorno alla superficie magnetica che essa crea, entro lo spazio dato dal passo della superficie magnetica

In figura e' mostrata la forma di una linea di campo all'interno della separatrice: essa si avvolge ad elica attorno alla superficie magnetica, la quale, a sua volta, ha una forma elicoidale attorno all'asse del cilindro, ma con un passo più lungo. La linea forma un'elica con un 'passo' pari a  $L/\ell$  ( $L$  è il 'passo' degli avvolgimenti elicoidali esterni) e questa elica ha una proiezione ellittica sul piano perpendicolare al suo asse.

L'asse, a sua volta, è una linea elicoidale con un 'passo' molto più lungo ed una proiezione circolare sul piano perpendicolare all'asse del cilindro.

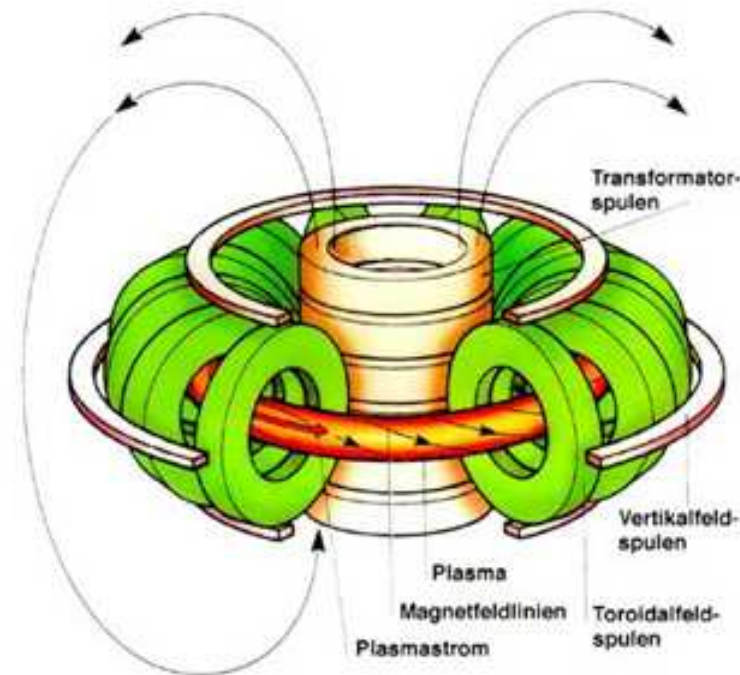
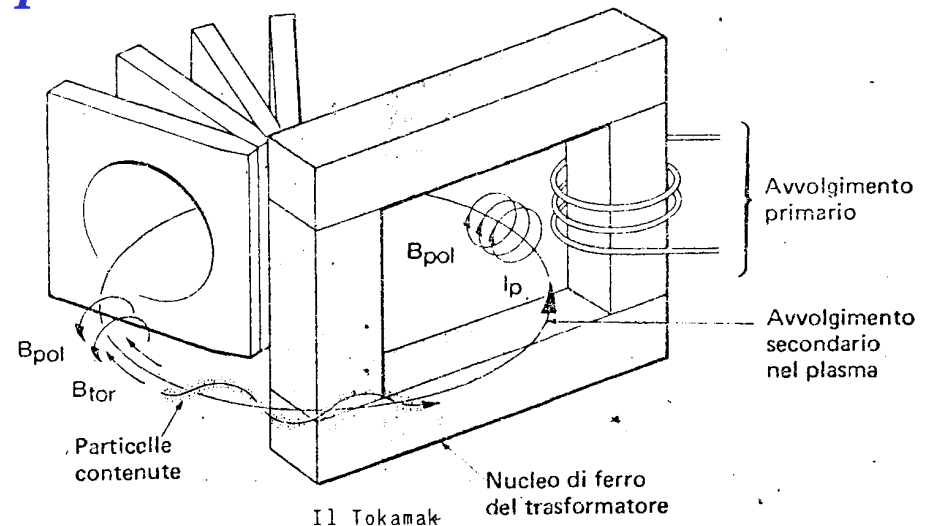
Dai punto di vista realizzavo la precisione di posizionamento dei conduttori elicoidali dello Stellarator deve essere molto elevata. Risulta che le tolleranze ammissibili dei parametri dei magneti come il passo degli avvolgimenti, la distanza dei conduttori, il diametro degli avvolgimenti, etc., risulta essere dell'ordine di 0,1%. Questo fa sì che la costruzione di un sistema Stellarator di grandi dimensioni pone spesso importanti problemi meccanici



## Sistemi toroidali tipo “tokamak”

Una struttura magnetica di confinamento a geometria toroidale molto piu' semplice dello stellarator e' il tokamak

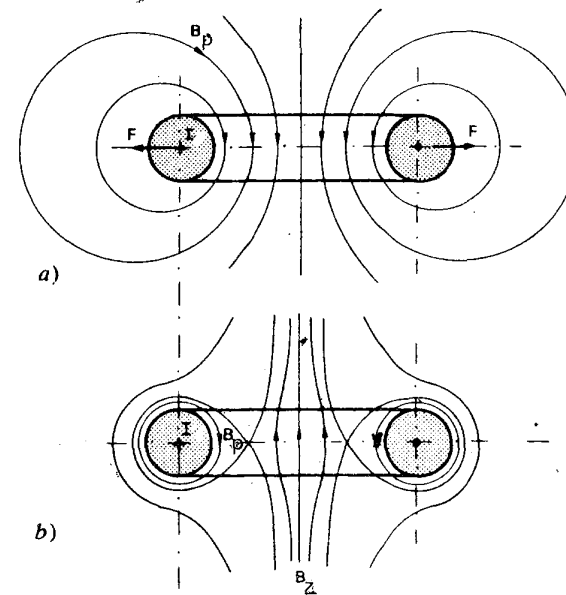
Il campo magnetico toroidale ( $B_T$ ) viene ancora prodotto mediante un solenoide toroidale avvolto attorno alla camera da vuoto; il campo magnetico poloidale ( $B_p$ ) è prodotto da una forte corrente toroidale ( $I_p$ ) che viene fatta passare attraverso il plasma stesso. Questa corrente e' prodotta induttivamente utilizzando avvolgimenti poloidali accoppiati all' anello di plasma (e a volte concatenati ad un nucleo magnetico). Il plasma funge da 'secondario': mandando un forte impulso di corrente nel 'primario' del trasformatore, il plasma viene percorso da una corrente indotta, che produce il campo magnetico poloidale



## Sistemi toroidali tipo “tokamak”

Un fatto importante è che la corrente toroidale  $I$  produce anche il riscaldamento del plasma per effetto Joule ('riscaldamento ohmico') con potenza specifica  $P = \eta J^2$ , dove  $\eta$  è la resistività del plasma .

La configurazione non sarebbe in equilibrio, perché la corrente toroidale del plasma produce un campo poloidale più intenso nella parte interna per cui l'anello di plasma tenderebbe ad espandersi verso l'esterno. Per ovviare a questo inconveniente, vengono aggiunti alla macchina altri avvolgimenti in grado di produrre un campo "parallelo all'asse principale  $z$  del toro ( $B_z$ ) detto 'campo verticale': questo campo si sottrae a  $B_p$  nella



regione interna e si somma in quella esterna all'anello, in maniera che il campo risultante sia costante su tutta la superficie di contorno del toro. Dosando opportunamente le correnti nei vari avvolgimenti si ottiene così una configurazione di equilibrio toroidale.

Mentre il campo dello stellarator non ha simmetria assiale attorno all'asse principale del toro (campo 'non assi-simmetrico'), il Tokamak è un importante esempio di configurazione 'assi-simmetrica', ciò che contribuisce a renderlo più semplice da costruire, rispetto allo stellarator.

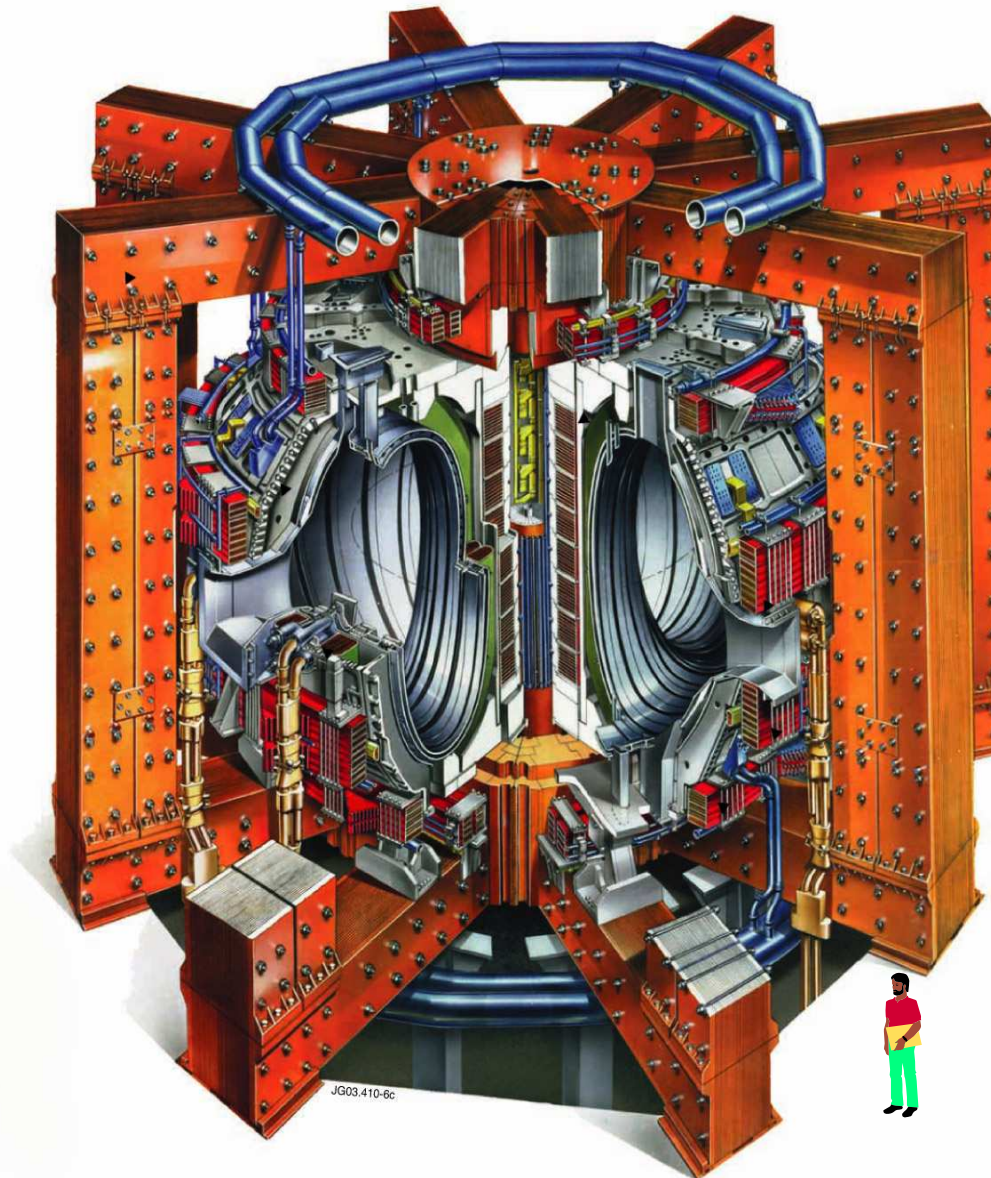
Il Tokamak, può funzionare solo ad impulsi perché il suo equilibrio dipende dalla presenza della corrente indotta mediante un effetto di trasformatore, mentre lo stellarator può funzionare in modo continuo, perché non necessita di una corrente interna per il suo equilibrio.

## *JET: il Tokamak Europeo*

plasma  
volume

magn.  
field.

plasma  
current



- 60 m<sup>3</sup>
- up to 4 T
- up to 5 MA



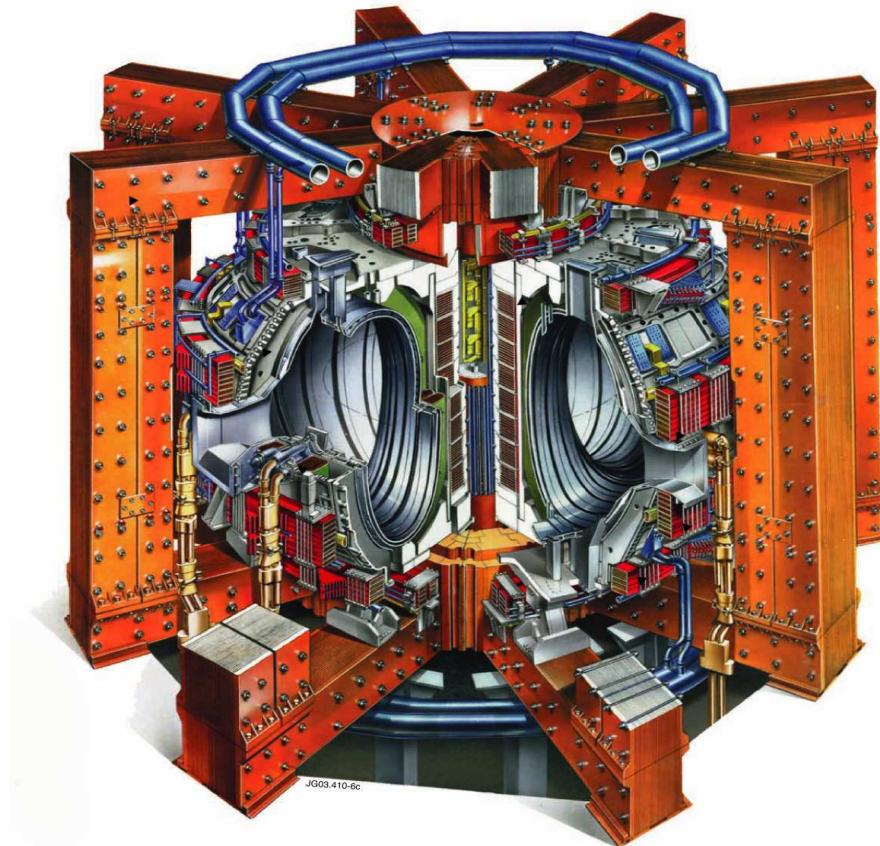
## *Un tokamak esistente : il Joint European Torus*

Il tokamak JET e' stato costruito tra il 1980 e il 1983 presso il Centro nucleare dell' UKAEA di Culham (Oxford, UK).

Il progetto e' un Joint Undertaking della Unione Europea, con una partecipazione diretta di tutti i Paesi Membri della comunita'.

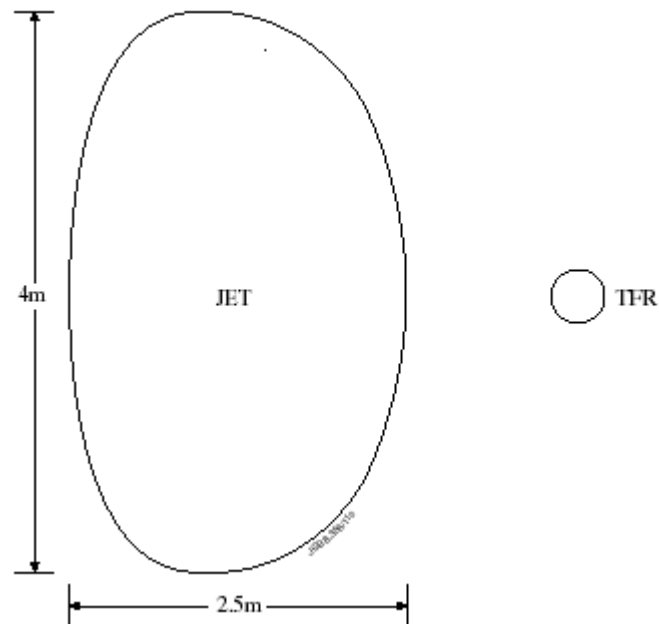
Il tokamak e' il piu' grande del mondo ed ha raggiunto le prestazioni piu' avanzate ( $Q \sim 1$ ).

L' impresa comune e' terminata nel 2000, ma il tokamak e' ancora in operazione, sotto la gestione dell' UKAEA ed e' utilizzato per provare scenari di operazione e dimostrare tecnologie per il reattore ITER



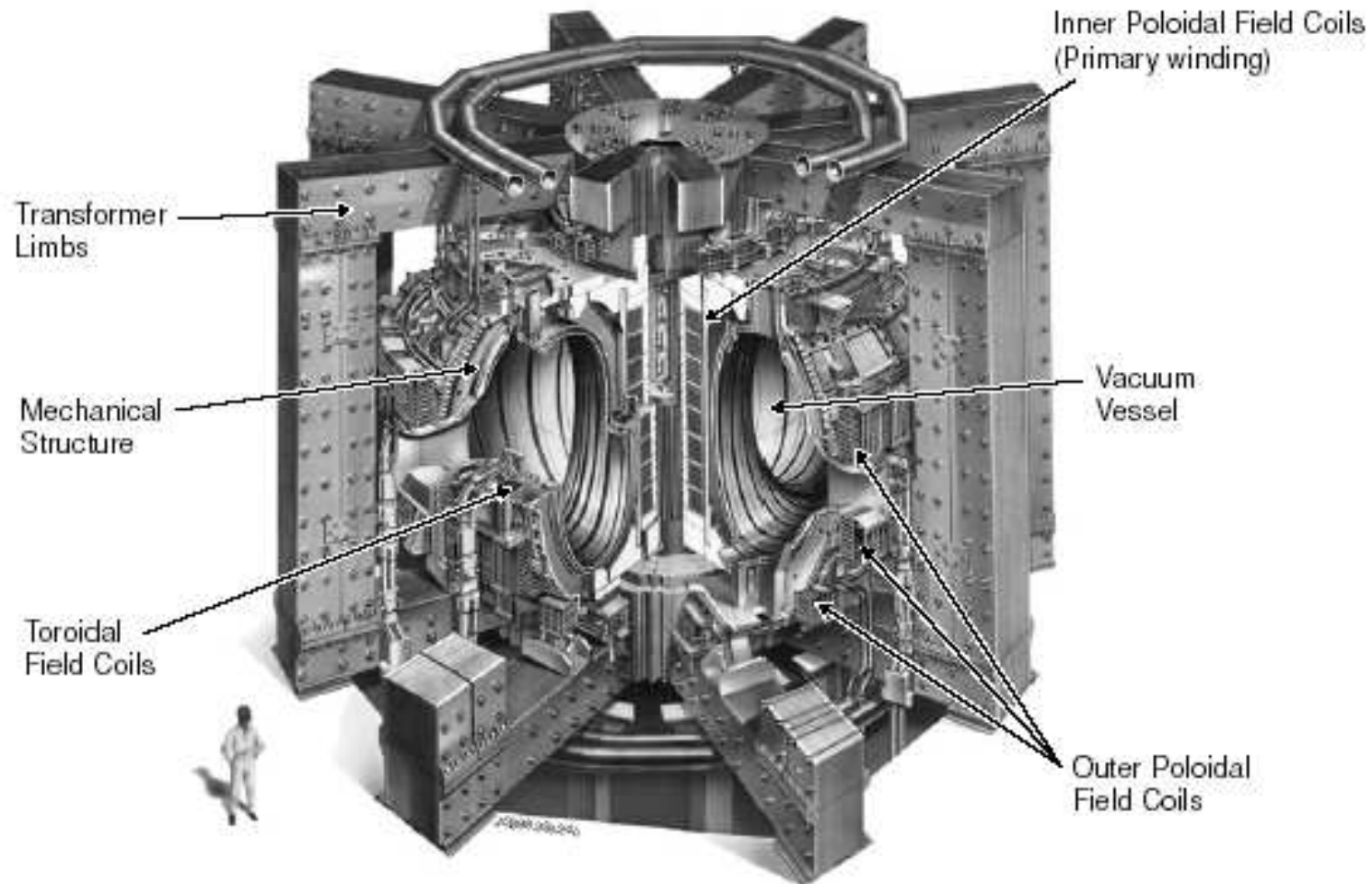
## Parametri del JET

Table I: Principal JET Parameters.



| Parameter                               | Value |
|---|-------|
| Plasma minor radius (horizontally), $a$ | 1.25m |
| Plasma minor radius (vertically), $b$   | 2.10m |
| Plasma Major radius, $R_0$              | 2.96m |
| Plasma aspect ratio, $R_0/a$            | 2.37  |
| Plasma elongation ratio, $e=b/a$        | 1.68  |
| Flat top pulse length                   | 10s   |
| Toroidal magnetic field (plasma centre) | 3.45T |
| Plasma current, circular plasma         | 3.2MA |
| D shaped plasma                         | 4.8MA |
| Volt-seconds available                  | 34Vs  |
| Toroidal field peak power               | 380MW |
| Poloidal field peak power               | 300MW |
| Additional heating power (in plasma)    | 25MW  |
| Weight of vacuum vessel                 | 108t  |
| Weight of toroidal field coils          | 384t  |
| Weight of iron core                     | 2800t |

## *Componenti principali del JET*





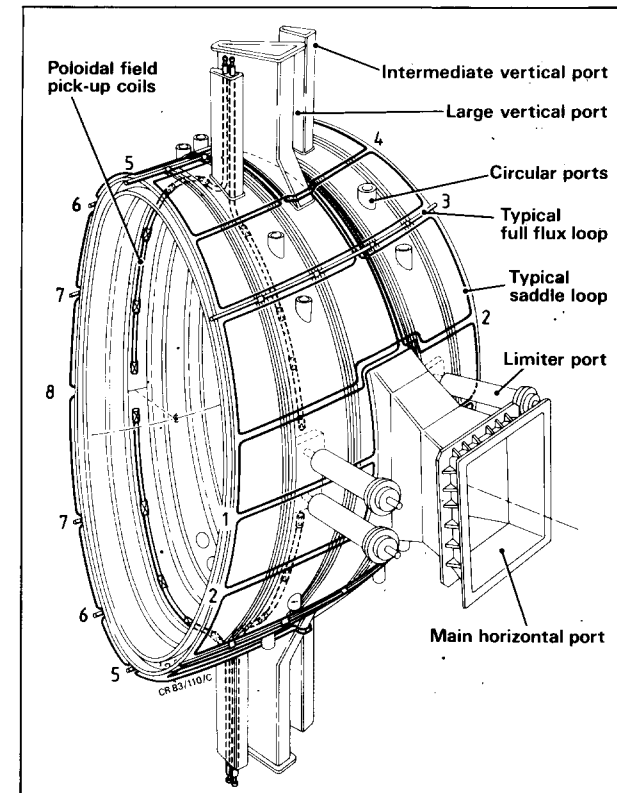
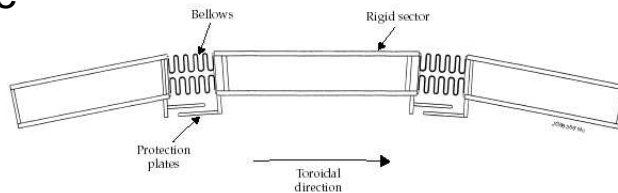
## Camera a vuoto

La camera a vuoto e' in INCONEL; una lega di SS e Ni e ad alta resistenza strutturale

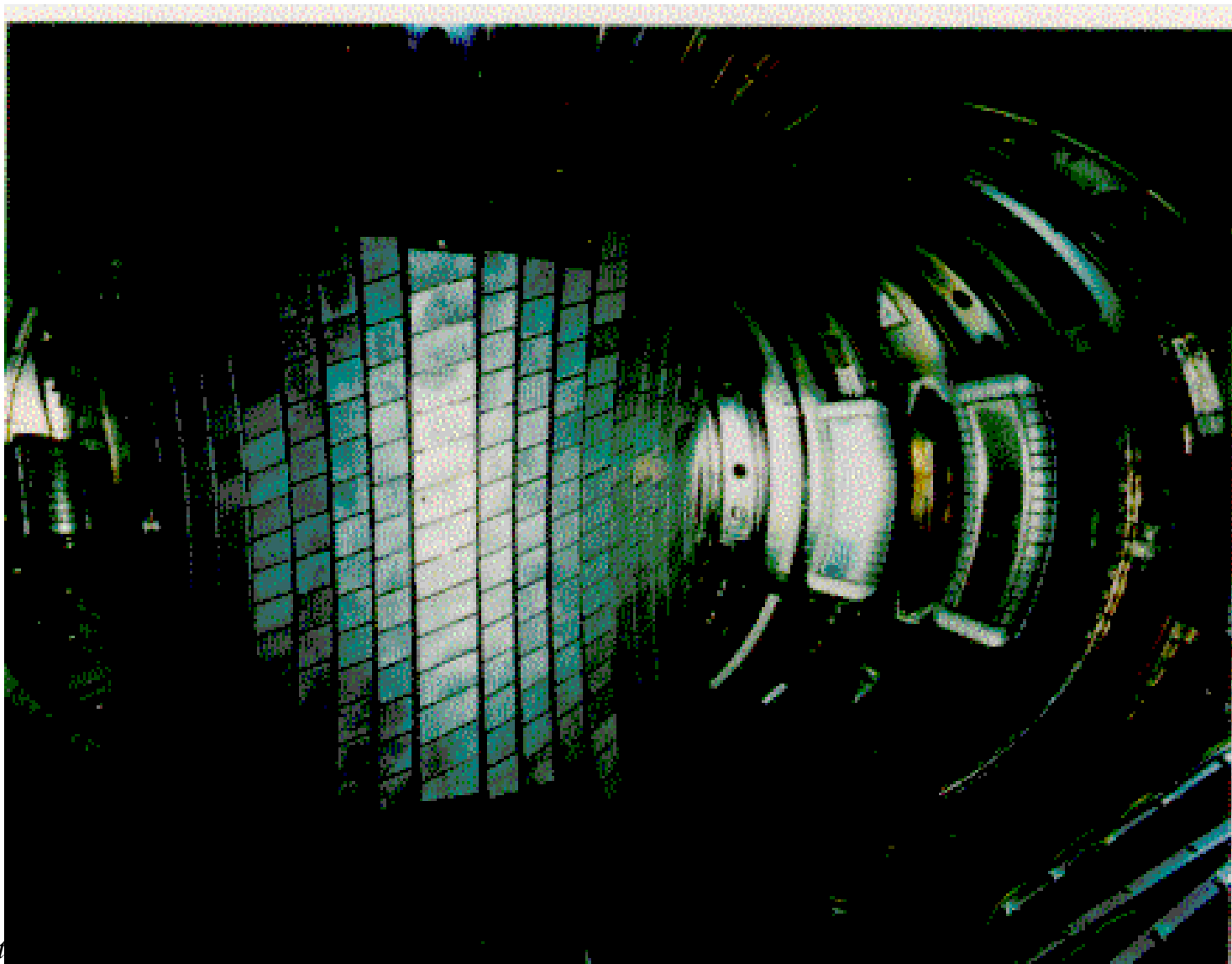
E' composto da un' alternanza di 32 settori rigidi a doppia parete e soffietti metallici che aumentano la resistivita' toroidale della camera.

Ci sono 18 porte equatoriali di accesso al plasma) e 36 verticali

Nella camera e' creato un alto vuoto ( $p < 10^{-8}$  torr ) da pompe turbo molecolari ( $10^4$  l/s). Tecniche di ultravacuo (baking) e di condizionamento delle pareti (Discharge cleaning) sono applicate mediante circolazione di  $\text{CO}_2$  a  $350^\circ\text{C}$  nella doppia parete



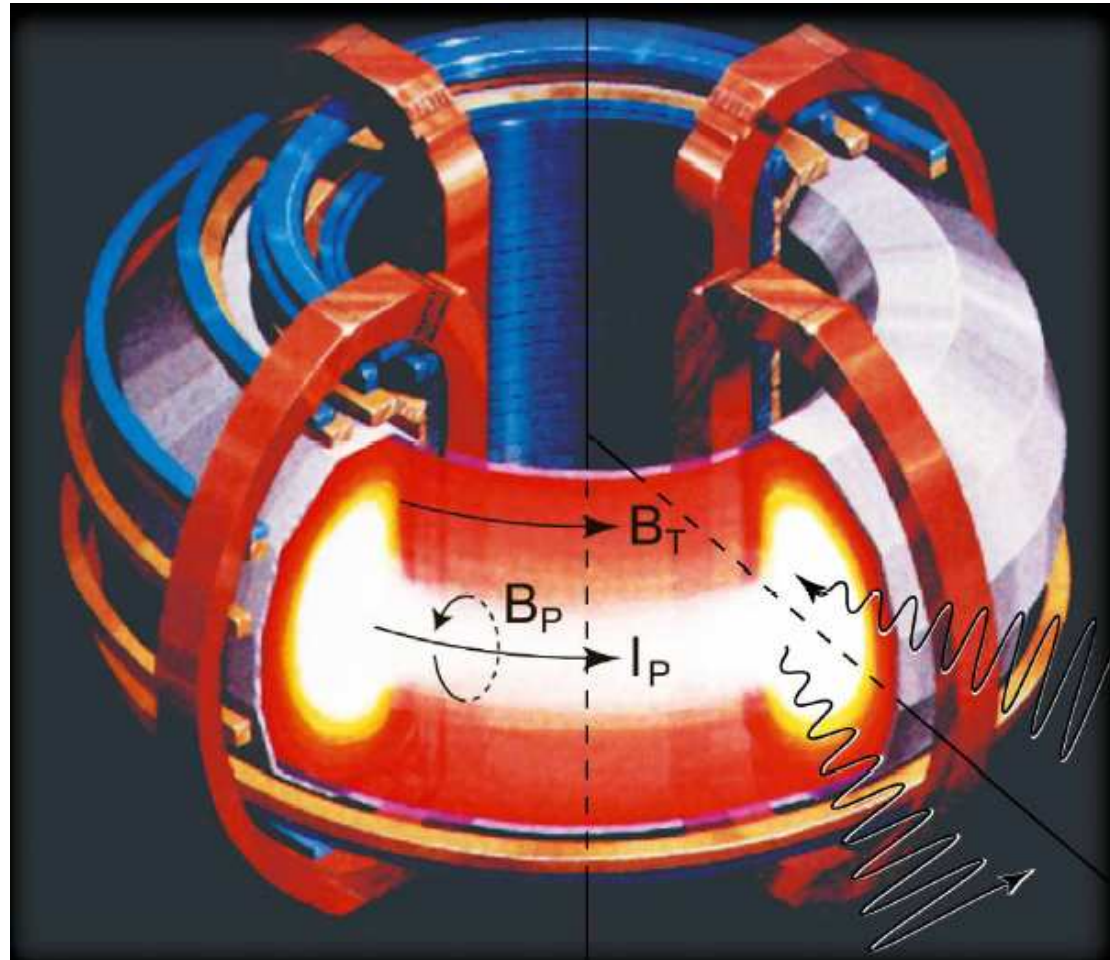
## *Interno della camera a vuoto di JET*



## *Ottante di camera a vuoto in fase di montaggio*



## *Sistema magnetico Tokamak*

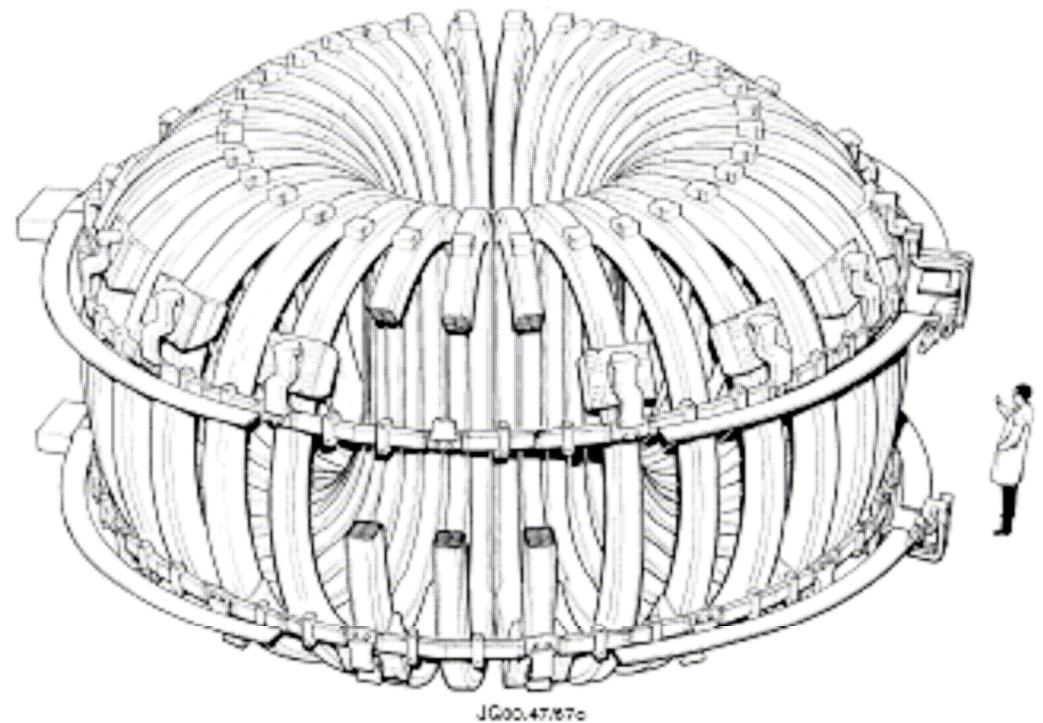


Sistema di 32 bobine in rame raffreddato ad acqua.

La forma a allungata aumenta lo spazio disponibile al plasma e provoca sulla bobina sforzi solo di tensione.

$B_0 = 3.5\text{T}$  a  $I_{\text{max}} = 40\text{ kA}$

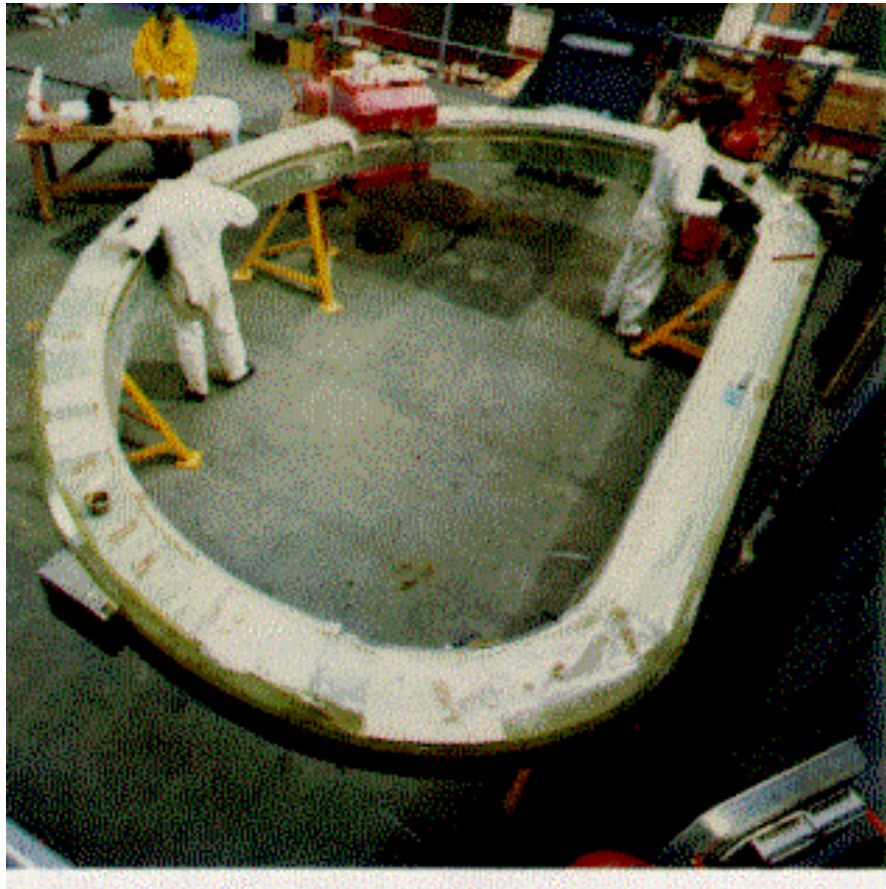
Gli avvolgimenti di rame trasferiscono gli sforzi elettrodinamici ad una struttura metallica in acciaio



*Figure 5.3. The toroidal field coil system.*



## *Bobina toroidale in costruzione*



## *Sistema di avvolgimenti poloidale*

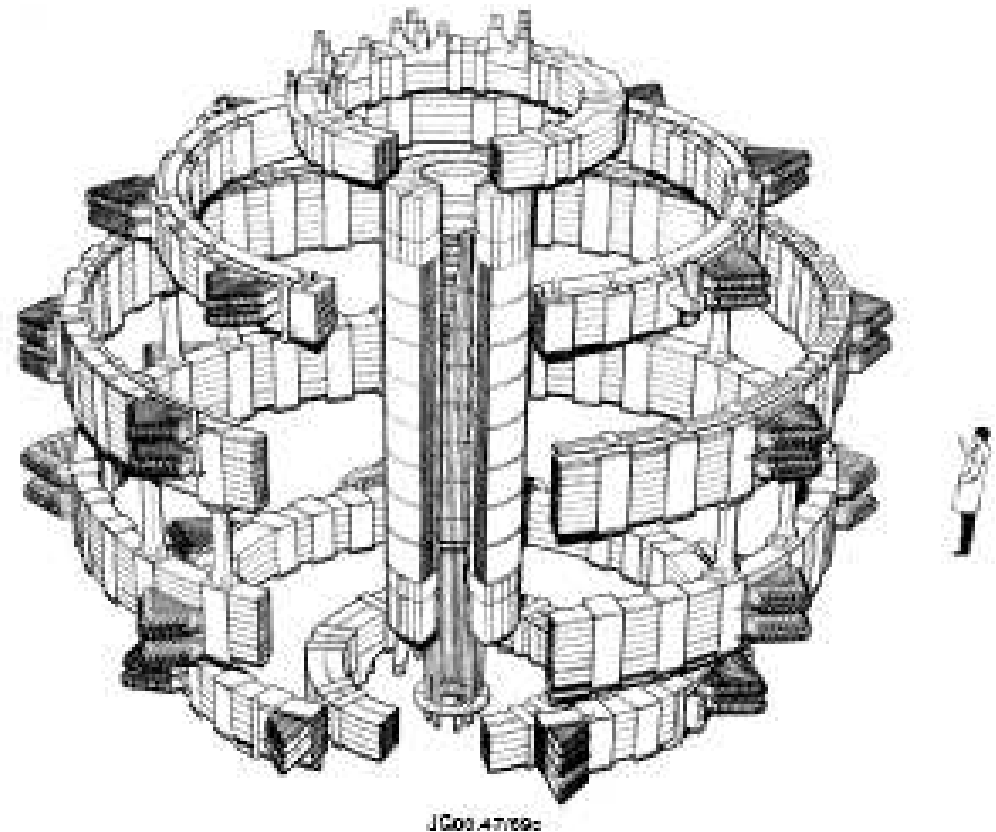
Il sistema di avvolgimenti poloidali e' il piu' complesso del sistema perche' deve

- indurre la corrente nel plasma
- Fornire il campo verticale di equilibrio

Il solenoide centrale fornisce una variazione di flusso di 47 Vs

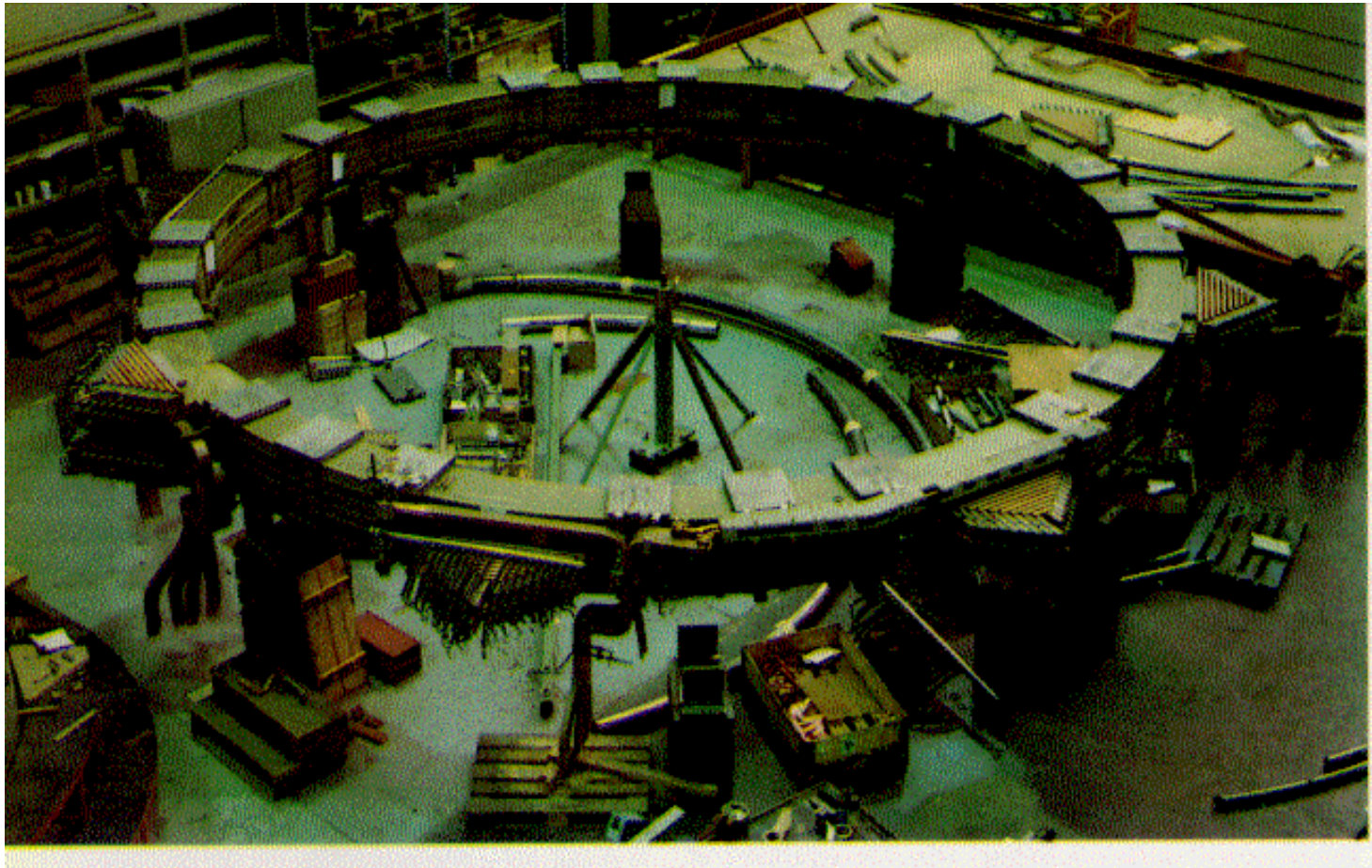
Le bobine esterne producono campi di controllo per la stabilit  macroscopica dell' equilibrio del plasma

E' alimentato da un set di alimentatori di corrente controllabili



*Figure 5.5. The poloidal field coil system.*

## *bobina poloidale in fase di costruzione*



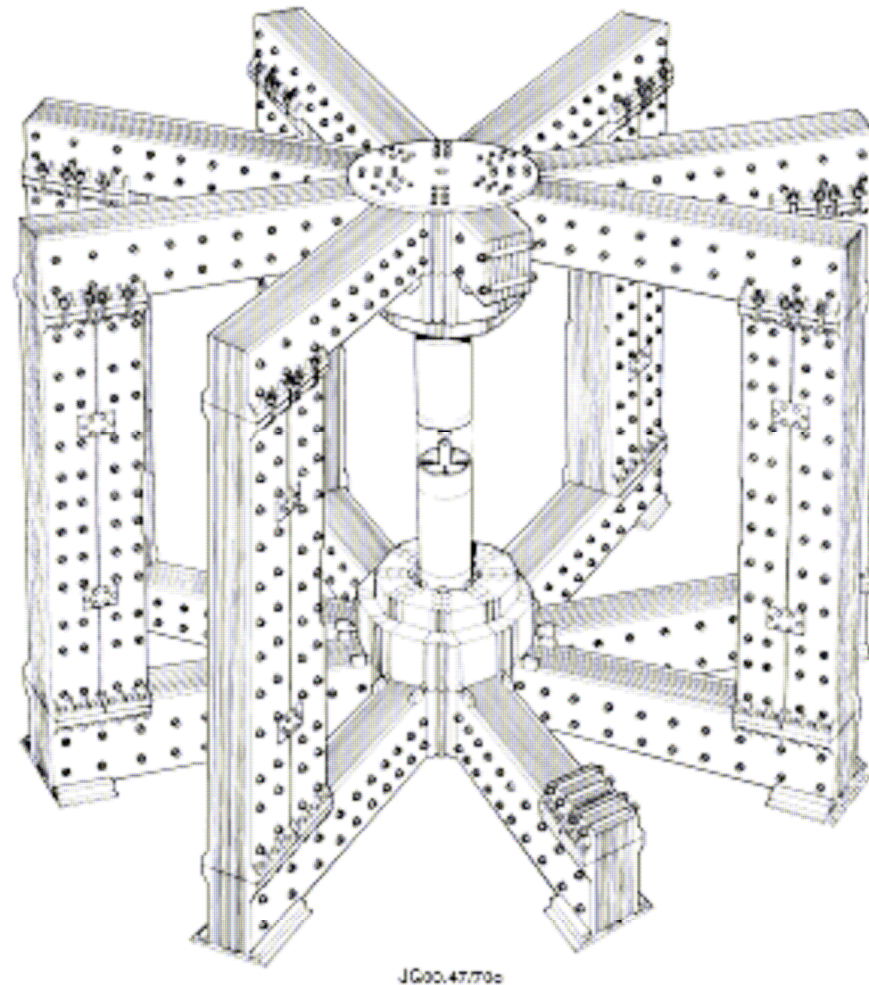


## *Nucleo in laminati di ferro del trasformatore poloidale*

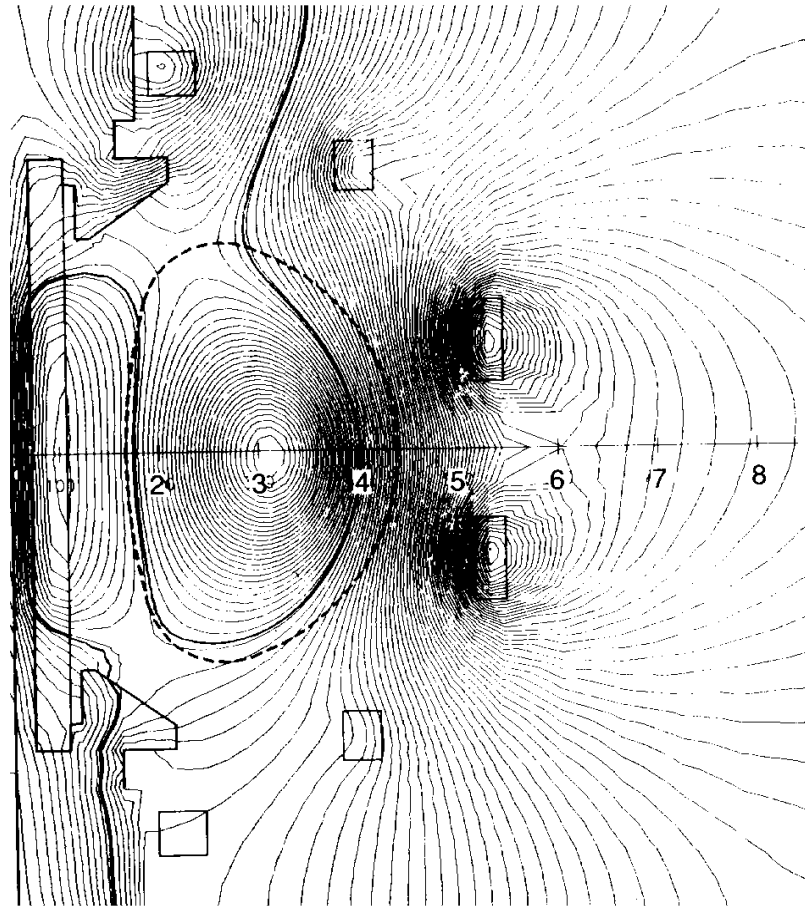
Il nucleo di ferro serve ad aumentare l' accoppiamento induttivo tra circuito primario e la colonna di plasma

E' costruito con pacchi di lamelle di ferro per minimizzare le correnti di Foucault

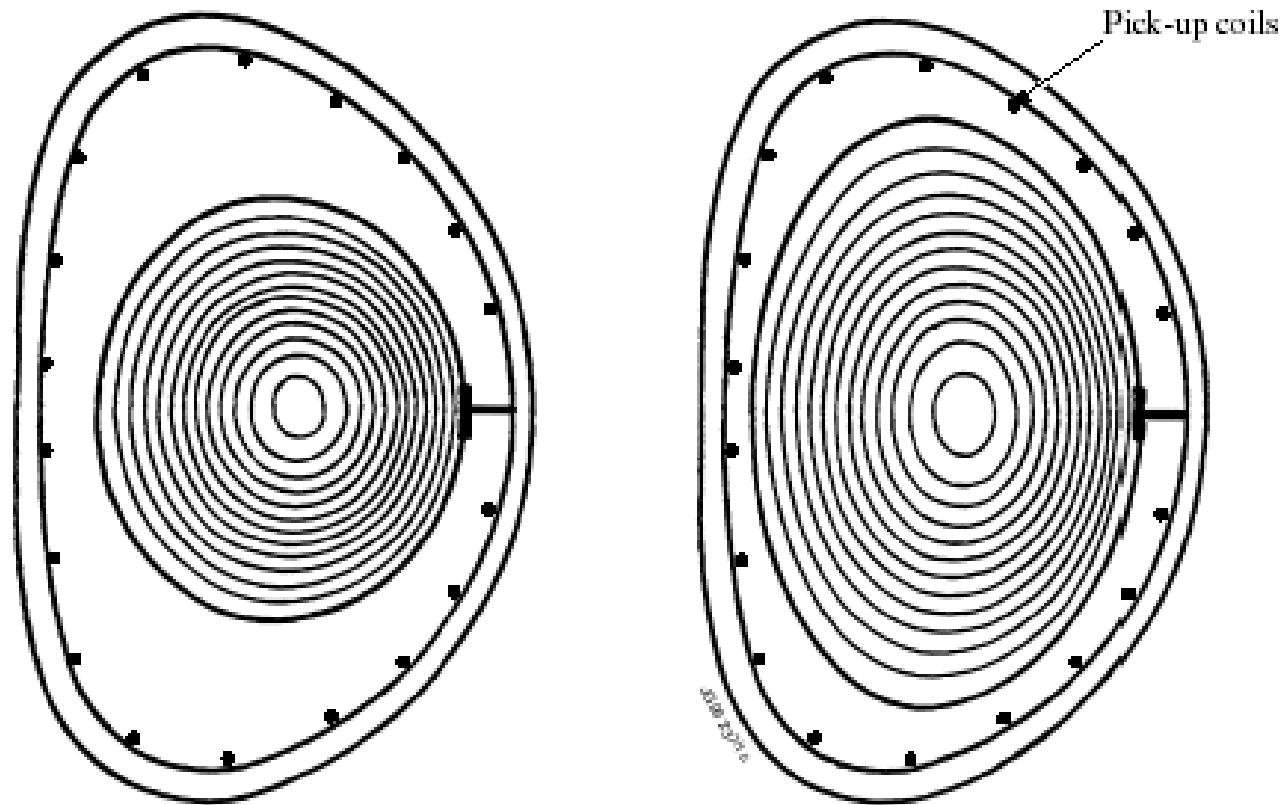
In sistemi di piu' grandi dimensioni il peso del nucleo e' cosi' elevato da diventare proibitivo ed e' stato sostituito da un trasformatore in aria



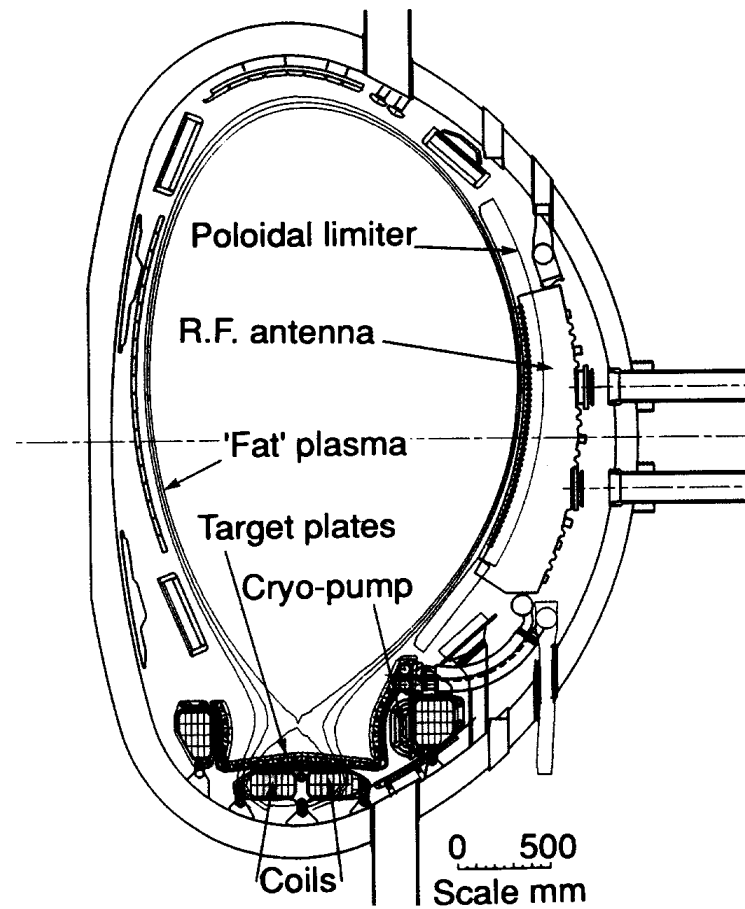
## *Mappa di linee di forza del sistema magnetico toroidale*



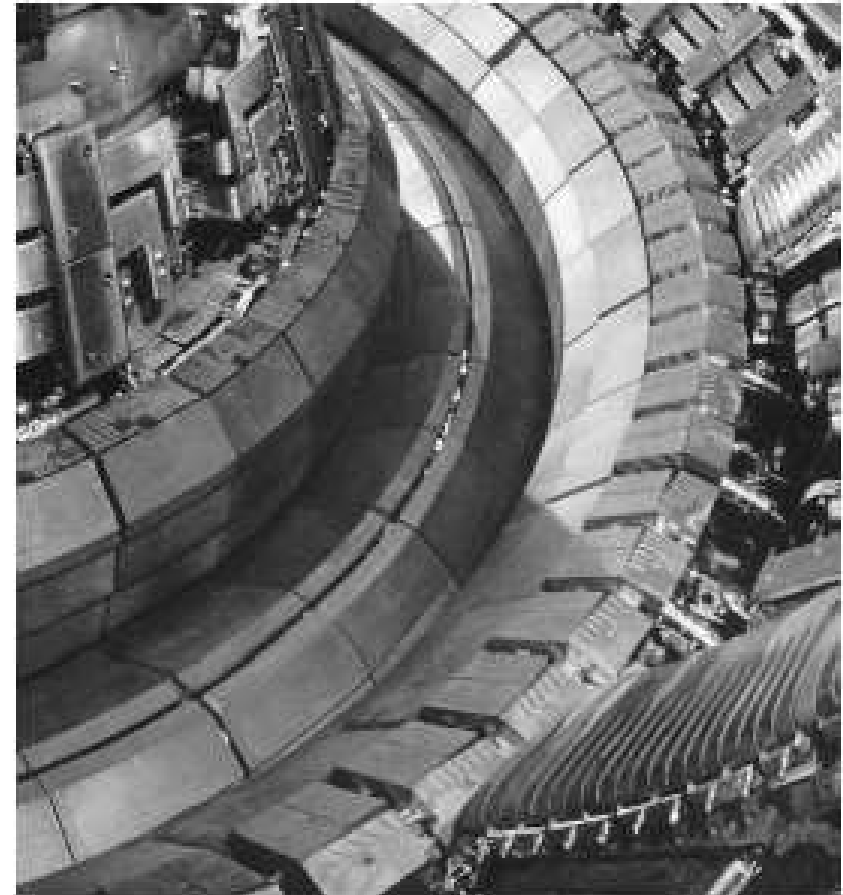
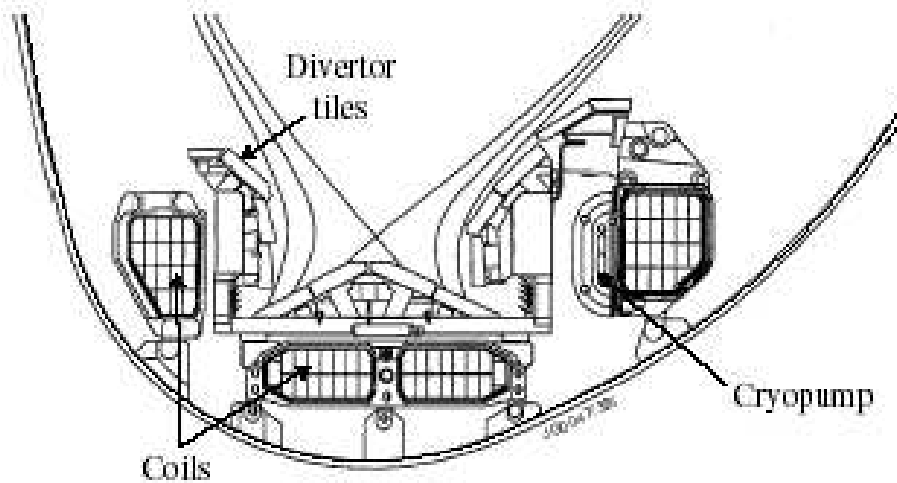
## *Superfici magnetiche del plasma*



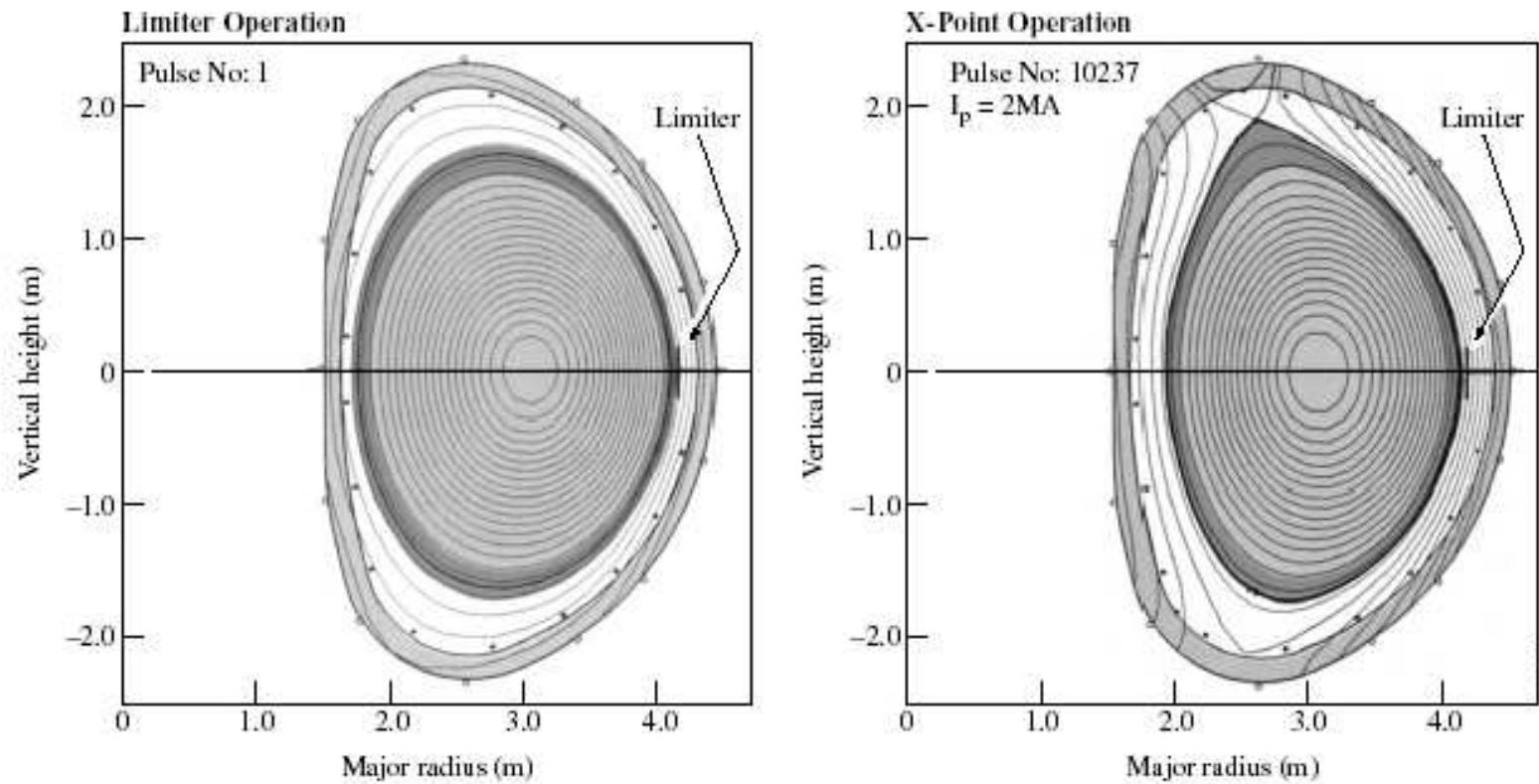
## *Struttura magnetica del divertore*



## *Struttura del Divertore*



## *Superfici magnetiche con superfici separatrici*



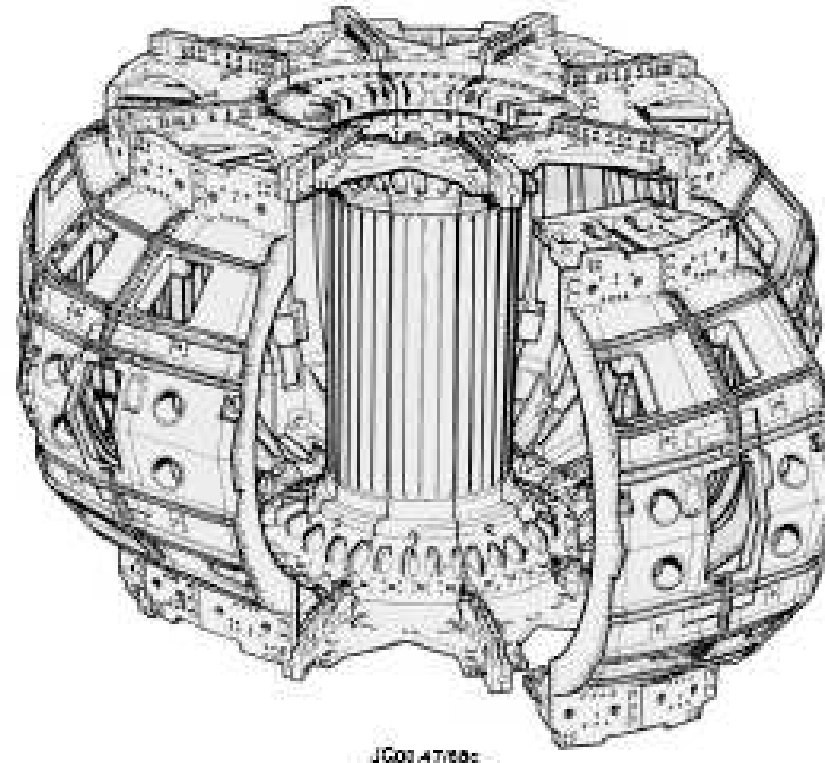
*Fig. 11.3 Showing the modification of the magnetic geometry with the introduction of an X-point.*



## *Interazione tra plasma e pareti nel divertore*



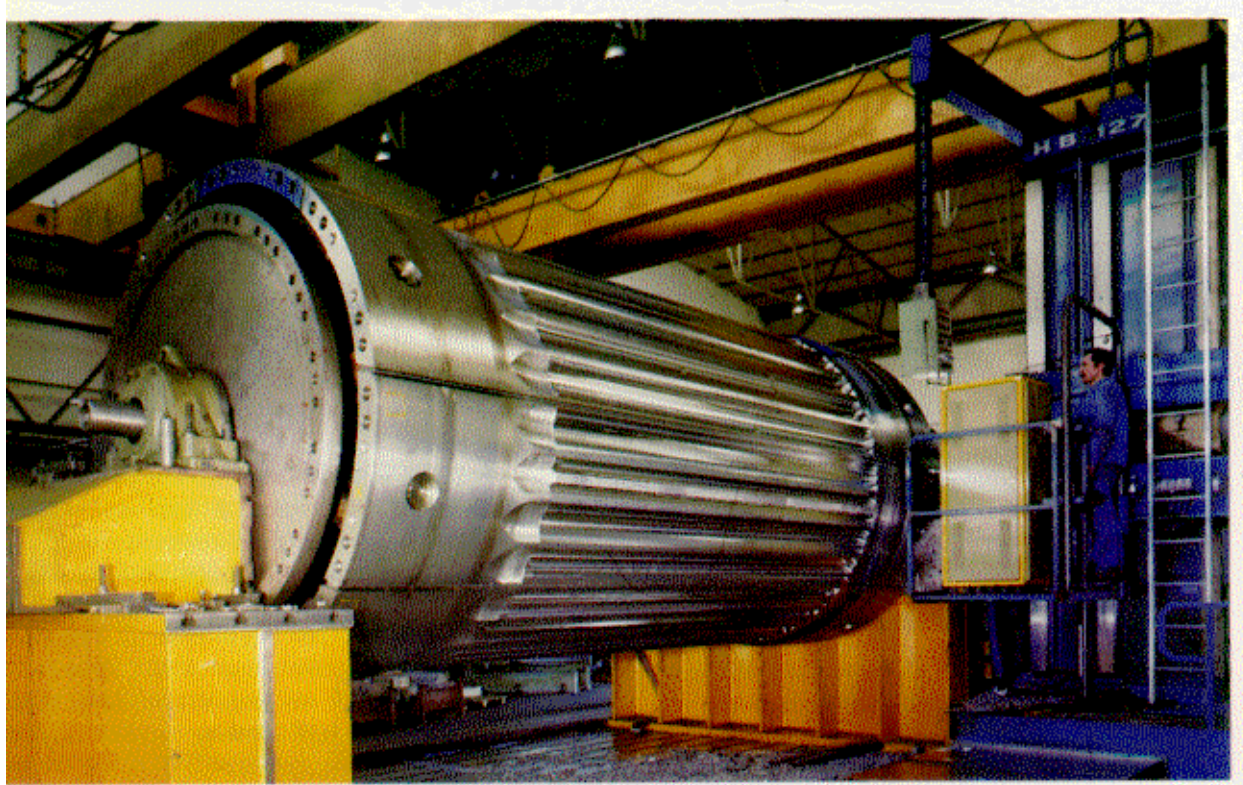
## *Struttura meccanica*



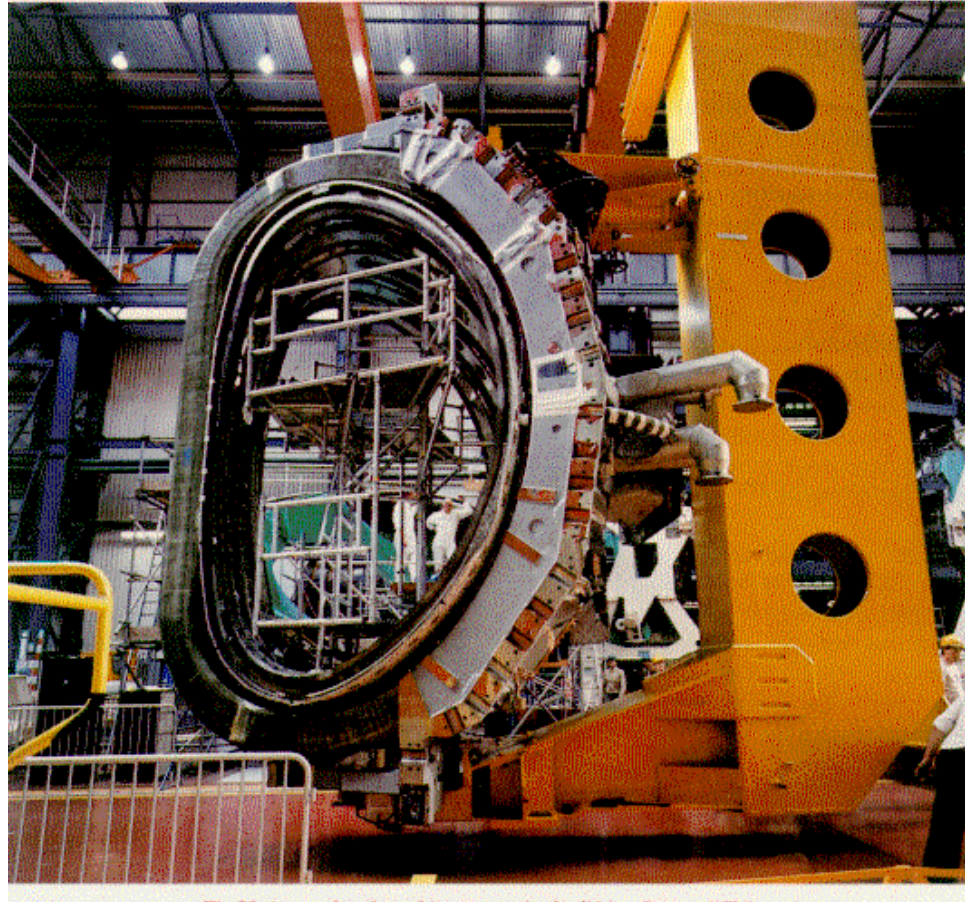
*Figure 5.4. The mechanical structure which supports the toroidal field coils a, magnetic twisting force.*



## *Colonna centrale della struttura meccanica*

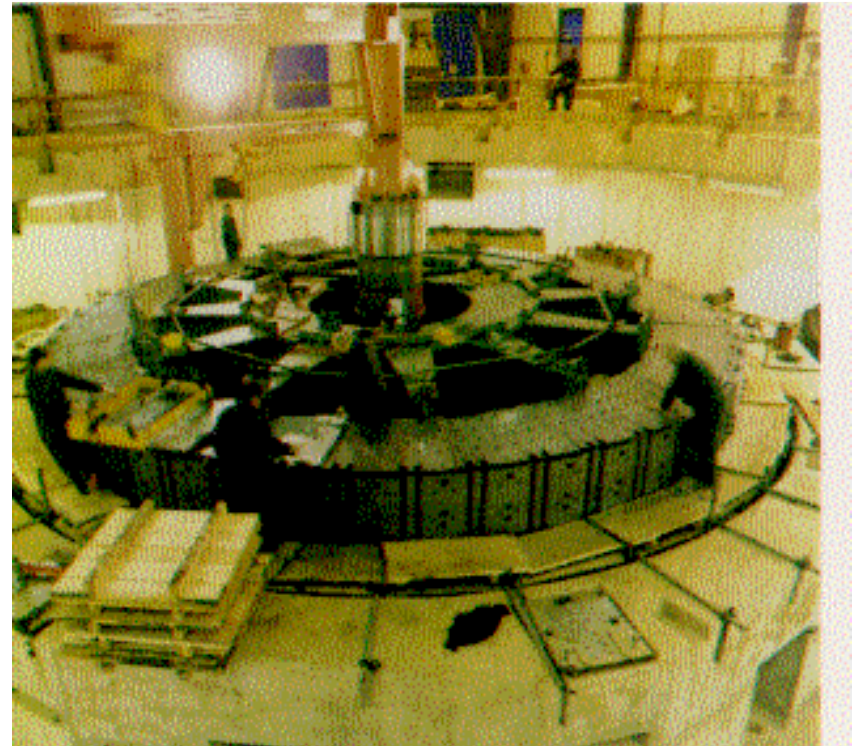
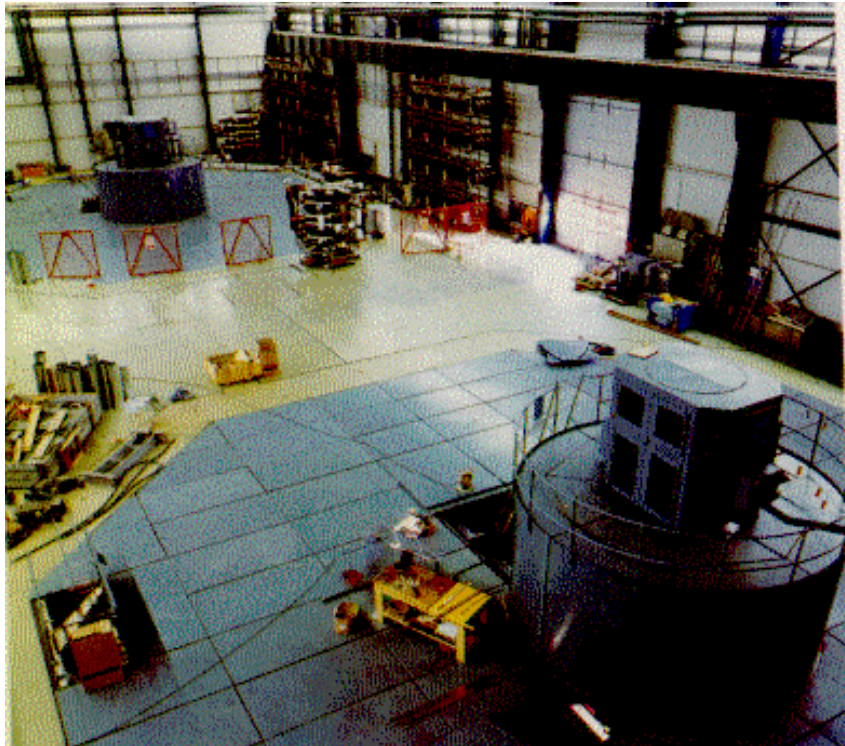


## *Assemblaggio del toro*





## *Alternatore ad accumulazione di energia ( $B_T$ )*



## *Sottostazione di alimentazione del sistema poloidale*





## *Sistema di conversione controllata AC/DC*

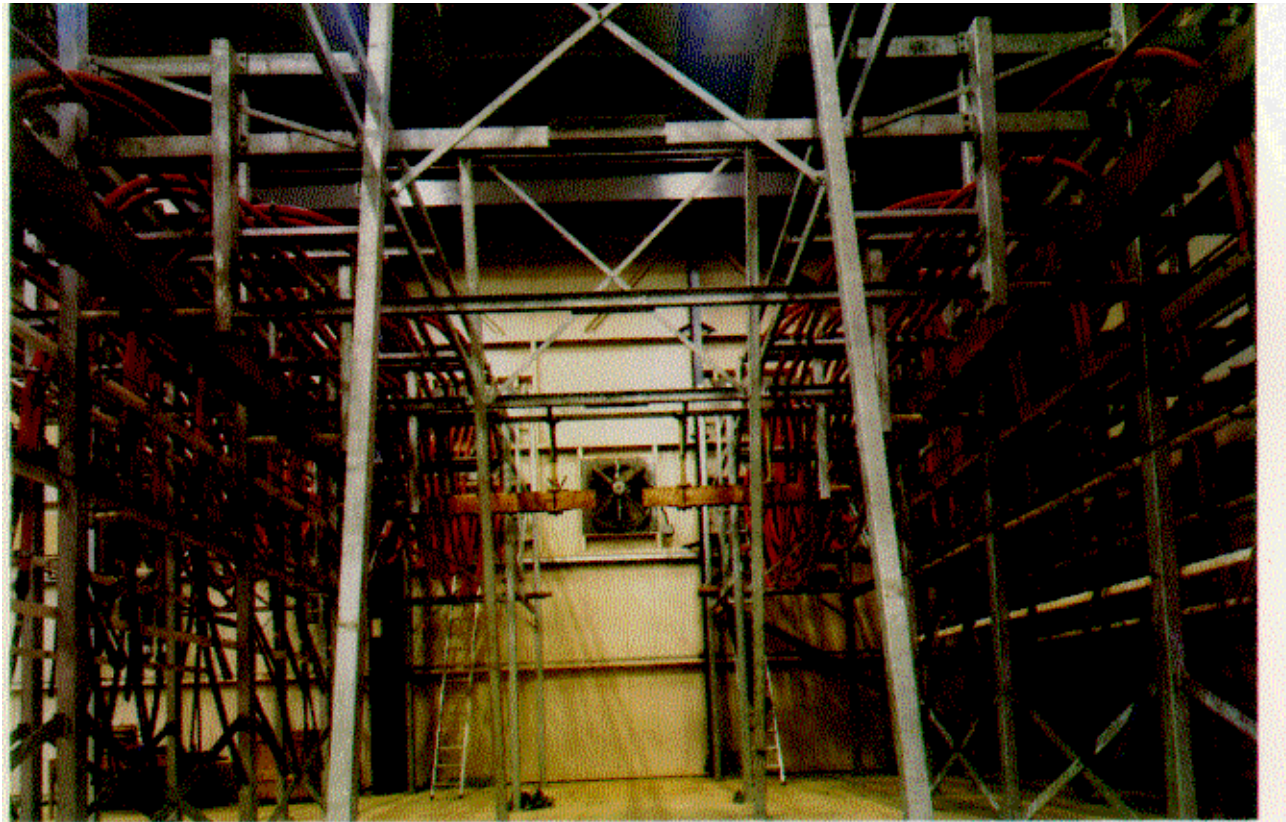


Fig.40 Installation in the J4 building of the incoming AC cables, DC busbars and supports in readiness for the rectifier stacks, at the end of 1981. The two transformers are to be installed outdoors. The share of the power to be delivered to the toroidal field coils will be 134 MW.



## *Interruttori di potenza*

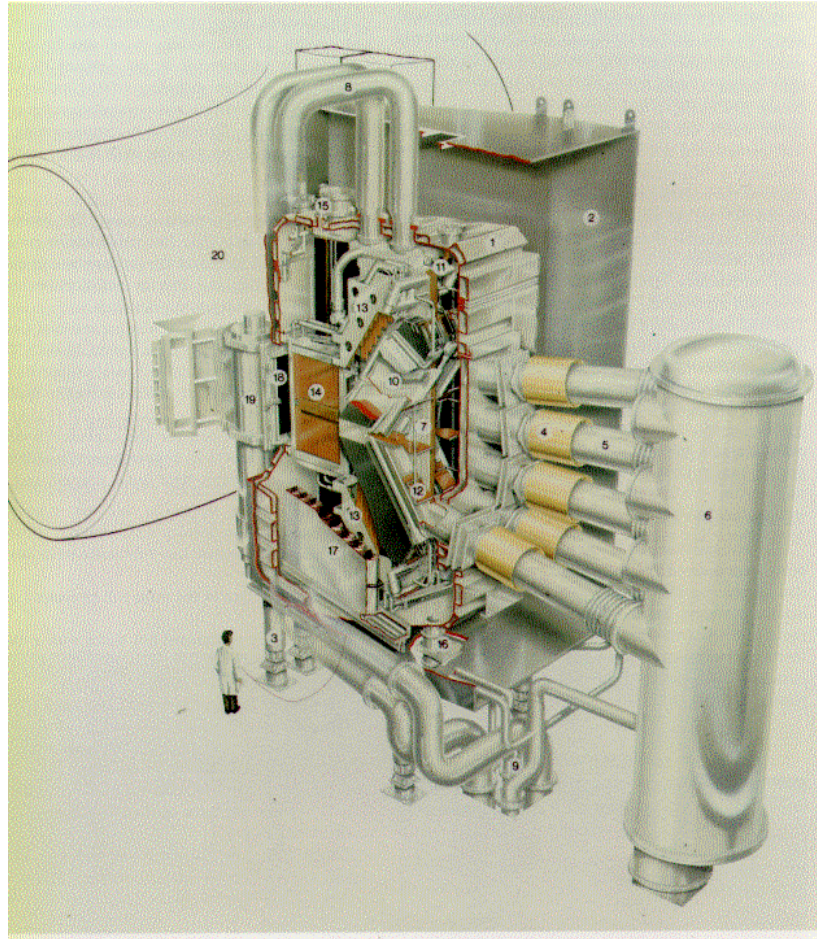


Fig.38 The 33 kV SF<sub>6</sub> circuit breakers of 1800 MVA breaking capability being installed in the J5 building, for direct connection of the JET pulsed AC/DC power supplies to the CEGB 400 kV supergrid via the 400 kV/

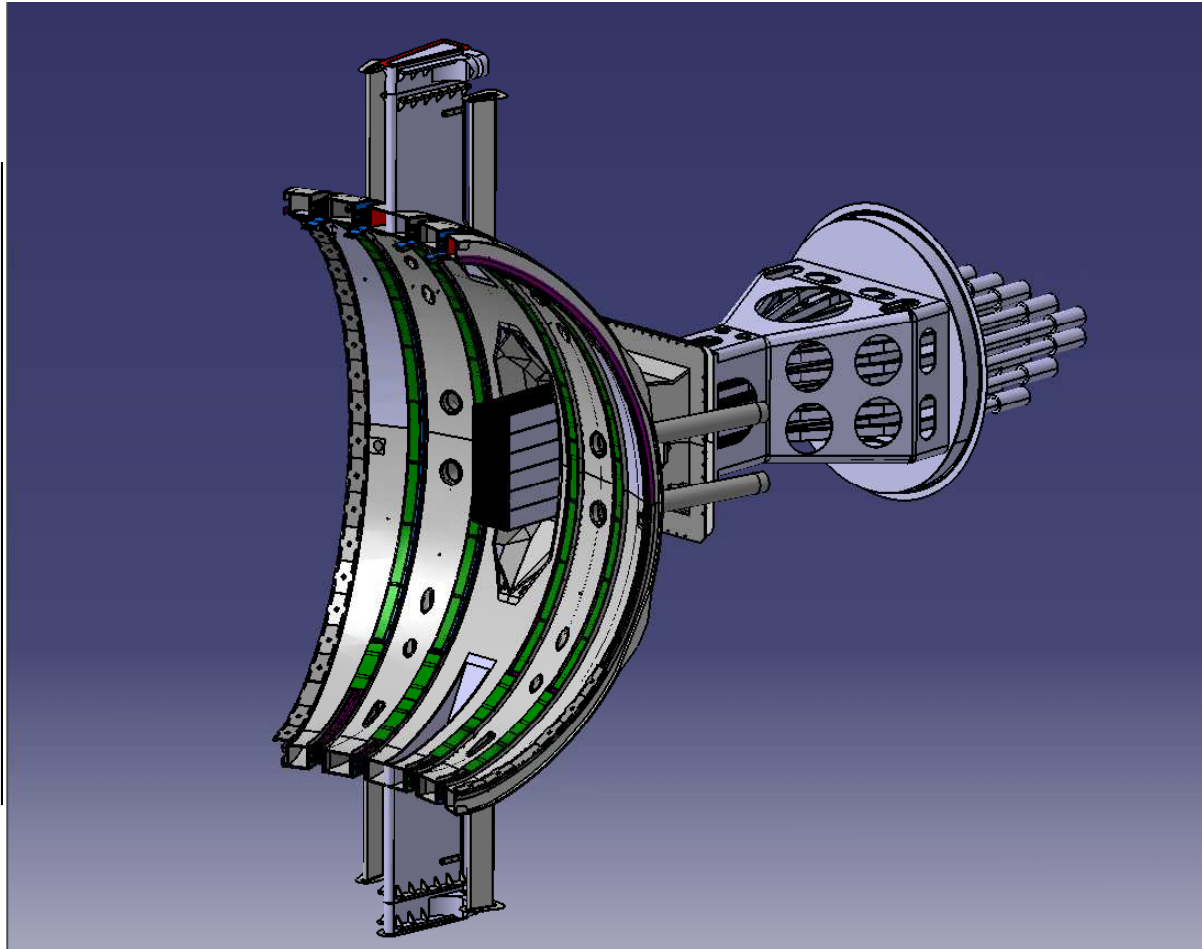
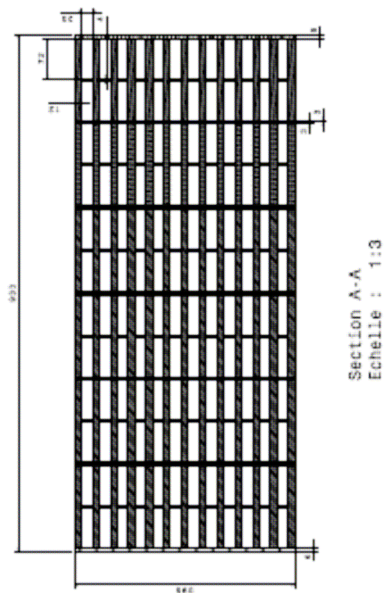
## *Sistema di riscaldamento alla frequenza ciclotronica ionica*



## *Sistema di riscaldamento a iniezione di particelle neutre*

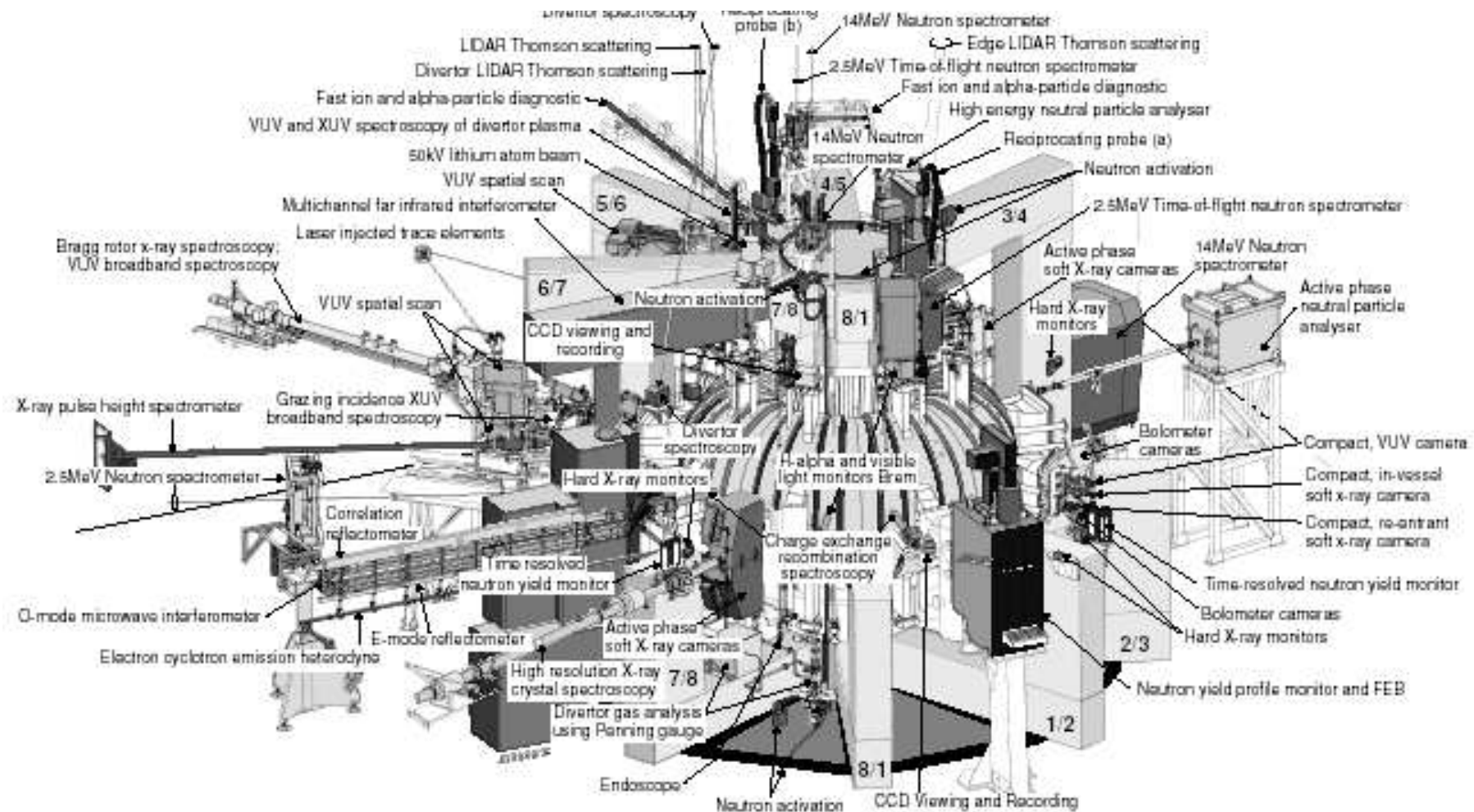


## *Sistema di generazione non induttiva di corrente (Lower Hybrid)*





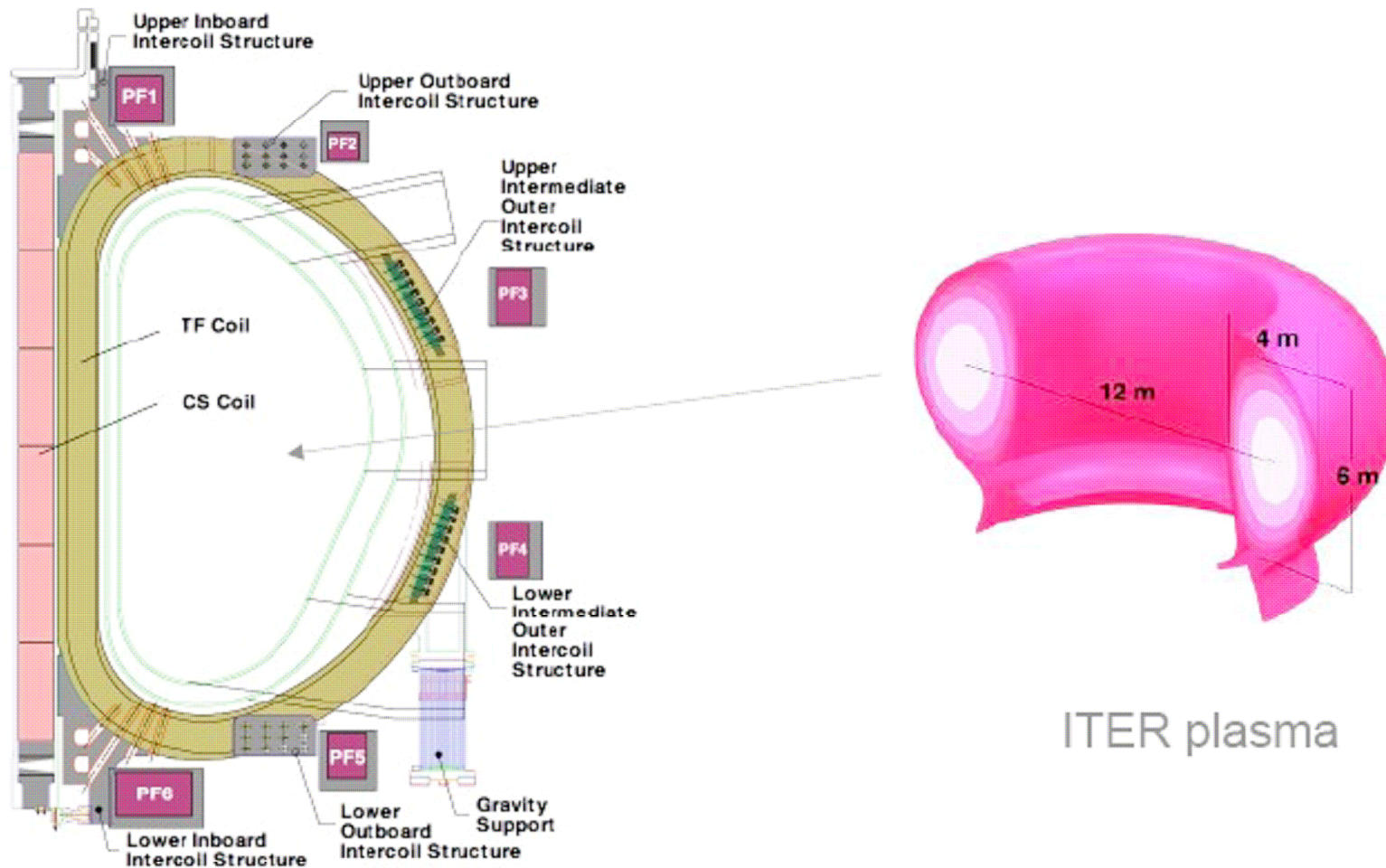
## *Sistemi di diagnostica e misura dei parametri fisici del plasma*



*Figure 5.10. Layout of the diagnostic systems.*



## *Il futuro : il reattore ITER*

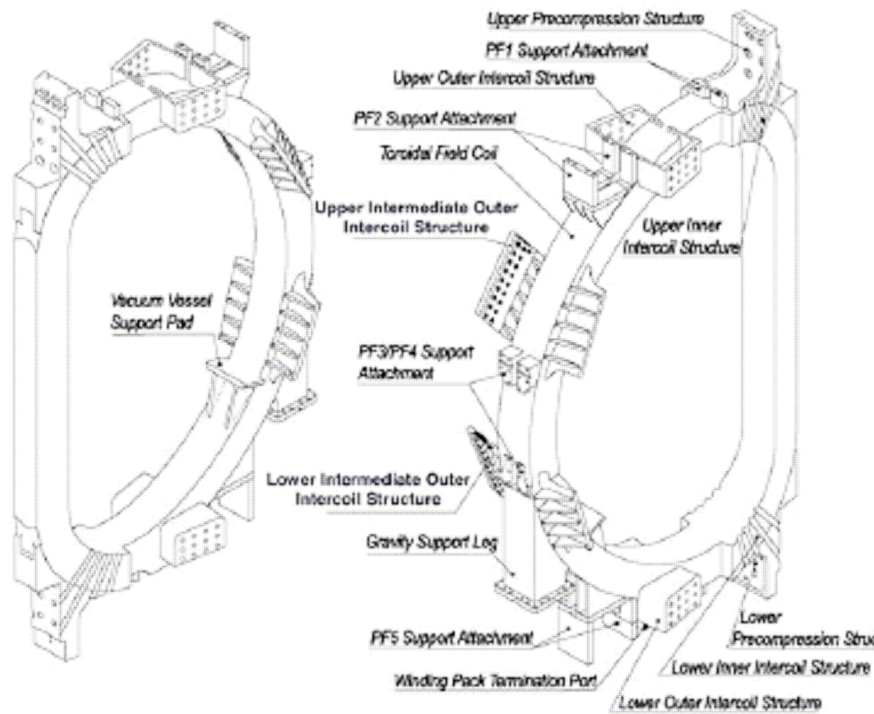


## Componenti principali del reattore ITER

| Weight of Major Core Components (approx)  |  |                |
|---|--|----------------|
| Component   | Cross Reference  | Approx Weight  |
| Cryostat Total  | Table 4.9-1  | 3300 t         |
| -Main vessel and Port Stubs<br>-Shielding (440 modules max 4.5 t) Table 4.3-1<br>-Port structures (excl. Port Plugs)<br>-54 Divertor Cassettes (SS,Cu,W,CFC,water) Table 4.4-2<br>-Shielding Water<br>-Supports<br>-blanket cooling manifolds and in-port pipes<br>Vacuum Vessel, Shielding, Divertor and Manifolds | 3144 t<br>1610 t<br>1781 t<br>678 t<br>236 t<br>160 t<br>140 t<br>7945 t | 7945 t         |
| Plug structures<br>Equatorial plugs (< 14x50t)<br>Upper plugs (< 18 x 20t)  | Table 4.7-1  | 700 t<br>360 t |
| Thermal Shields in Cryostat (80K) and all connections   | Table 4.12-1   | 820 t          |
| Blanket and VV cooling pipes<br>(supported by the VV and cryostat)  |  | 20 t (TBC)     |
| Cryopumps 10 x 5tons  |  | 50t            |
| Magnet systems<br>TF Toroidal Field Coils (18) 6300 t<br>PF Poloidal Field Coils (6) 2840 t<br>CC Correction Coils 80 t<br>CS Central Solenoid 930 t<br>TOTAL Magnet Systems  | Table 4.1-2<br>§ 4.1.2.6<br>§ 4.1.2.7<br>§ 4.1.2.5                       | 10150 t        |
| Magnet and Structure cooling feeders  |  | TBD            |
| <b>Total:</b><br><b>Cryostat + VV + Magnets</b><br>(excluding additional pipework and diagnostics)  |  | > 23350 t      |

*Note: Table links are "active". Use "click" on PDF, or "ctrl click" on MS Word*

## *Bobine toroidali*

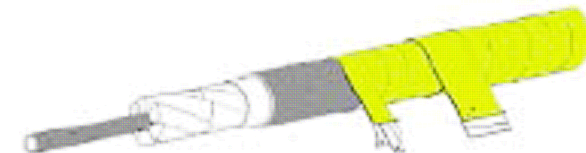


D\_22LV8R

In ITER il funzionamento sarà continuo ed i magneti toroidali devono fornire un campo magnetico stazionario

Si usano pertanto magneti superconduttori Ni-Ti e Ni-Sn raffreddati criogenicamente

La tecnica di costruzione degli avvolgimenti è molto complessa



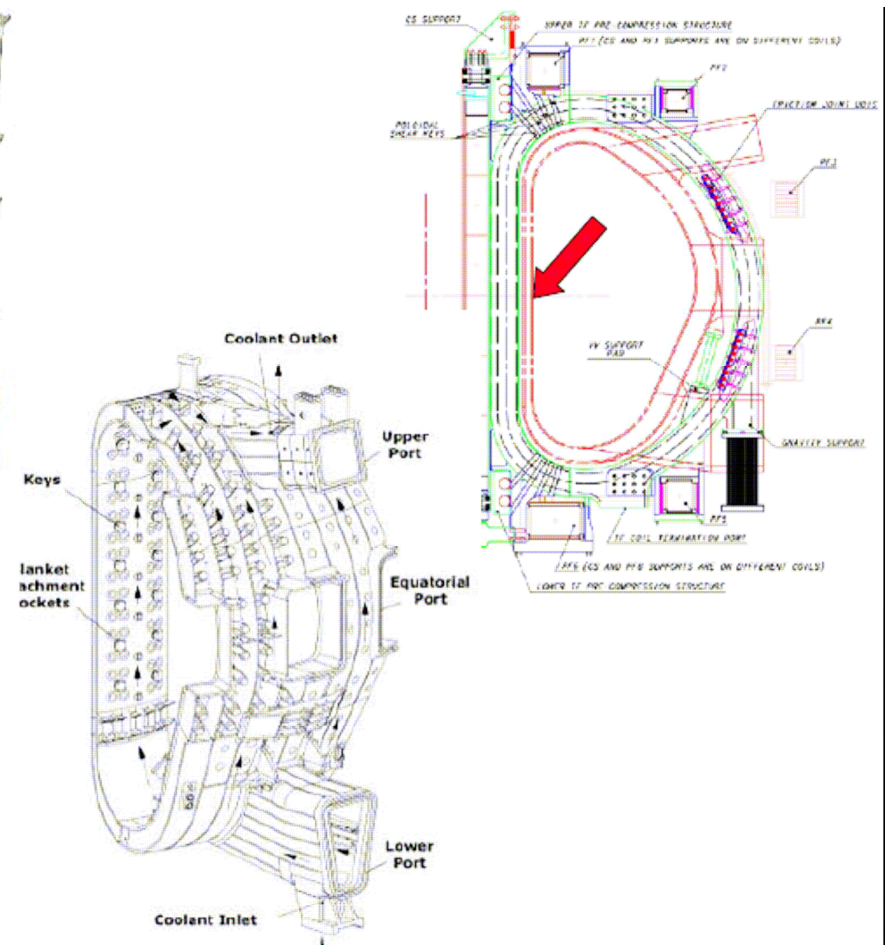
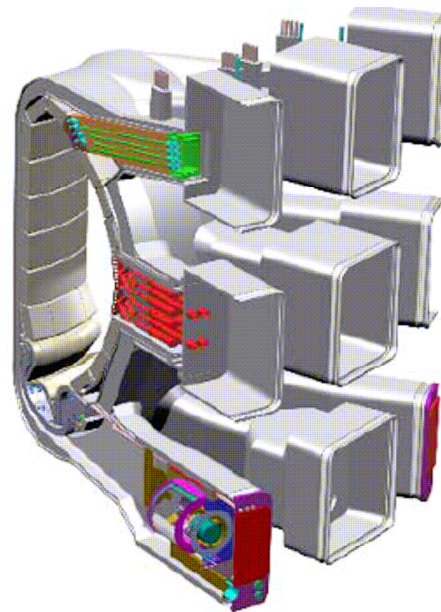
## Camera a vuoto

## In ITER la camera a vuoto svolge diverse funzioni

## Schemo nucleare

Supporto meccanico  
di tutti i componenti  
meccanici interni  
(blanket divertore, inserti  
nelle porte, ecc)

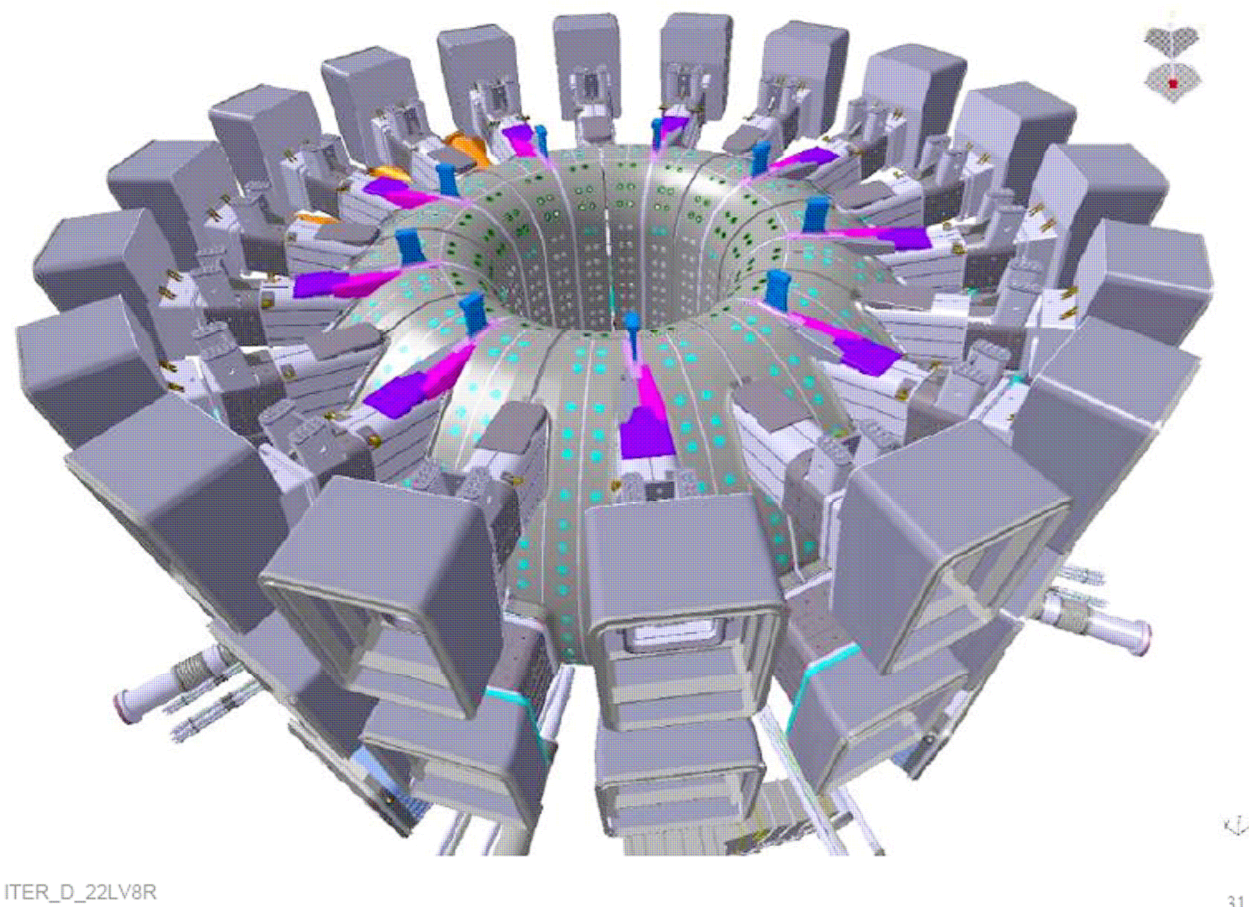
Supporto per i circuiti di raffreddamento di blanket divertore e prima parete.



Costituisce inoltre la barriera del vuoto primario e pertanto e' un elemento di sicurezza del reattore



## *Insieme della camera a vuoto di ITER*



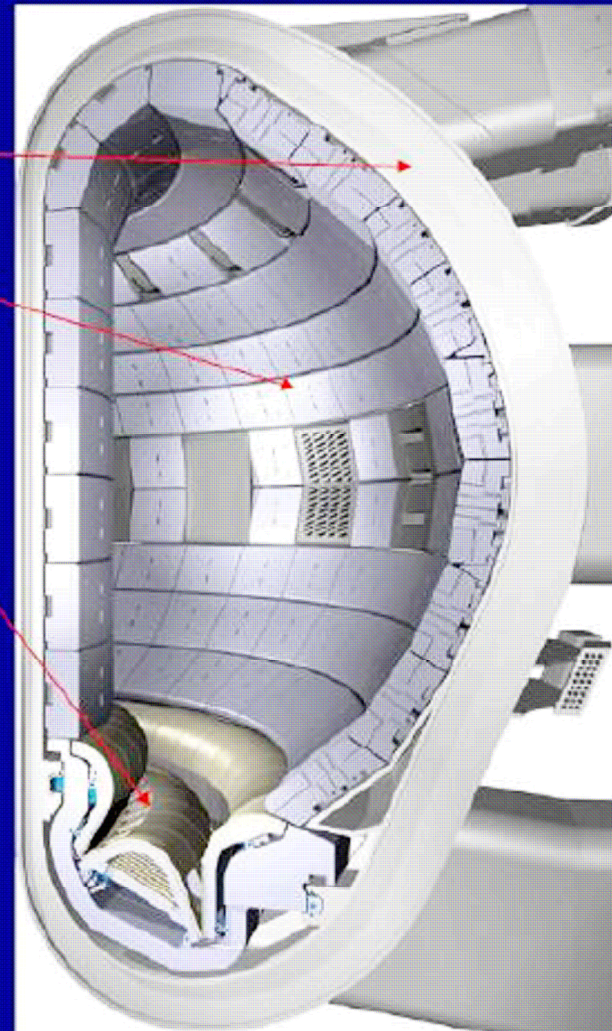


## *Interno macchina*

### *Vacuum Vessel Blanket system Divertor System*

#### VV Parameters:

|                        |            |
|------------------------|------------|
| Torus OD               | 19.4 m     |
| Torus height           | 11.3 m     |
| Double wall thickness  | 0.34-0.75m |
| Shell thickness        | 60 mm      |
| Total Mass (9 Sectors) | 6501 t     |
| VV Mass                | 2395 t     |
| + shielding            | 2500 t     |
| + ports                | 1606 t     |



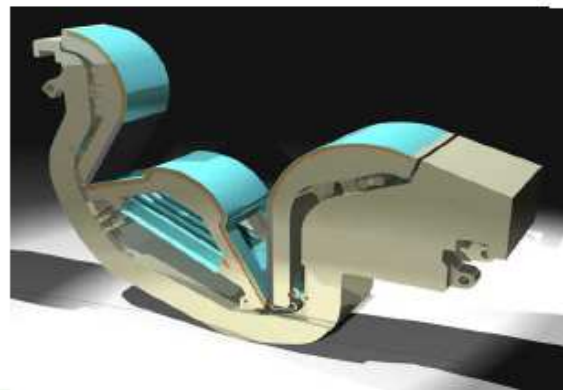
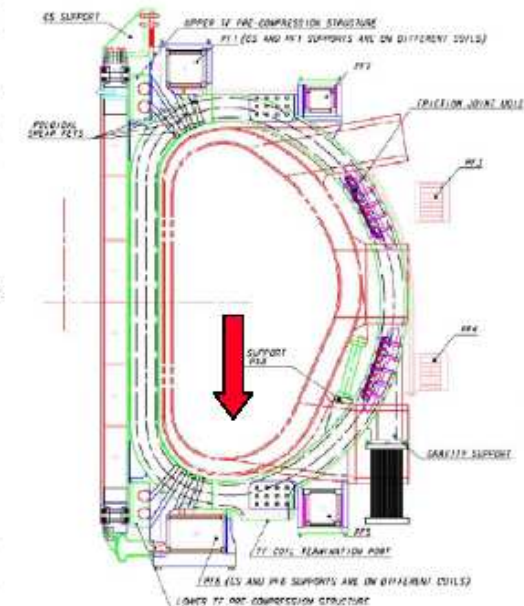
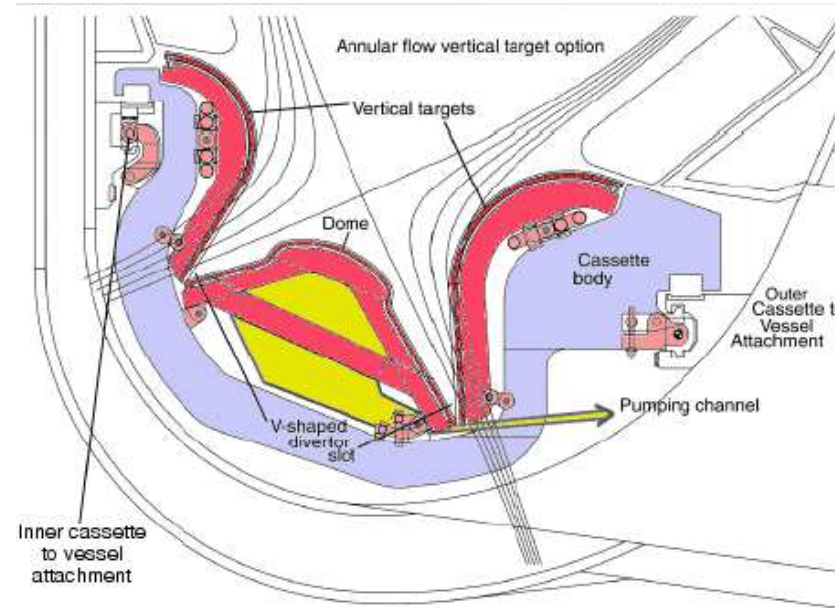
## Divertore

Il divertore ha la funzione essenziale in un reattore di convogliare in modo controllato i carichi termici del plasma su su superfici in grado di accettarli

E' una zona critica de reattore e in ITER e' previsto la sua sostituzione.

E' pertanto progettato in modo che si possa smontare con tecniche di manipolazione remota

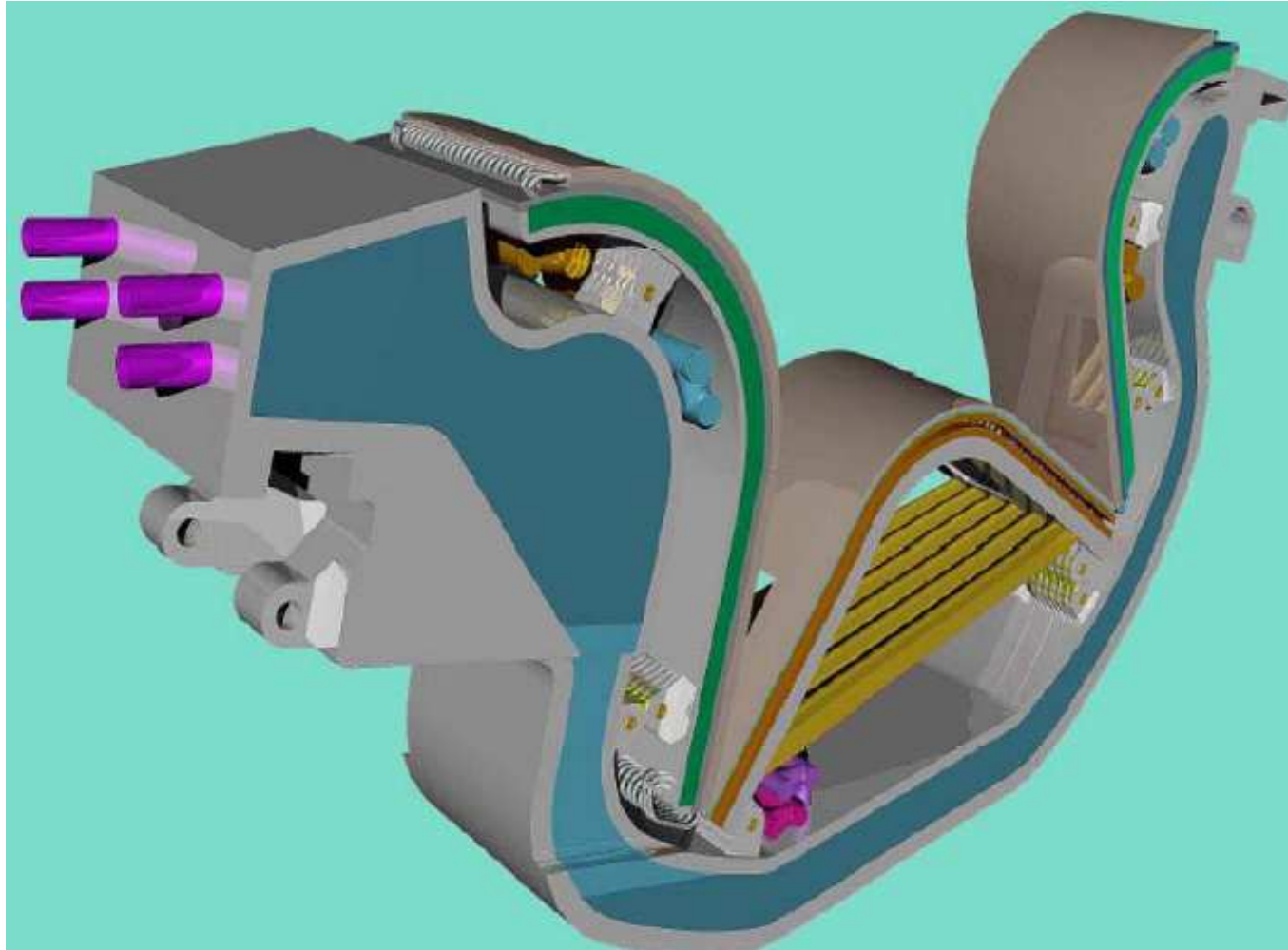
G. Bosia – Introduzione alla fisica del plasma



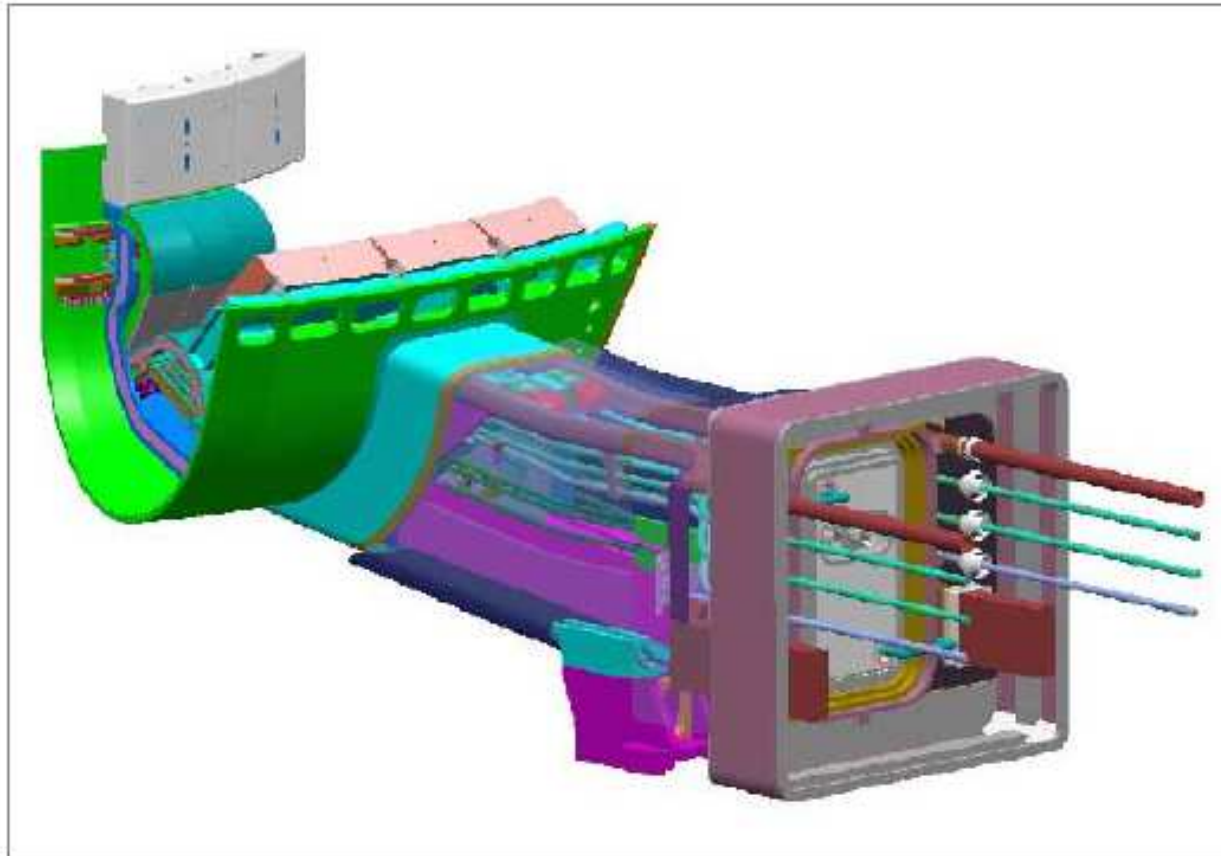
ITER\_D\_22LV8R



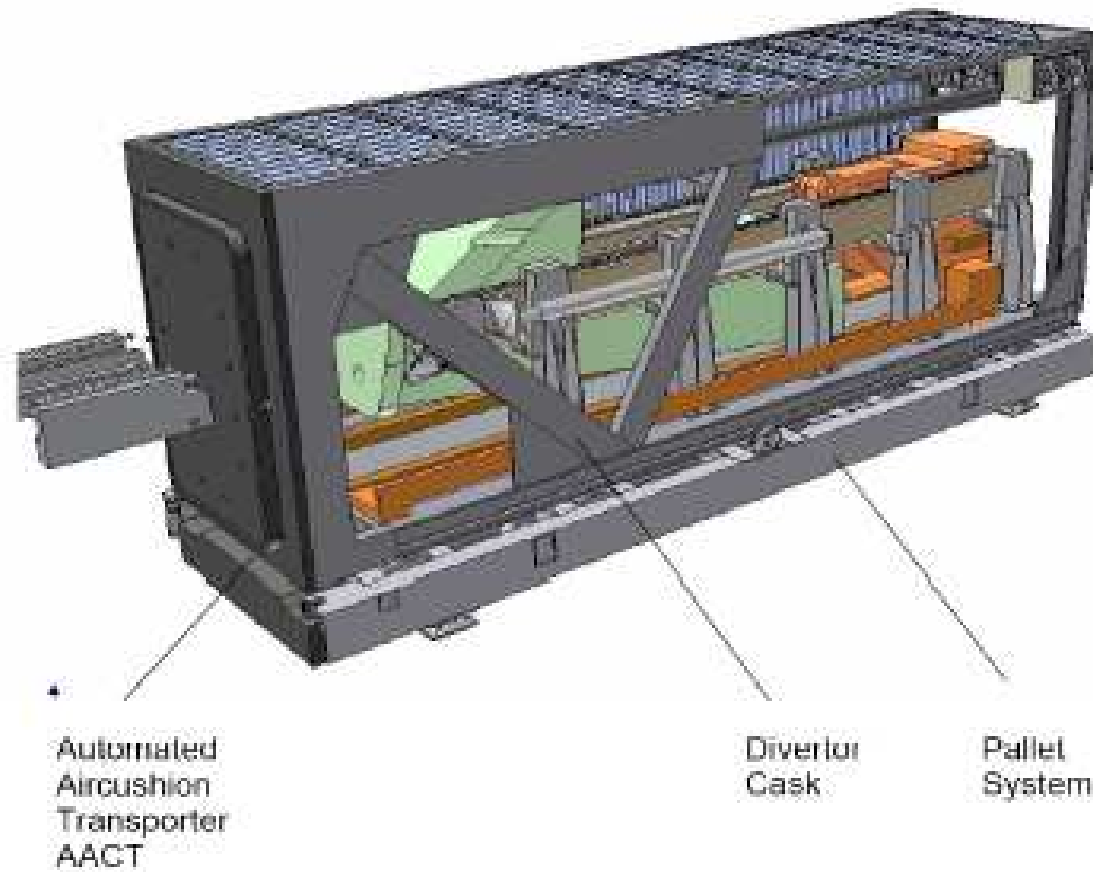
## *Componenti del divertore*



## *Rimozione remota di una sezione di divertore*



## *Rimozione RH di un inserto di una porta equatoriale*





## *Vista di insieme del sistema ITER*

