

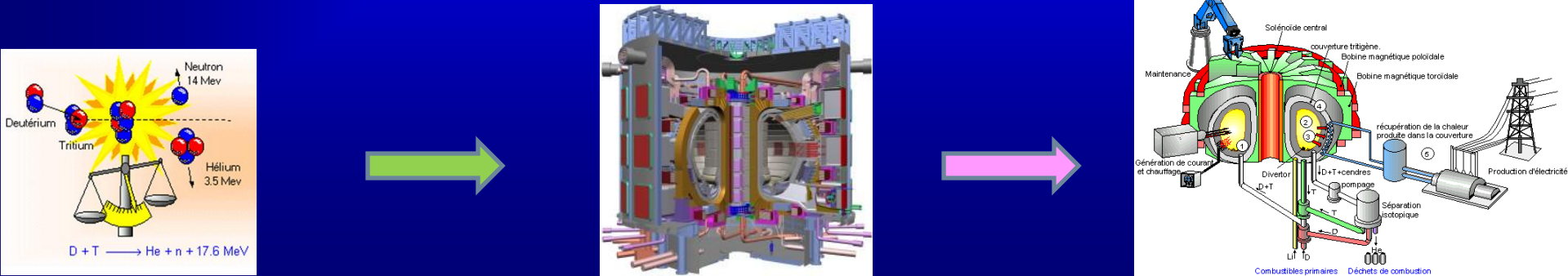
Una chiacchierata sulla fusione nucleare

18 Marzo 2008 - NIER Ingegneria, Bologna

La Fusione Nucleare: concetti di base, la situazione attuale e le prospettive “energetiche” per il futuro

G. Cambi

Dipartimento di Fisica - Università di Bologna



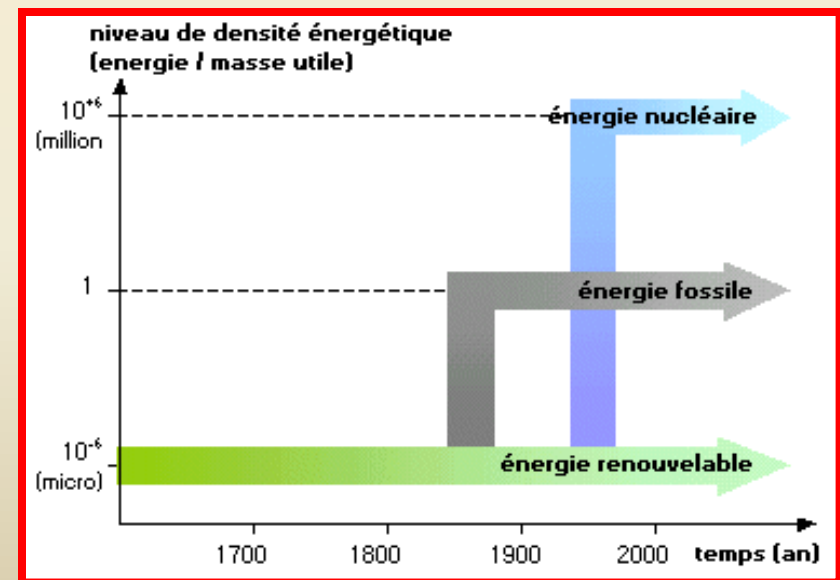
L'evoluzione dei bisogni energetici ha portato all'utilizzo di sorgenti energetiche in grado di fornire **grandi quantità di energia per unità di massa di "combustibile" utilizzato** ➡ **si richiedono cioè elevate densità energetiche**

Le reazioni chimiche (*ad esempio la combustione di carbone e petrolio*) comportano fenomeni che intervengono a livello degli elettroni degli atomi del combustibile

Invece le **reazioni nucleari** (*ad esempio la fissione e la fusione nucleare*) comportano fenomeni che intervengono a livello dei nuclei degli atomi del combustibile:



Rispetto alle reazioni chimiche le energie sviluppate per unità di massa del combustibile sono notevolmente più elevate (**di circa un fattore 10^6**)



Come produrre energia da reazioni nucleari

Per produrre energia è necessario realizzare una trasformazione nella quale tra lo stato iniziale e quello finale **una parte della massa** dei “reagenti” **scompare!**

La massa scomparsa è chiamata “**difetto di massa Δm** ”

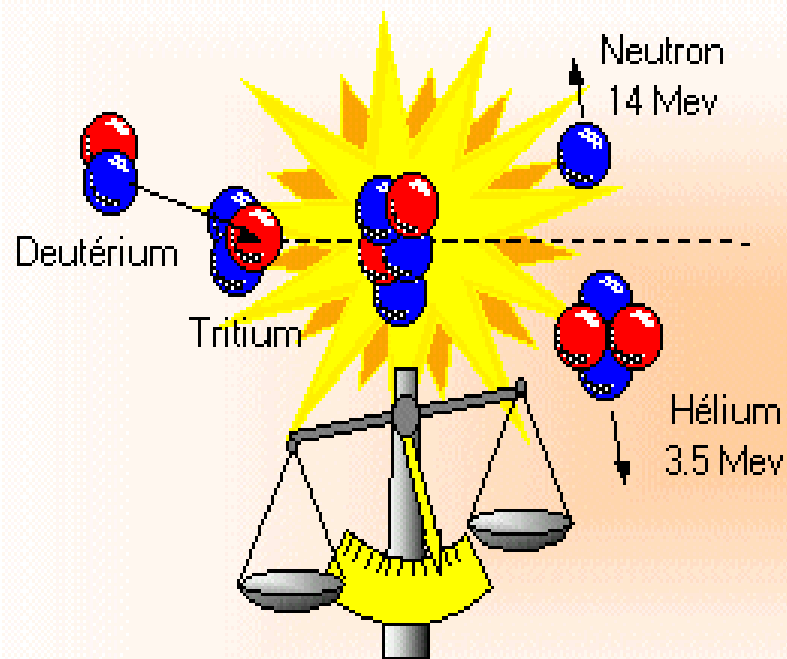
Il difetto di massa si ritrova sotto forma di Energia E sulla base della ben nota relazione di Einstein **$E = (\Delta m) c^2$** dove c è la velocità della luce nel vuoto

Due grandi tipi di reazioni nucleari presentano un difetto di massa significativo liberando pertanto l'energia corrispondente

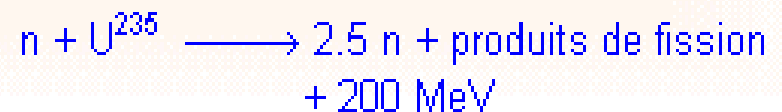
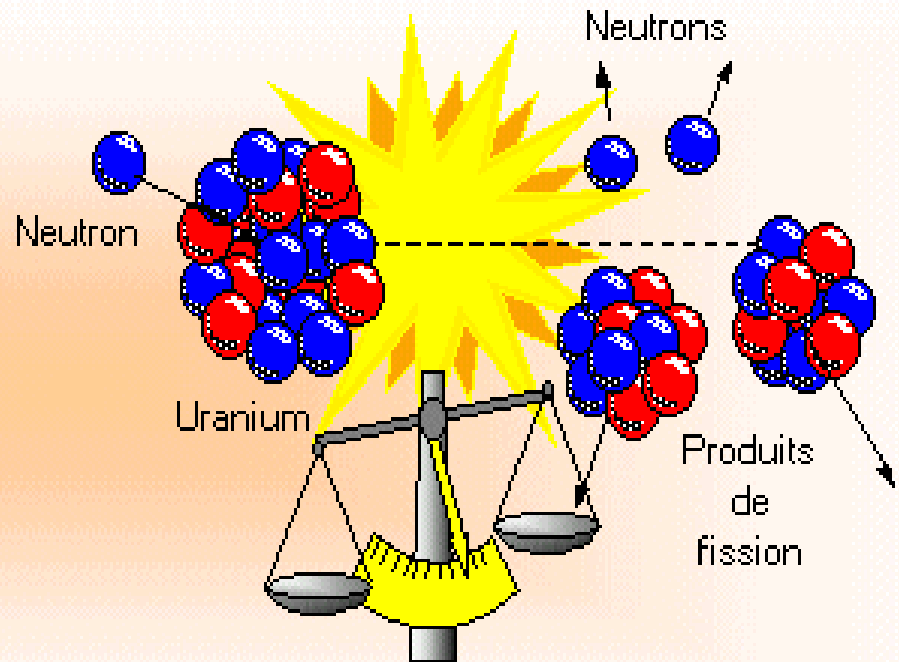
Reazione di fusione nucleare: partendo da nuclei di atomi molto leggeri si “costruiscono” nuclei di atomi più pesanti.

Reazione di fissione nucleare: partendo dal nucleo di un atomo pesante si “costruiscono” nuclei di atomi più leggeri

Esempio di **FUSIONE NUCLEARE**



Esempio di **FISSIONE NUCLEARE**



N.B. : il MeV è una unità di misura dell'energia

Concetti di base della fusione nucleare

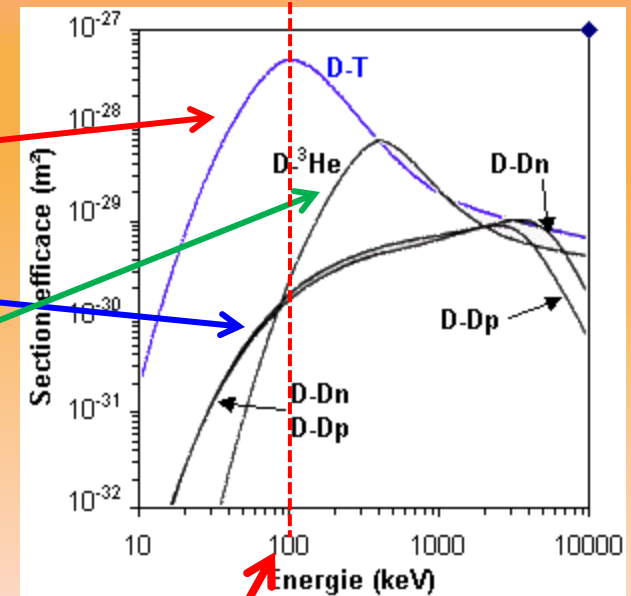
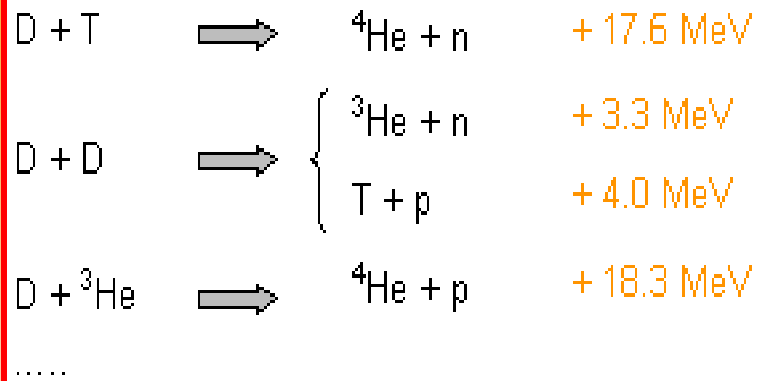
Affinché avvenga una reazione di fusione nucleare è necessario che i due nuclei leggeri arrivino praticamente a contatto tra loro. Poiché essi sono entrambi carichi positivamente, tenderanno a respingersi senza interagire. Esiste cioè una sorta di barriera che impedisce la fusione.

Occorrerà allora fornire ai due nuclei una energia sufficiente per superare tale barriera e farli arrivare ad una distanza così piccola dove agiscono delle forze attrattive molto intense (le **forze nucleari**) in grado di superare la repulsione elettrostatica.

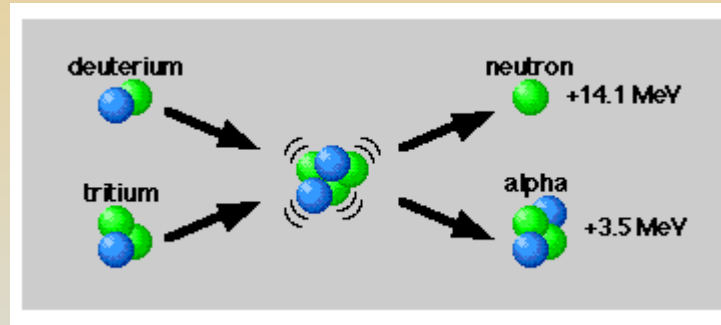
La probabilità di superare tale barriera è quantificata da una grandezza chiamata “**sezione efficace**”.

Più grande è tale grandezza, più elevata è la probabilità di interazione tra i due nuclei leggeri (cioè di **fusione nucleare**).

Alcune reazioni di fusione



Energia di 100 keV :
 massimizza la probabilità di fusione tra Deuterio e Trizio



I due nuclei interagiscono solo a distanze molto brevi, equivalenti alle dimensioni del nucleo. **Perché due nuclei si avvicinino a distanze sufficientemente brevi è necessario che la velocità con cui si urtano sia molto alta; la loro energia cinetica (e quindi la temperatura) cioè deve essere molto elevata.** Per ottenere in laboratorio reazioni di fusione, ad esempio, è necessario portare una miscela di deuterio e trizio a temperature elevatissime (**100 milioni di gradi corrispondenti ad energie di circa 10 keV**) per tempi di confinamento sufficientemente lunghi. In tal modo i nuclei hanno tempo di fare molte collisioni, aumentando la probabilità di dar luogo a reazioni di fusione.

A temperatura ordinaria, in un gas, le particelle sono neutre; viceversa a temperatura superiore a qualche eV (cioè qualche migliaio di gradi), poichè le singole particelle tendono a dissociarsi negli elementi costitutivi (ioni ed elettroni) il gas si trasforma in una miscela di particelle cariche, cioè un **plasma**

Condizioni per la fusione termonucleare controllata

Per ottenere in laboratorio la **fusione termonucleare controllata**, con un bilancio energetico positivo, è necessario riscaldare un plasma di deuterio-trizio a temperature molto alte (100 milioni di gradi, più di sei volte la temperatura all'interno del sole), mantenendolo confinato in uno spazio limitato per un tempo sufficiente a che l'energia liberata dalle reazioni di fusione possa compensare sia le perdite, sia l'energia usata per produrlo.

Occorre cioè soddisfare le condizioni espresse dal
Criterio di Lawson

$$nT_E T \geq 1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$$

Nel caso di un plasma di deuterio-trizio a **100 milioni di gradi**, (pari a circa 10 KeV di energia) a basso contenuto di impurità, il Criterio di Lawson richiede che:

il prodotto della densità di particelle del plasma per il tempo di confinamento deve essere $> 3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$.

Temperatura del plasma: (T) 100-200 million Kelvin

Tempo di confinamento: (t) 4-6 seconds

Densità del plasma: (n) $1\text{-}2 \times 10^{20} \text{ particles m}^{-3}$ (approx. 1/1000 gram m^{-3} , i.e. one millionth of the density of air).

A temperature così elevate il problema diventa:
come confinare il plasma in un recipiente ?

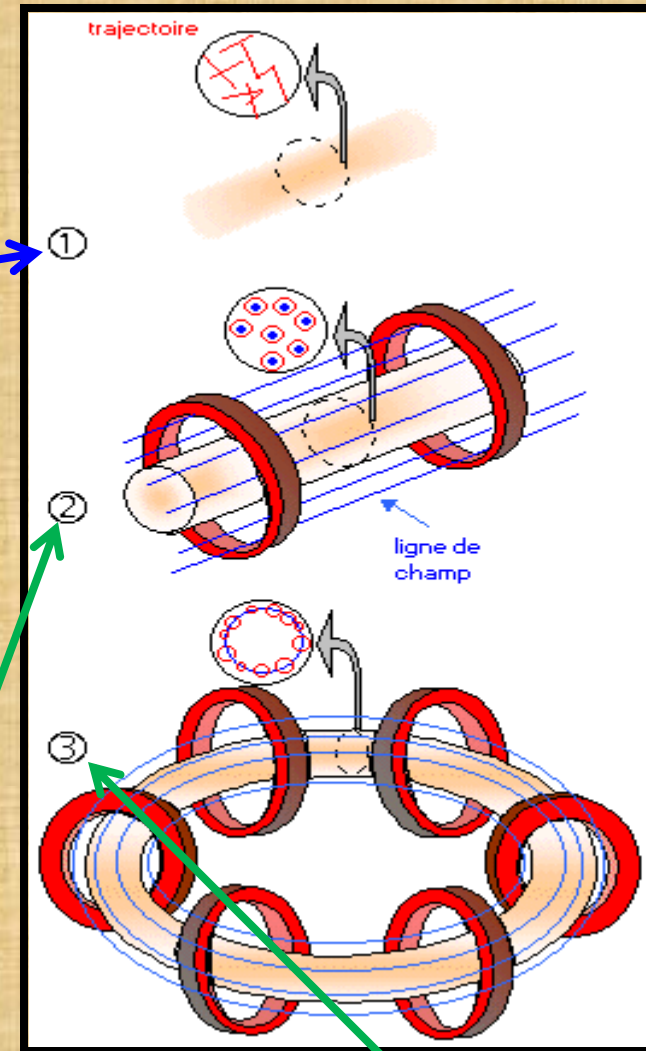
Si conoscono due metodi per il confinamento del plasma:
quello “magnetico” e quello “inerziale”

Confinamento magnetico del plasma

Attualmente quello più studiato e sperimentato

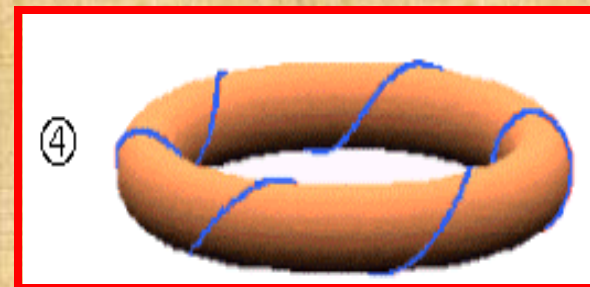
In linea di principio il plasma costituito da particelle cariche (ioni di deuterio e trizio) può essere **confinato mediante un campo magnetico**: in assenza di questo campo le particelle si muoverebbero a caso in tutte le direzioni, urterebbero le pareti del recipiente e il plasma si raffredderebbe inibendo la reazione di fusione.

In un campo magnetico invece le particelle sono costrette a seguire traiettorie a spirale intorno alle linee di forza del campo mantenendosi lontano dalle pareti del recipiente.

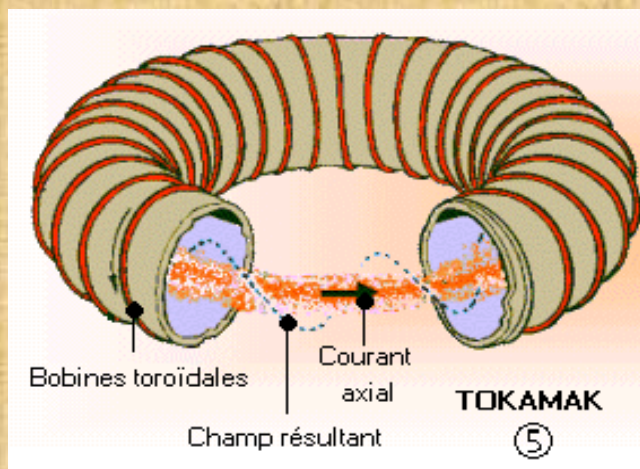


Se si utilizzasse la configurazione 2 si avrebbe la perdita di particelle alle estremità. Questo può essere evitato utilizzando una configurazione tipo la 3.

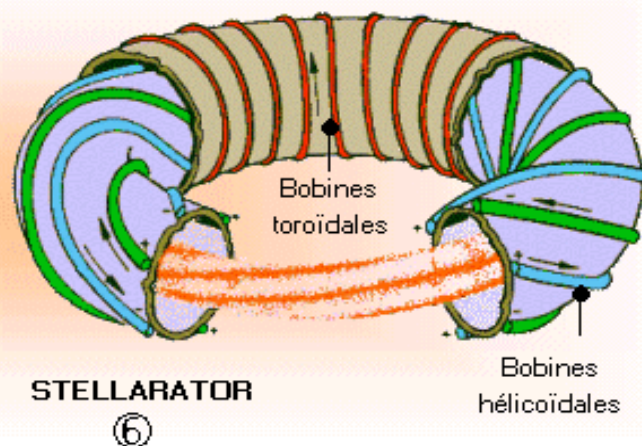
In realtà si è visto che per minimizzare la perdita di particelle di plasma (nuclei di deuterio e trizio) le linee del campo debbono essere elicoidali, come nella configurazione 4. Questo si ottiene aggiungendo al campo toroidale un altro campo ad esso perpendicolare (campo poloidale). Il metodo utilizzato per produrre le linee di campo elicoidali ha dato origine a due tipi di macchine.



Tokamak

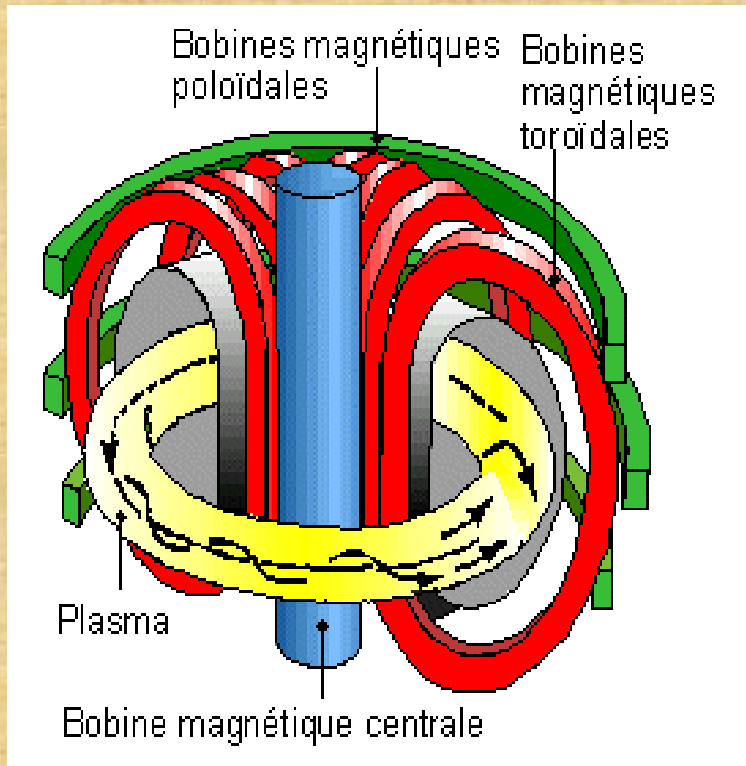


Stellarator



La macchina tipo Tokamak è attualmente quella più studiata sperimentalmente

La situazione attuale della fusione nucleare



La macchina tipo Tokamak è attualmente quella più studiata (e sviluppata Sperimentalmente) a livello mondiale

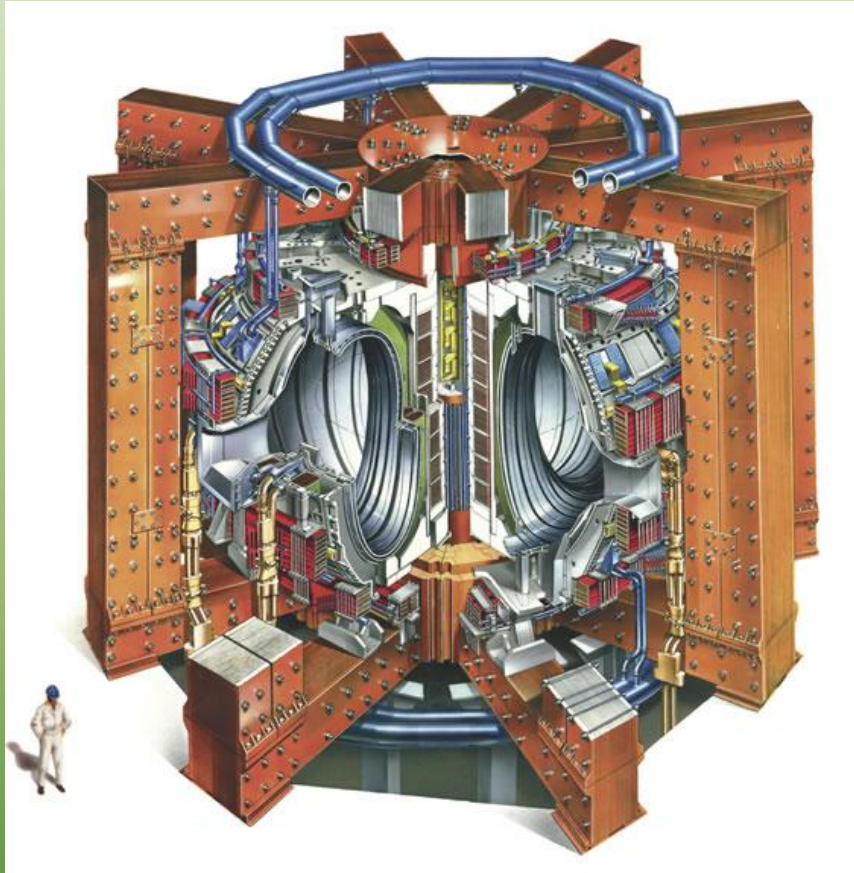
Circa 30 tokamaks sono funzionanti, ad inizio 2008, in vari paesi del mondo.

Oltre un centinaio hanno operato in anni precedenti e sono ora smantellati o in fase di smantellamento

5 sono attualmente in costruzione

1 (ITER) è in fase finale di progettazione

JET (EU)

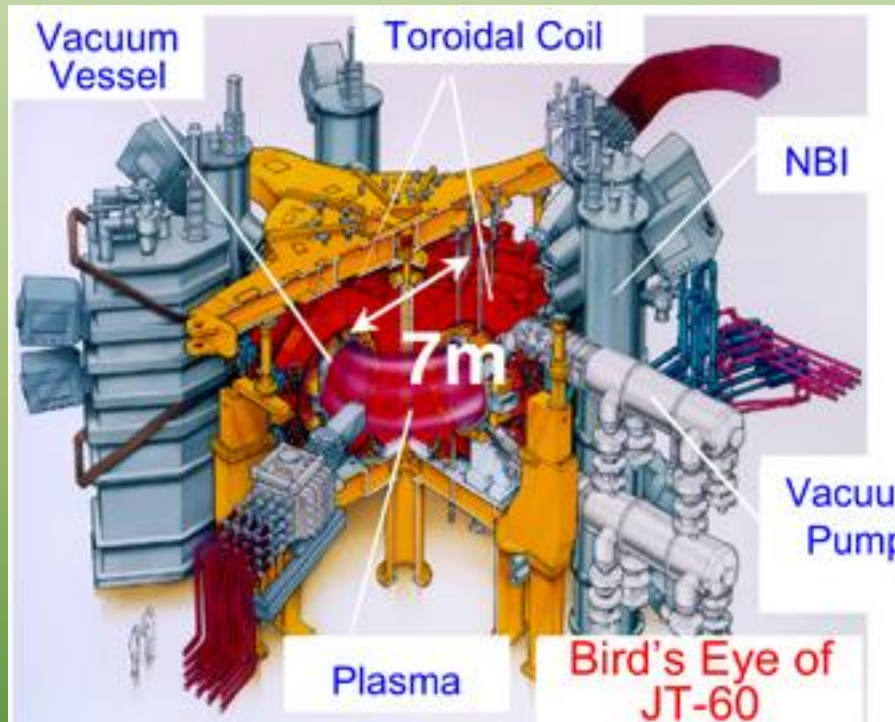


JET è situato nel centro UKAEA di Culham (Oxfordshire, UK).
E' il tokamak più grande al mondo ed è l'unico, attualmente, che **può** operare con una miscela di D e T.

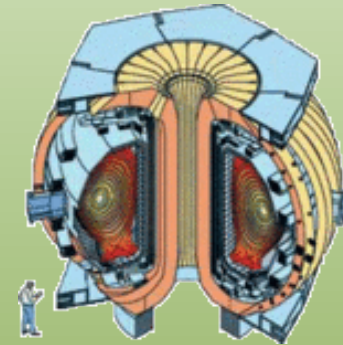
Edificio che contiene JET



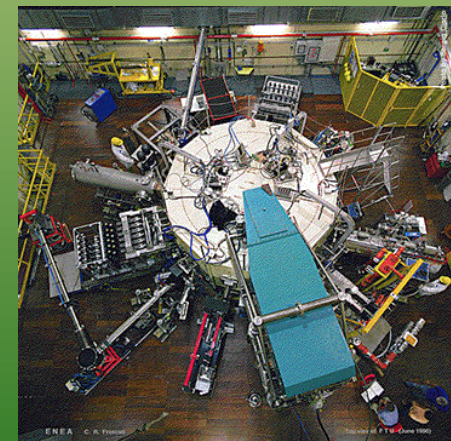
JT-60 (Japan)



DIII-D (USA)



FTU (Frascati)



While significant progress has been made with large fusion experiments around the world, most of which were constructed in the 80's, it was clear from an early stage that a larger and more powerful device would be needed to create the conditions expected in a fusion reactor and to demonstrate its scientific and technical feasibility, and each of the fusion programmes around the world started to make their own design for it.

The idea for ITER originated from the Geneva superpower summit in November 1985 where Premier Gorbachov, following discussions with President Mitterand of France, proposed to President Reagan that an international project be set up to develop fusion energy for peaceful purposes. The ITER-project subsequently began as a collaboration between the former Soviet Union, the USA, the European Union (via Euratom) and Japan.

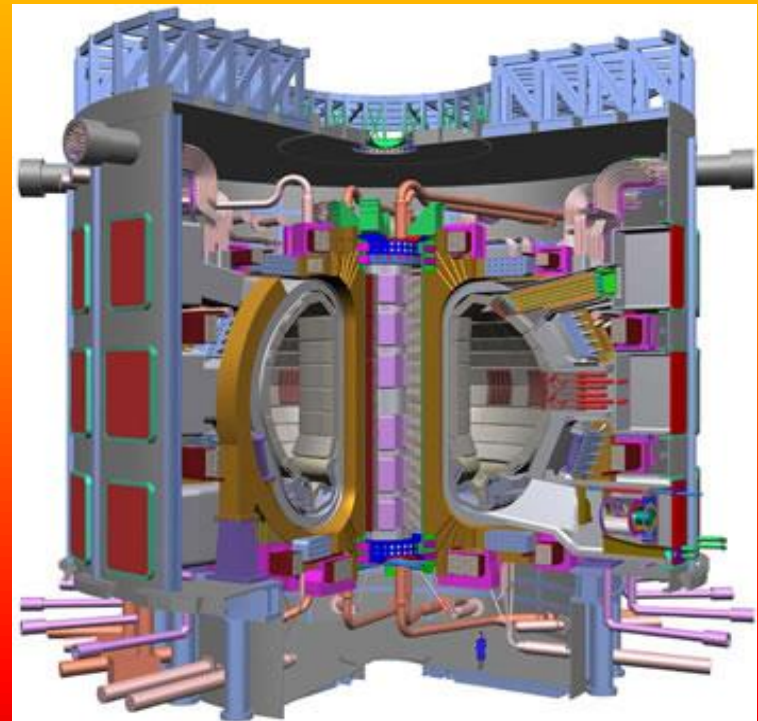
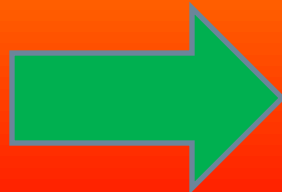
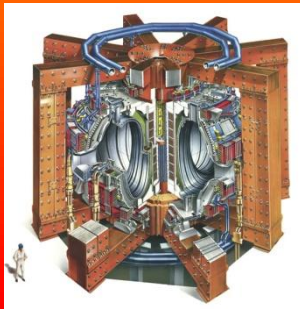
In 1988 the conceptual design work was started, followed in 1992 by engineering design. On July 21st, 2001, the ITER engineering design activities were successfully completed, and the final design report was made available to the ITER Parties.

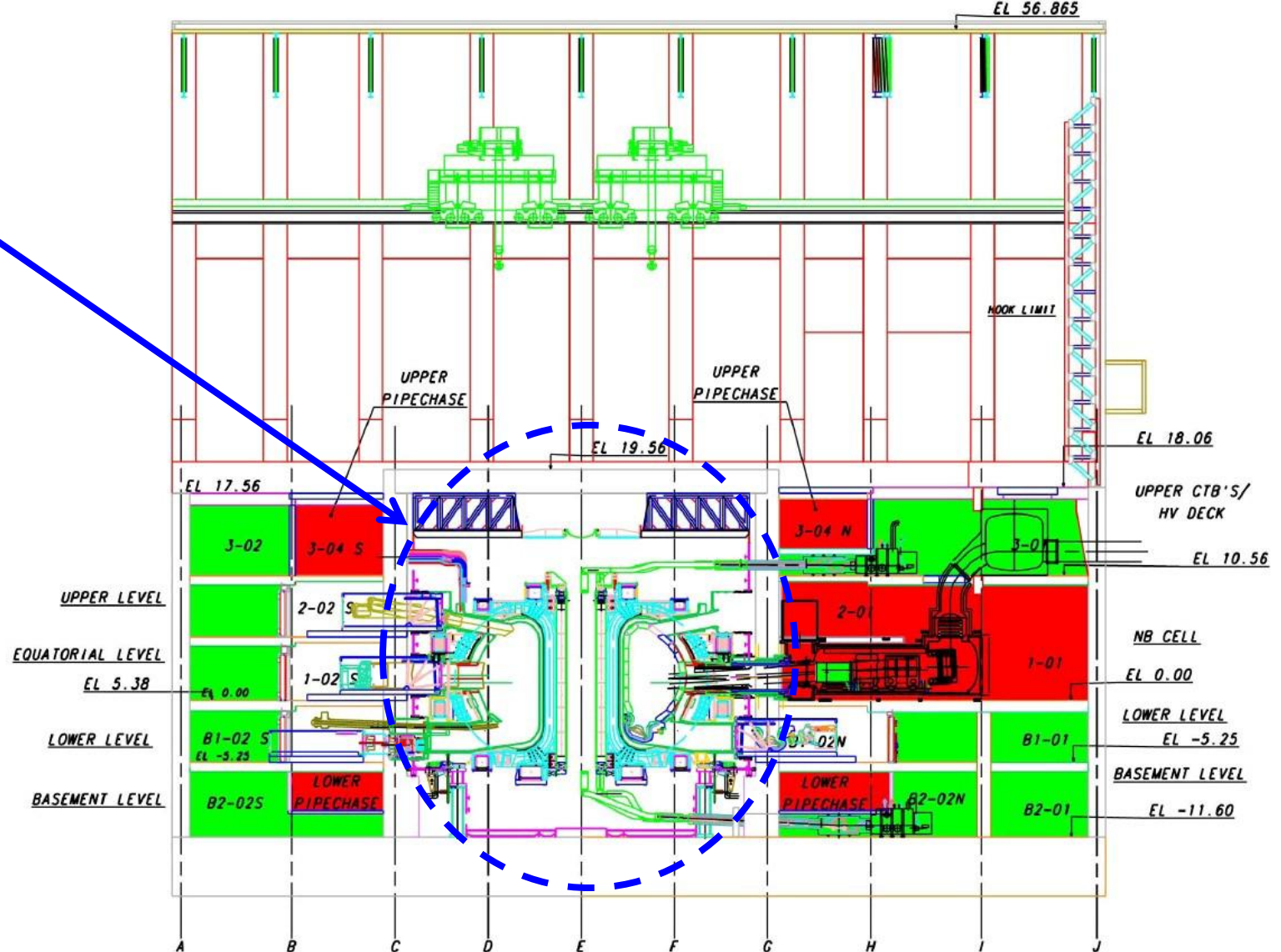
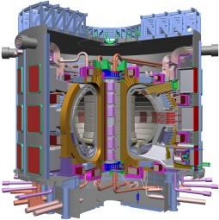
A number of changes have occurred in the Participants to the ITER project. Following the collapse of the Soviet Union, the Russian Federation took its place as ITER Party. The USA temporarily withdrew from the project in 1999, to return in 2003. Canada became a participant in negotiations in 2001 by proposing a site for ITER, but left the project at the end of 2003 when it was not selected. The People's Republic of China and the Republic of Korea both joined the project in 2003, and finally India joined in December 2005.

Futuro prossimo

ITER

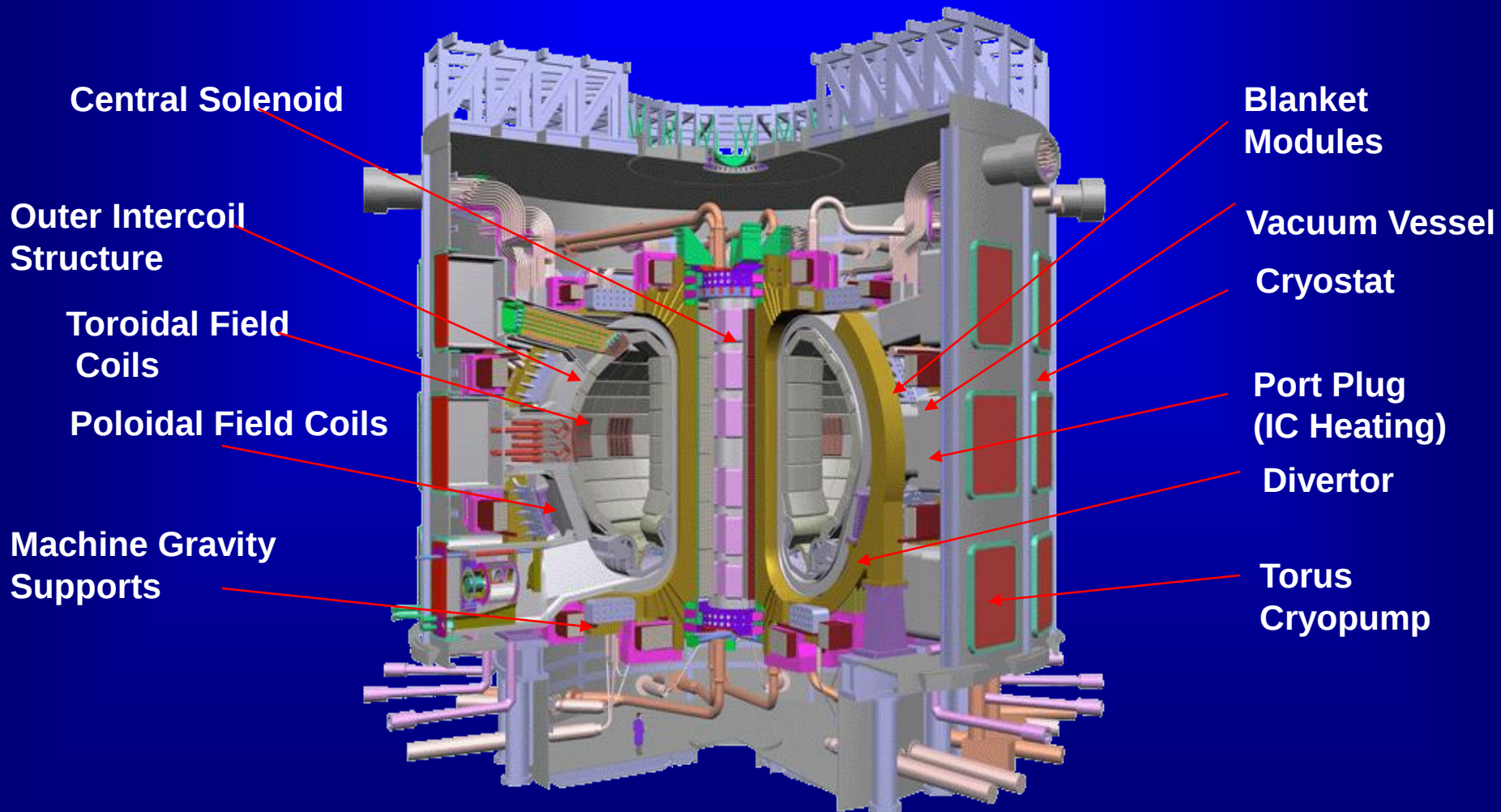
JET (EU)





Tokamak building North/South
(green: "gallery area"; red: TWCS vault and connected volumes)

ITER Tokamak machine



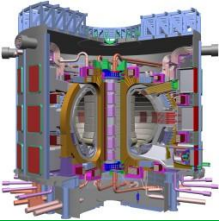
Site selection

The process of selecting a location for ITER took a long time, and was finally successfully concluded in 2005. Canada was first to offer a site in Clarington, in May 2001. Soon after, Japan proposed the Rokkasho-Mura site, Spain offered a site at Vandellós near Barcelona, and France proposed the Cadarache site in the South of France.

Canada withdrew from the race in 2003, and the EU decided in November 2003 to concentrate its support on a single European site, for which the French site Cadarache was chosen. From that point onwards, the choice was between France and Japan. **On June 28, 2005 it was officially announced that ITER will be built in the European Union, at the Cadarache site.**

As part of the deal over the siting, it was agreed that Japan would provide 20% of the staff for the ITER project, and Europe would make a fifth of its procurements in Japan.

In addition, the head of the project would be proposed by Japan, and Japan and Europe would work together on a "**broader approach**" including the other programmatic items which would be necessary to build a demonstration power plant in Japan after ITER, such as materials qualification, advanced plasma experimentation, plasma simulation, and the design team itself.



Cadarache : ITER site



The current ITER building



ITER Licensing Status

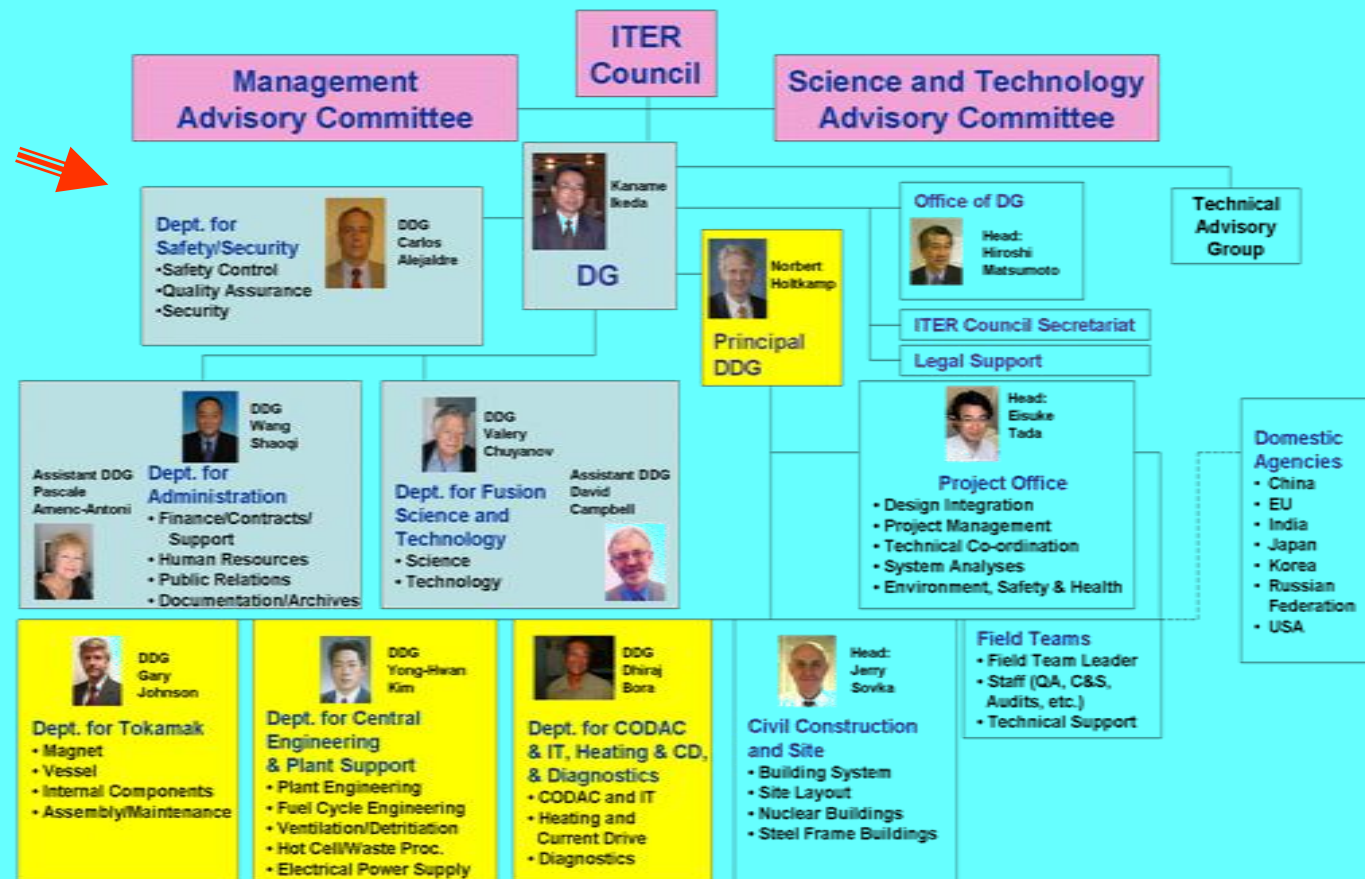
ITER parties



ITER organisation

ITER Legal Entity ILE:

the organisation that will run ITER and which is the owner of the license to construct and operate it. The name of the organisation will be the **ITER International Fusion Energy Organisation (IIFE0)**.

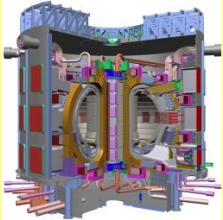


27 March 2007: EU establishes the European Domestic Agency

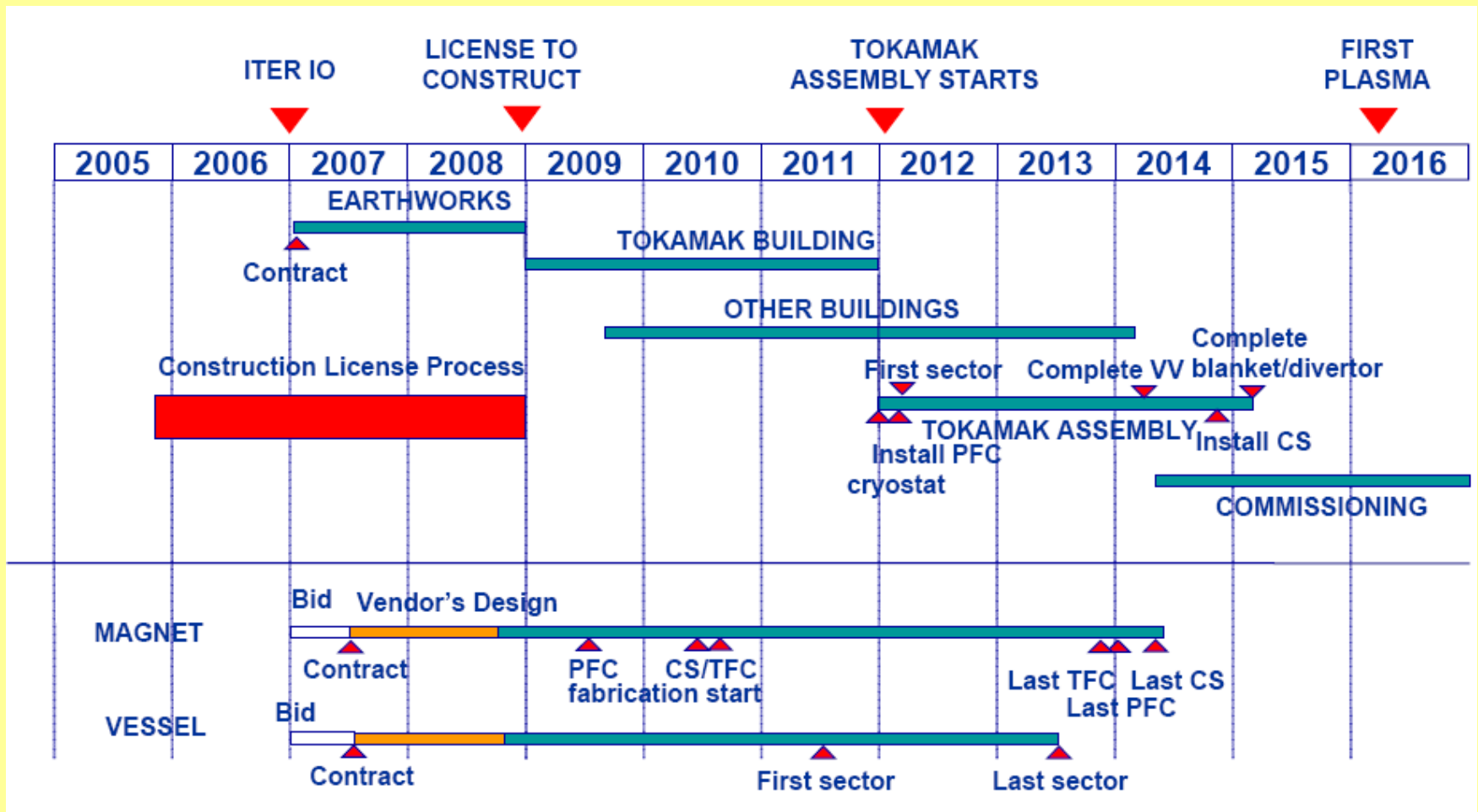
The European Joint Undertaking for the ITER Fusion energy organization and the development of fusion energy has been established by the Council of the European Union at its meeting in Brussels on 27 March. The Joint Undertaking will form the European Domestic Agency that will manage the EU's contribution to ITER. With a lifetime of 35 years, a total budget of 9.653 M Euro and based in Barcelona, Spain, the Joint Undertaking will play a major role in the EU's fusion activities:

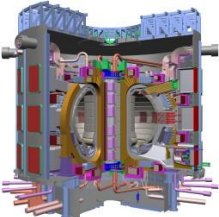
- 1) *Provision of the contribution of the European Atomic Energy Community (Euratom) to the ITER International Fusion Energy Organization*
- 2) *Provision of Euratom's contribution to 'broader approach' activities with Japan for the rapid realisation of fusion energy*
- 3) *Preparation and co-ordination of programme of activities in preparation for construction of a demonstration fusion reactor and related facilities*

VERSO IL FUTURO

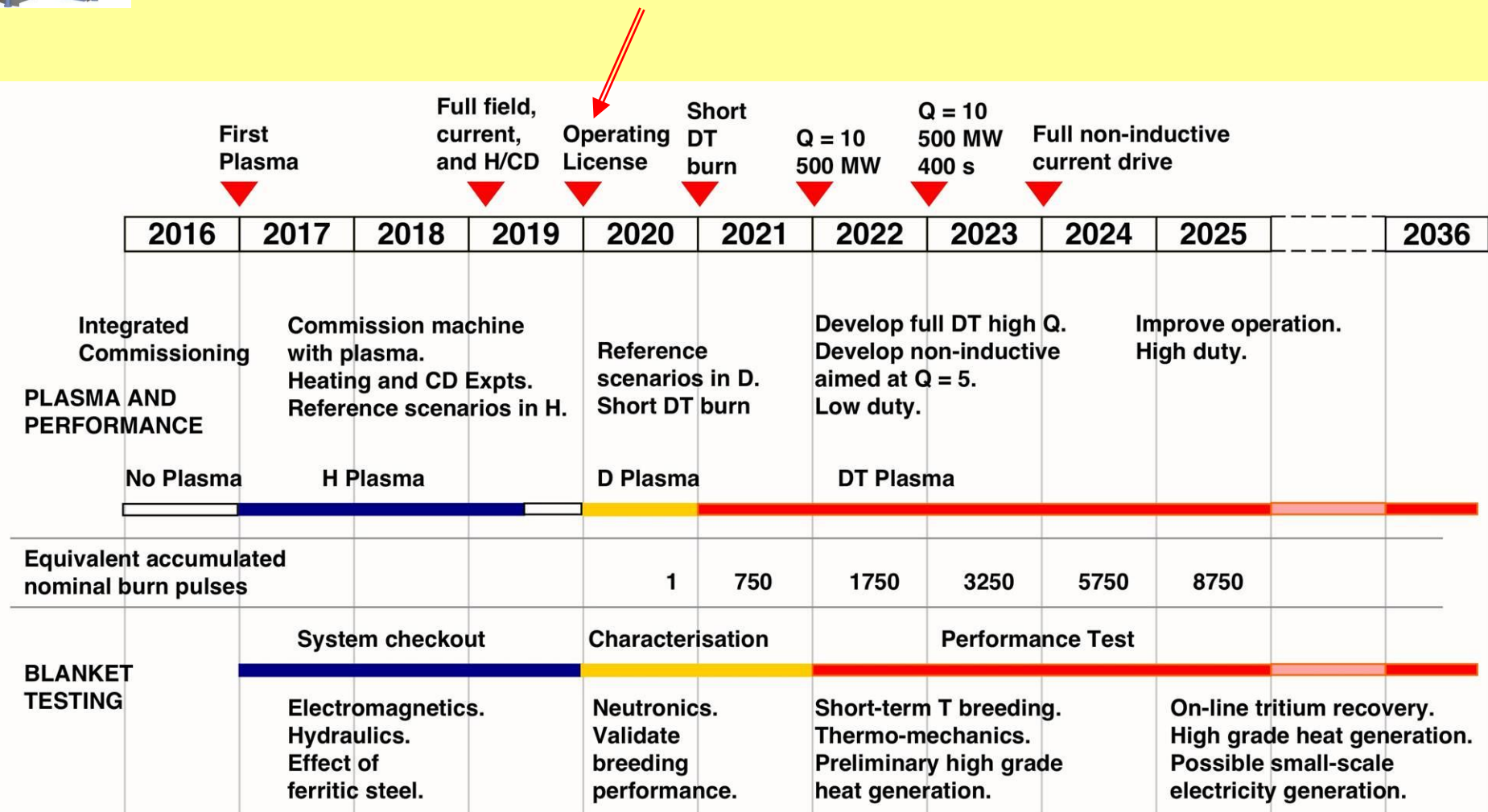


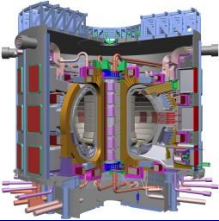
The schedule





Operation plan





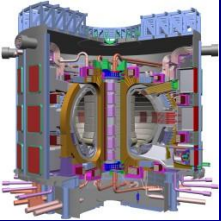
Licensing Aspects

The licensing process is formalised in France by two decisions at government level: the “Décret d’Autorisation de création (DAC)”, required to start construction and the “Décret d’Autorisation de Rejets et de prélèvements d’Eau (DARPE)”, required to start operation.

ITER: INSTALLATION NUCLÉAIRE DE BASE (INB) According to French regulation the ITER device will be classified as a nuclear Installation called “Installation Nucléaire de Base” (INB) due to the expected tritium inventory and the expected waste generation during the lifetime of ITER.

ITER OPERATOR The operator is responsible for the safety and environmental impact of the installation from the beginning of construction to the final step of decommissioning. The current hypothesis is that the future operator will be the ITER Legal Entity (ILE).

START FOR THE LICENSING PROCEDURE In order not to delay the licensing procedure, the “Commissariat à l’Energie Atomique” (CEA) has in cooperation with the International Team **started early in 2001** the procedure of the safety objectives definition and safety analysis.

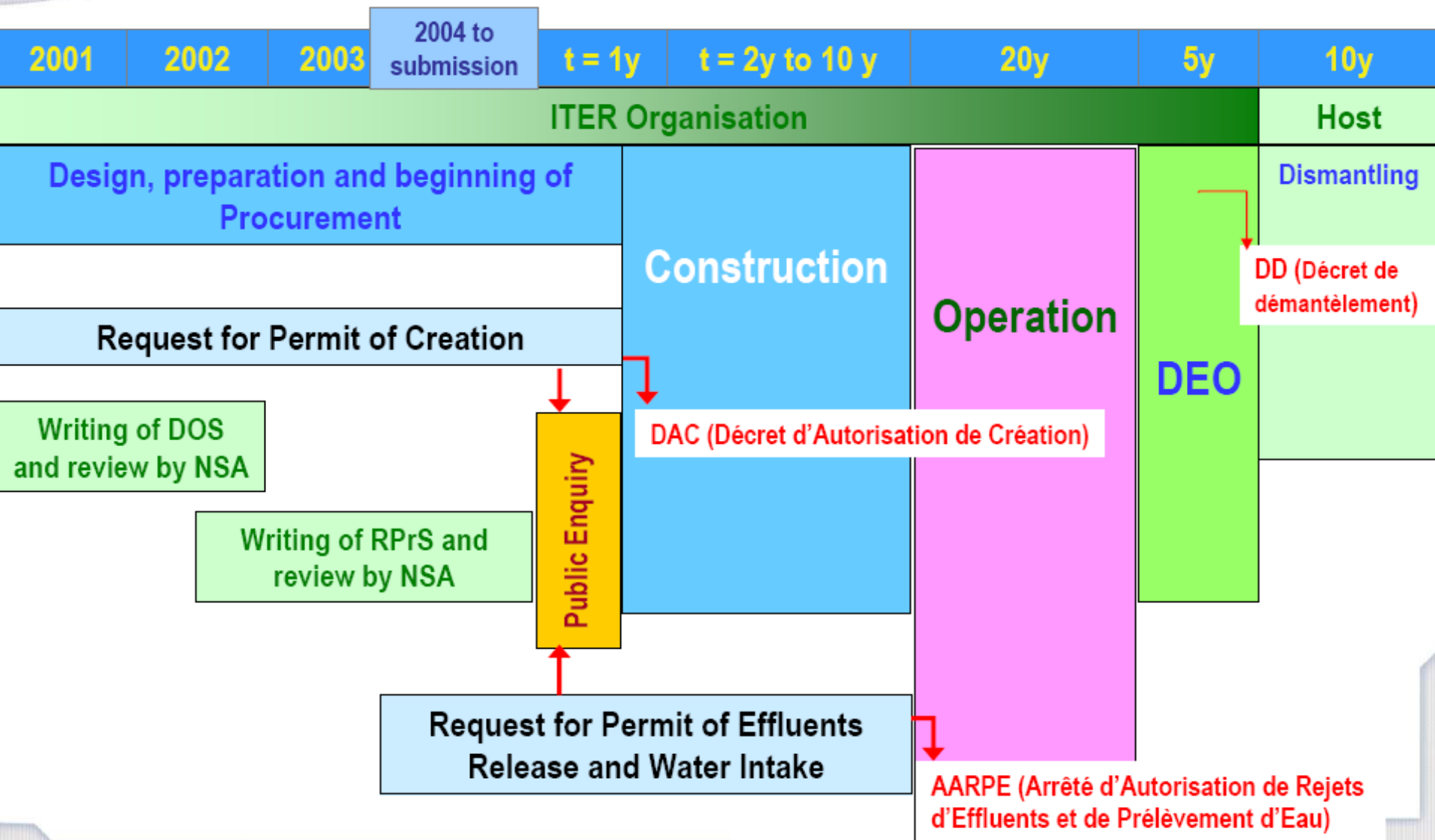


Licensing Milestones

- First draft of RPrS, End of Summer 2007
- Formal submission of RPrS and DAC, end 2007
- Reviewed by ASN, IRSN, Groupe Permanent during 2008
- Public hearing (DAC and DARPE) mid-2008
- Construction permit, start of construction beginning of 2009



ITER licensing roadmap



...e il futuro remoto ?

Non solo ITER

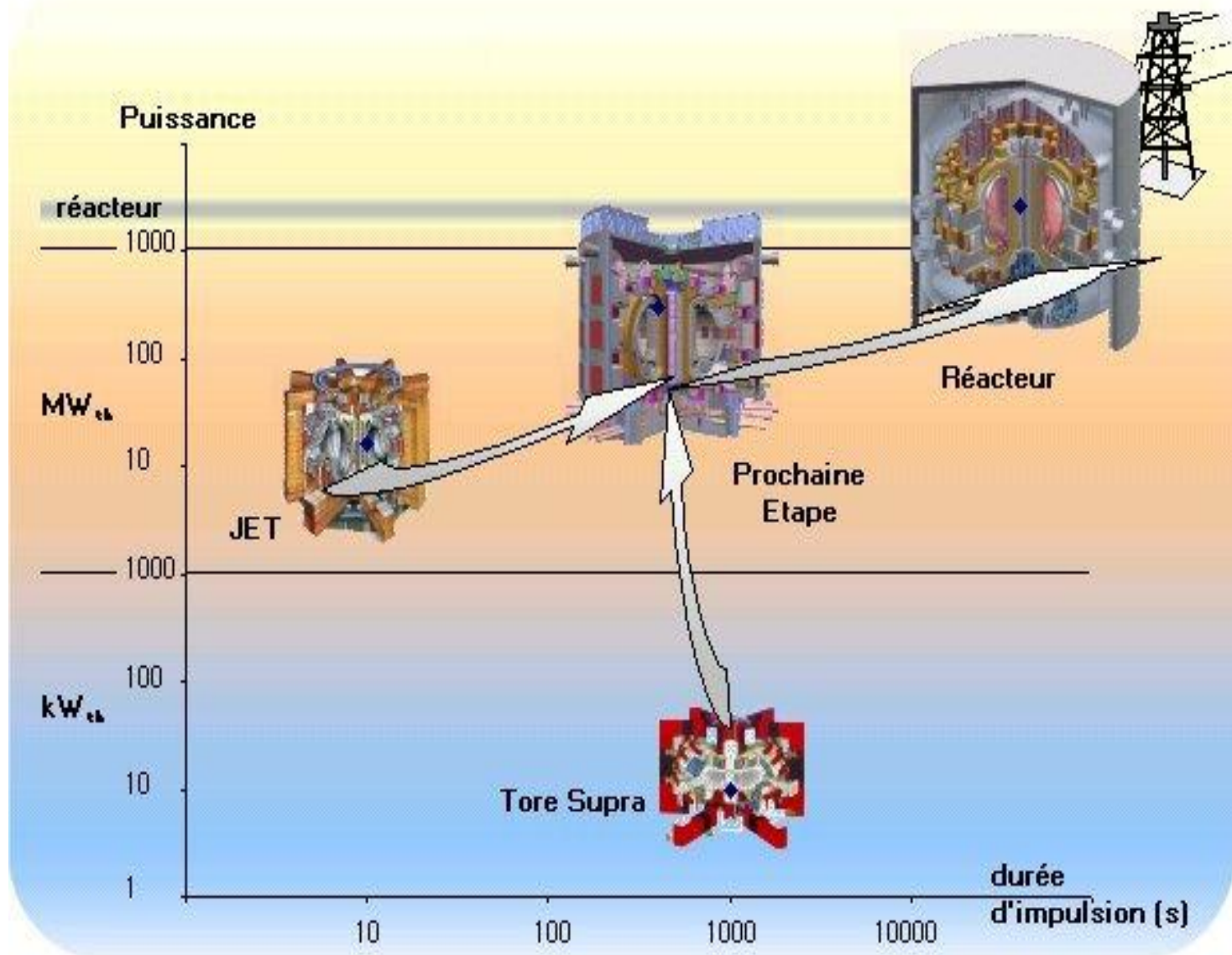
...ma anche (?)

IFMIF e DEMO

Nell'ambito del Broader Approach

5 Febbraio 2007

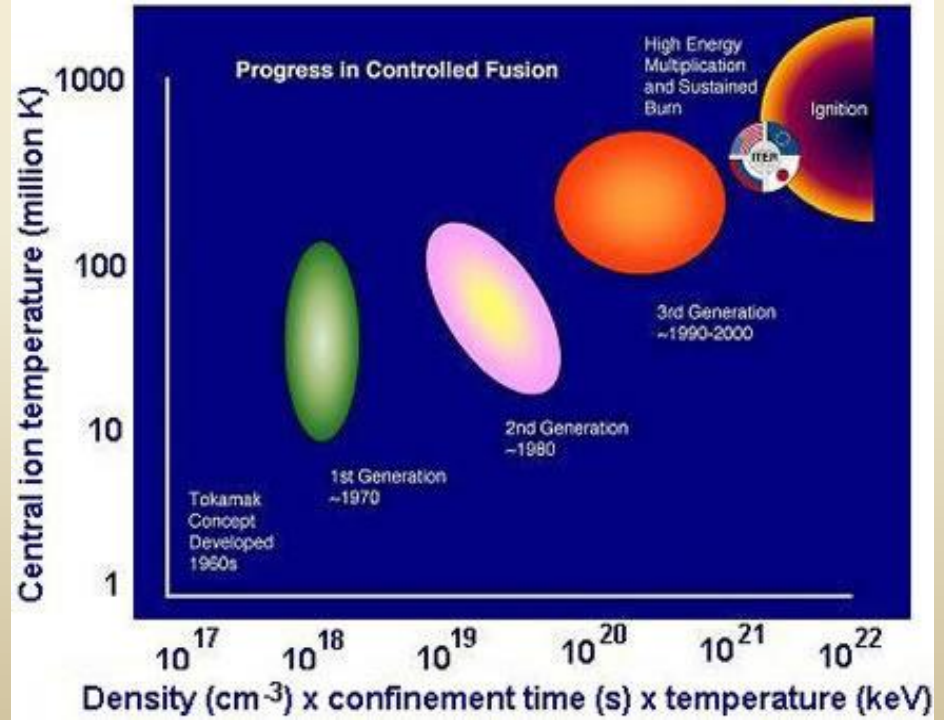
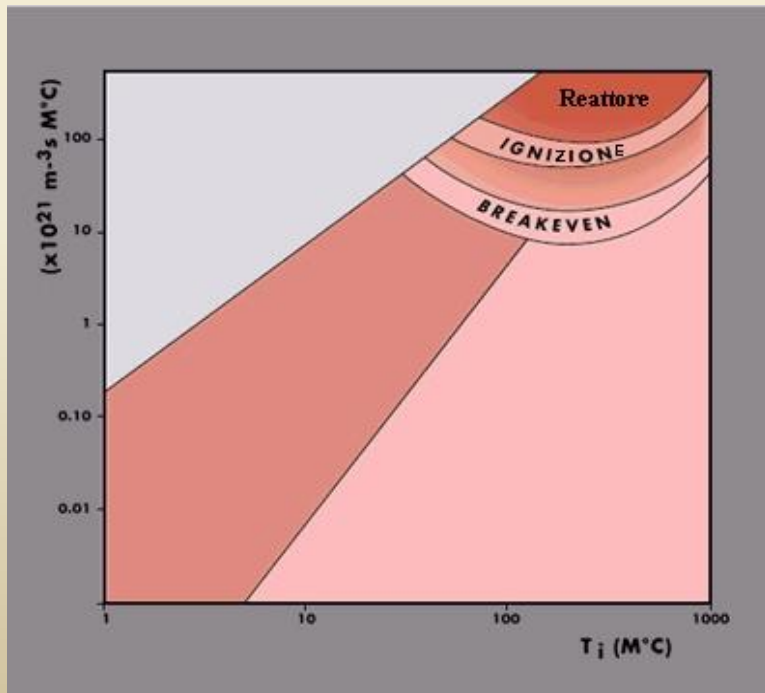
Japan and EURATOM sign a partnership agreement for the joint implementation of the Broader Approach Activities in the field of fusion energy research



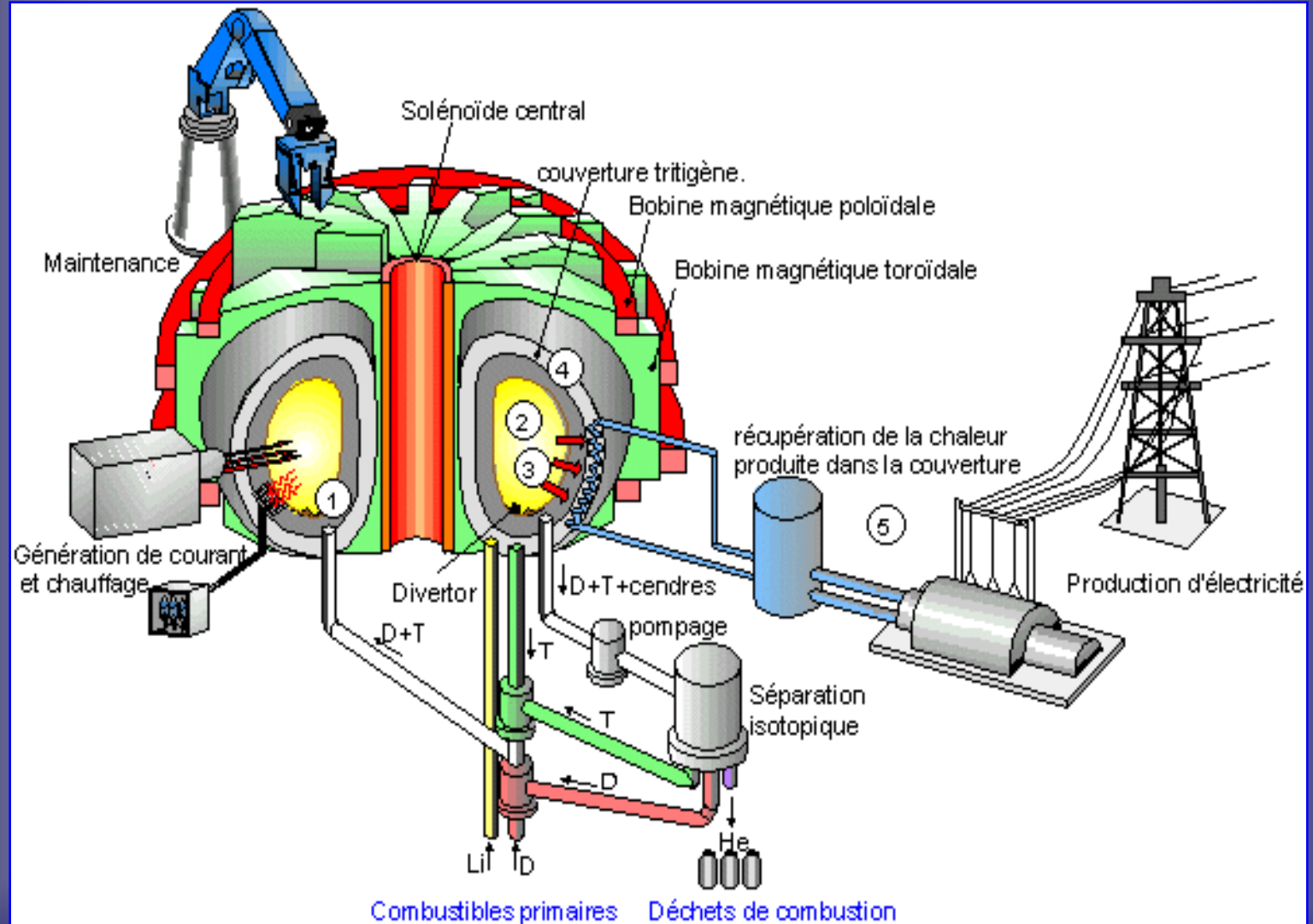
Condizioni per la realizzazione del reattore a fusione

Il cammino per arrivare alla realizzazione del reattore a fusione prevede il raggiungimento di alcuni obiettivi fondamentali in sequenza:

- il breakeven, in cui l' energia generata dalla fusione eguaglia quella immessa dall' esterno per mantenere il plasma a temperatura termonucleare. *Il breakeven dimostra la fattibilità scientifica del reattore a fusione*;
- l' ignizione in cui si ha l' autosostentamento della reazione di fusione, ad opera dei nuclei di elio prodotti;
- la fattibilità tecnologica quando, il rendimento netto di tutto l' impianto è positivo.



DEMO : réacteur démonstrativo



IFMIF : sorgente intensa di neutroni per prove di irraggiamento materiali



Perchè un grande interesse per fissione e fusione ?

Combustibile	Valore energetico	Petrolio equivalente
1 tonnellata di petrolio	42 GJ	1 tep
1 tonnellata di carbone	29.3 GJ	0.69 tep
1000 m ³ di gas naturale	36 GJ	0.86 tep
1 tonnellata di Uranio naturale (reattori ad acqua)	420 000 GJ	10 000 tep
1 tonnellata di combustibile D-T (Trizio prodotto a partire dal litio)	378 000 000 GJ	9 000 000 tep

Le **stime delle durate** di utilizzazione dei combustibili fossili riguardanti gli inventari attualmente conosciuti per produrre energia prevedono (all'incirca) 40 anni per il petrolio, 65 anni per il gas e 220 anni per il carbone. Tali durate possono probabilmente essere aumentate ma a prezzo di forti incrementi dei costi per le estrazioni.

C'è però il grande problema della produzione di CO₂ dalla combustione dei combustibili fossili.

CONCLUSIONI

La produzione energetica basata sull'utilizzo dei combustibili fossili diventa sempre più difficile a causa dell'esaurimento delle materie prime e per l'aumento dei costi per la loro estrazione.

Le energie rinnovabili (idroelettrica, sfruttamento delle maree, geotermica, eolica, solare) hanno certamente un potenziale di sviluppo considerevole, soprattutto in considerazione del loro basso impatto

ambientale ma hanno notevoli limiti nella produzione di grandi quantità di energia "centralizzate" per l'utilizzo industriale e per regioni ad elevata densità di popolazione.

Una giusta integrazione delle caratteristiche della fonte energetica che tenga conto dei vari aspetti (economico, sicurezza, disponibilità di materie prime, basso impatto ambientale) è indispensabile.

L'energia da fusione nucleare risponde a tutte queste esigenze.

La sua fattibilità resta comunque da dimostrare: questo è il grande obiettivo del progetto (e dell'impianto) **ITER**.

