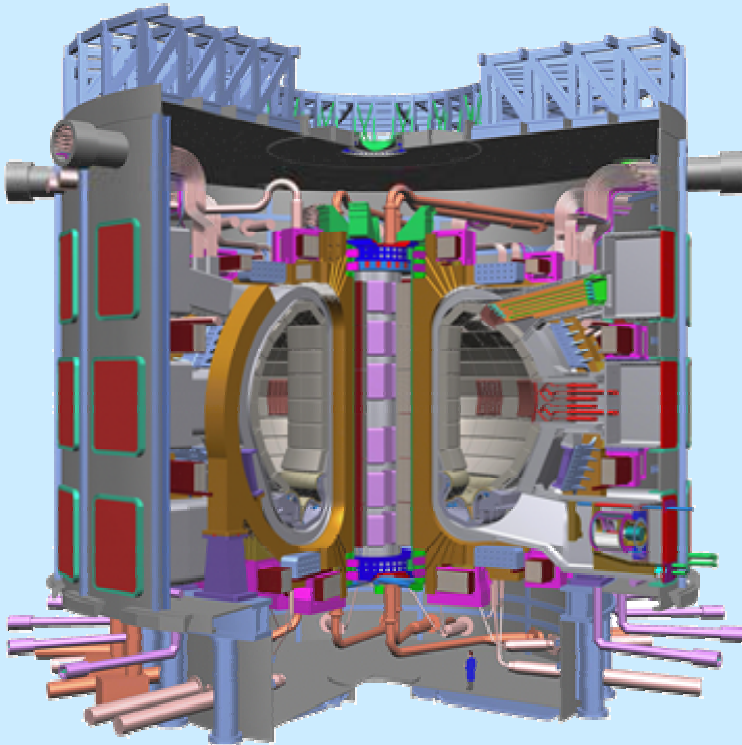


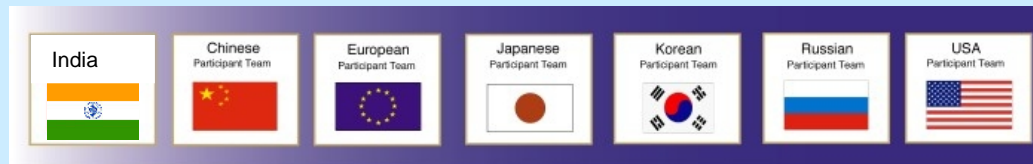
ITER, Energia nuclear de Fusió



Prof. Ph.D. Javier Dies

Catedràtic d'Universitat d'Enginyeria Nuclear

Fusion Energy Engineering Laboratory (FEEL)
Departament de Física i Enginyeria Nuclear (DFEN)
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



- **ITER és el segon projecte de recerca i desenvolupament d'àmbit internacional més gran del món, darrere de l'Agència Internacional de l'Espai.**
- **Aquest gran centre tecnològic representa una inversió de 4500 milions d'Euros i comptarà amb la presència d'entre 1000 i 3000 científics durant un període de recerca de 20 anys.**
- **Representa mes del 50 % de la població del mon.**
- **Cal entendre aquest projecte com un gran parc tecnològic internacional, on es desenvoluparan els aspectes novedosos relatius a: nous materials, superconductivitat, robòtica, càlcul numèric, termotècnia, enginyeria nuclear, enginyeria elèctrica i electrònica, física de plasmes, computació, control remot, comunicacions, etc.**

L'objectiu d'ITER és demostrar la viabilitat científica i tecnològica de l'energia de fusió per proveir les necessitats energètiques de la nostra societat.

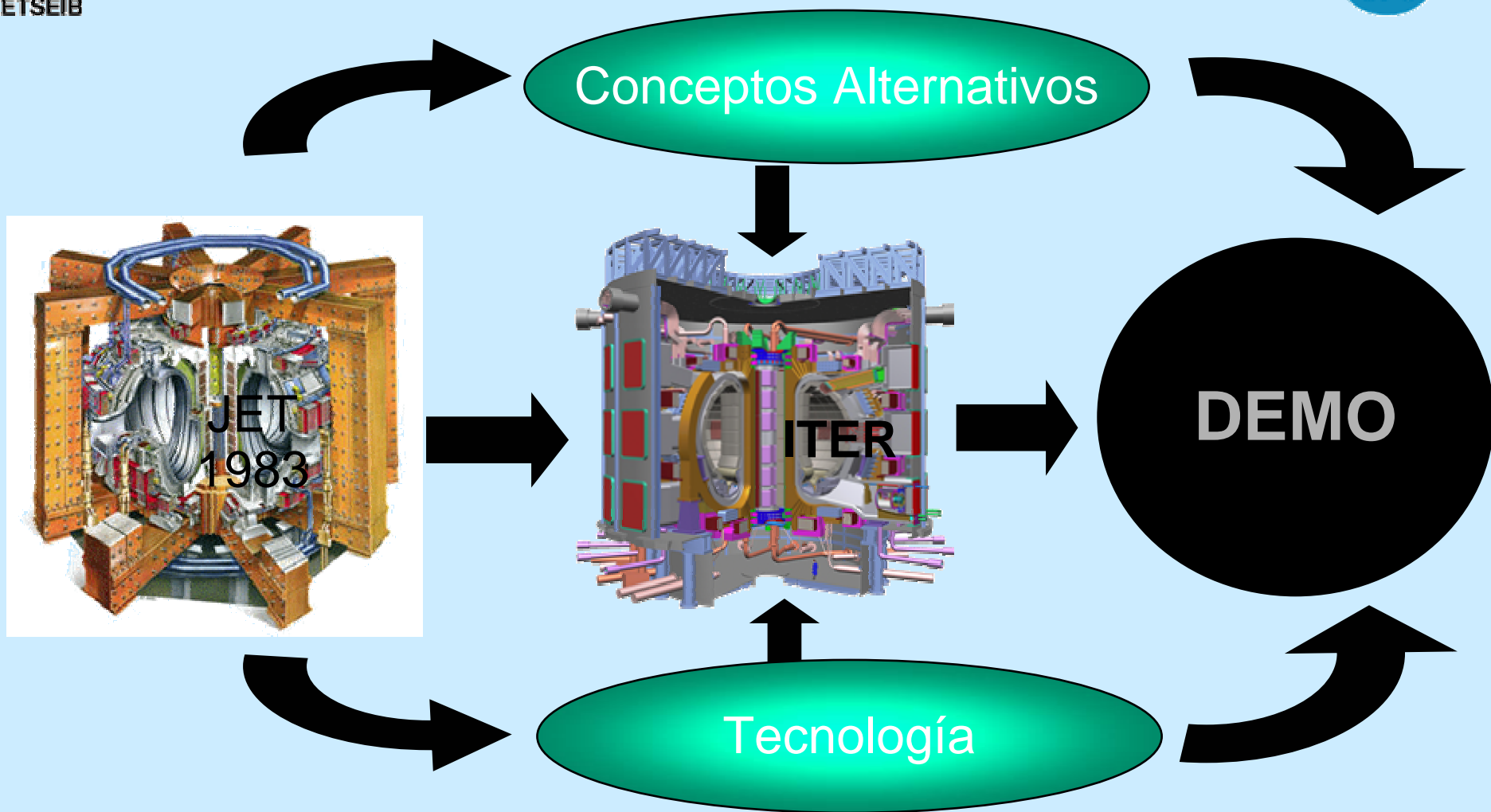
Inicialment quatre candidats per hostatjar ITER.

Japó

Espanya

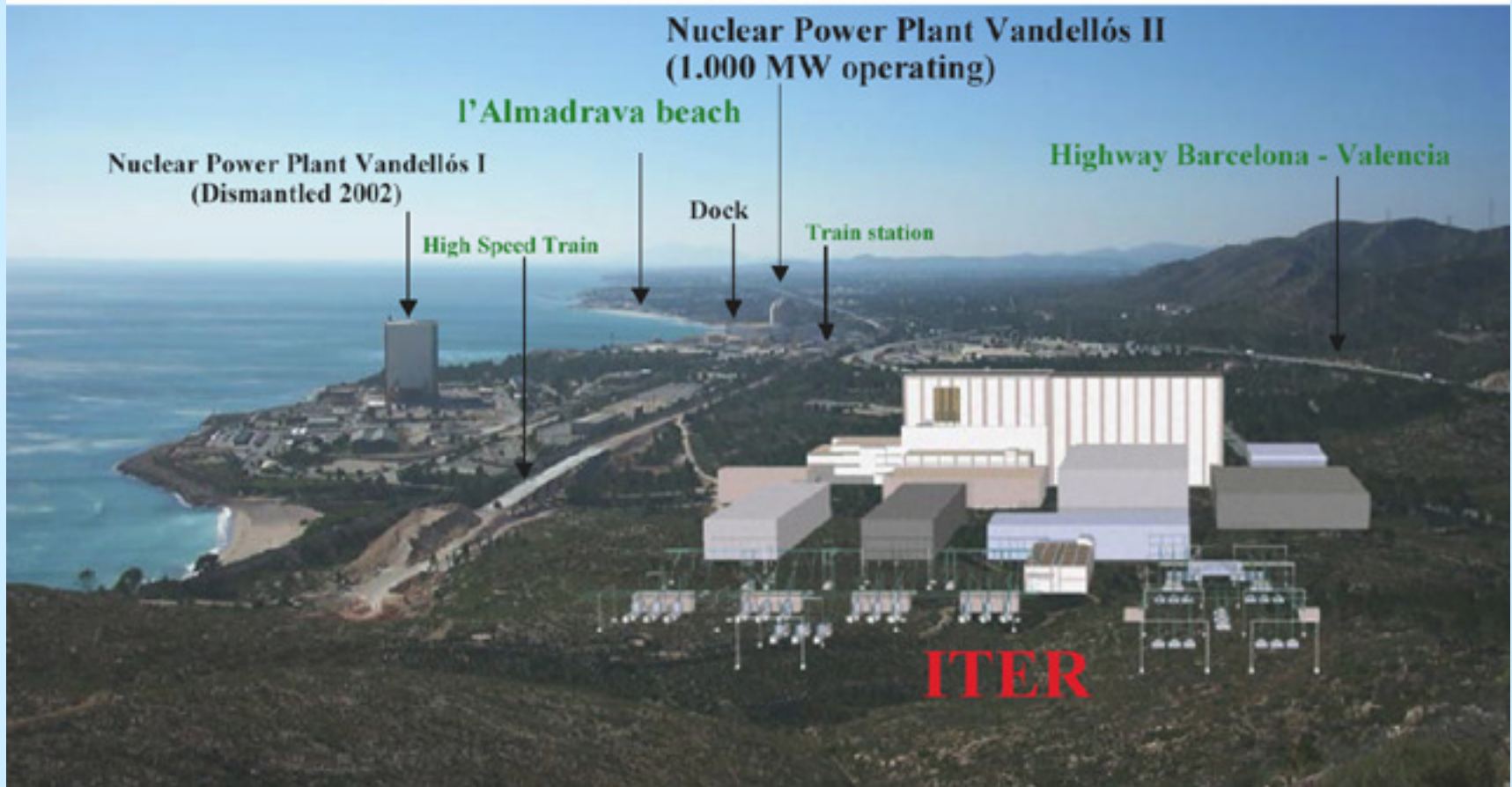
França

Canadà



Estrategia Europea

月桂樹の里 Valley of Laurels Долина Лавров
Vandellos



Emplazamiento de ITER en Vandellòs (Tarragona). Distribución virtual de los edificios que constituyen el proyecto ITER sobre el emplazamiento propuesto .



26-11-2003 La candidatura Europea (el reactor a Cadarache y la Agencia Europea del ITER en Catalunya).

20-12-2003 Elegir una entre las dos candidaturas: la candidatura del Japón a Rokkasho o la candidatura Europea.
EEUU, Japón, Corea Sur → Japón
Rusia, China, Europa → Europa

**•32 EPS Conference on Fusion, Plasma Physics, Tarragona, Spain.
Juliol 2005.**

**800 participants
40 Paisos.**

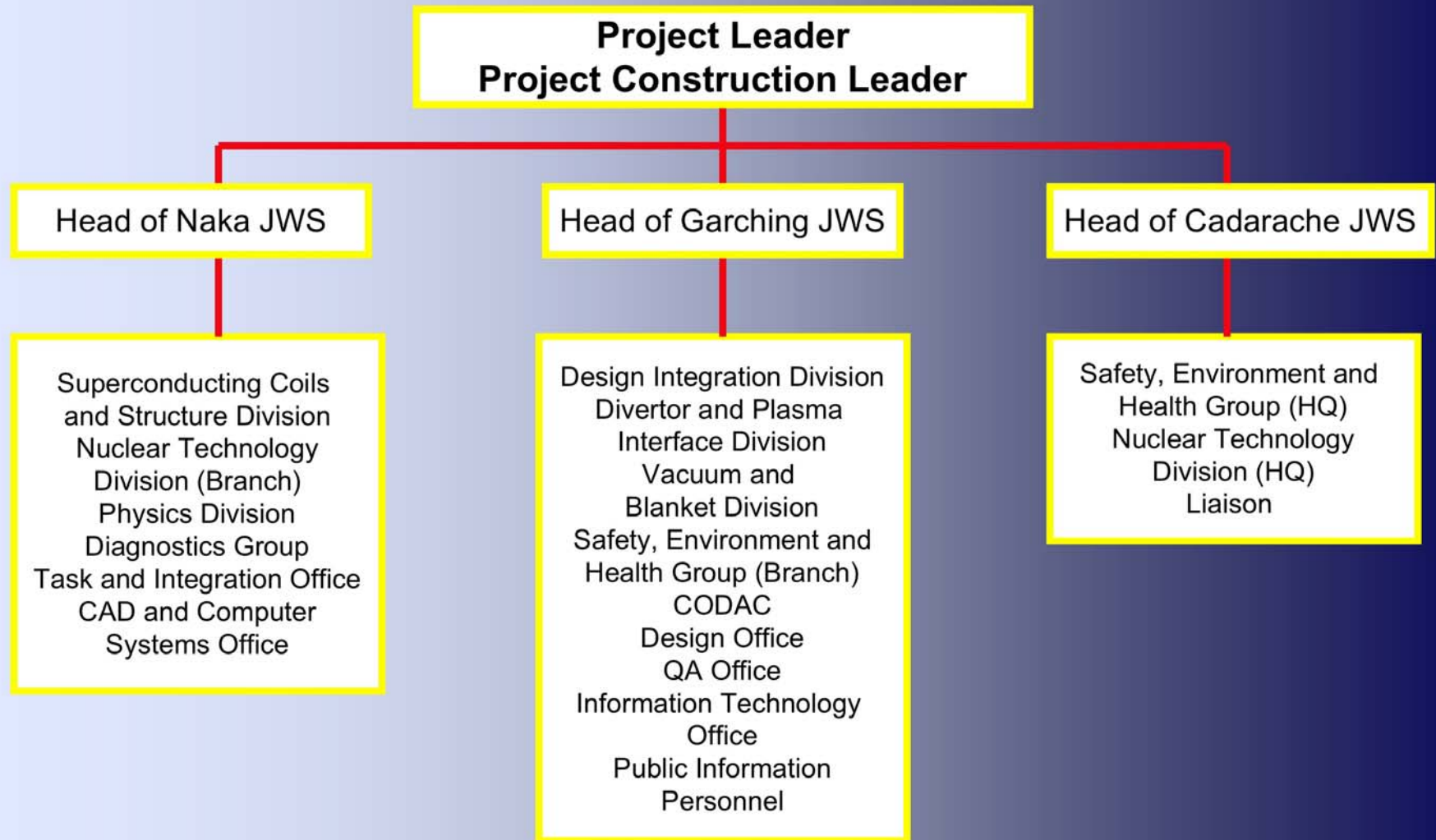
28-junio-2005. decisió ITER a cadarache.

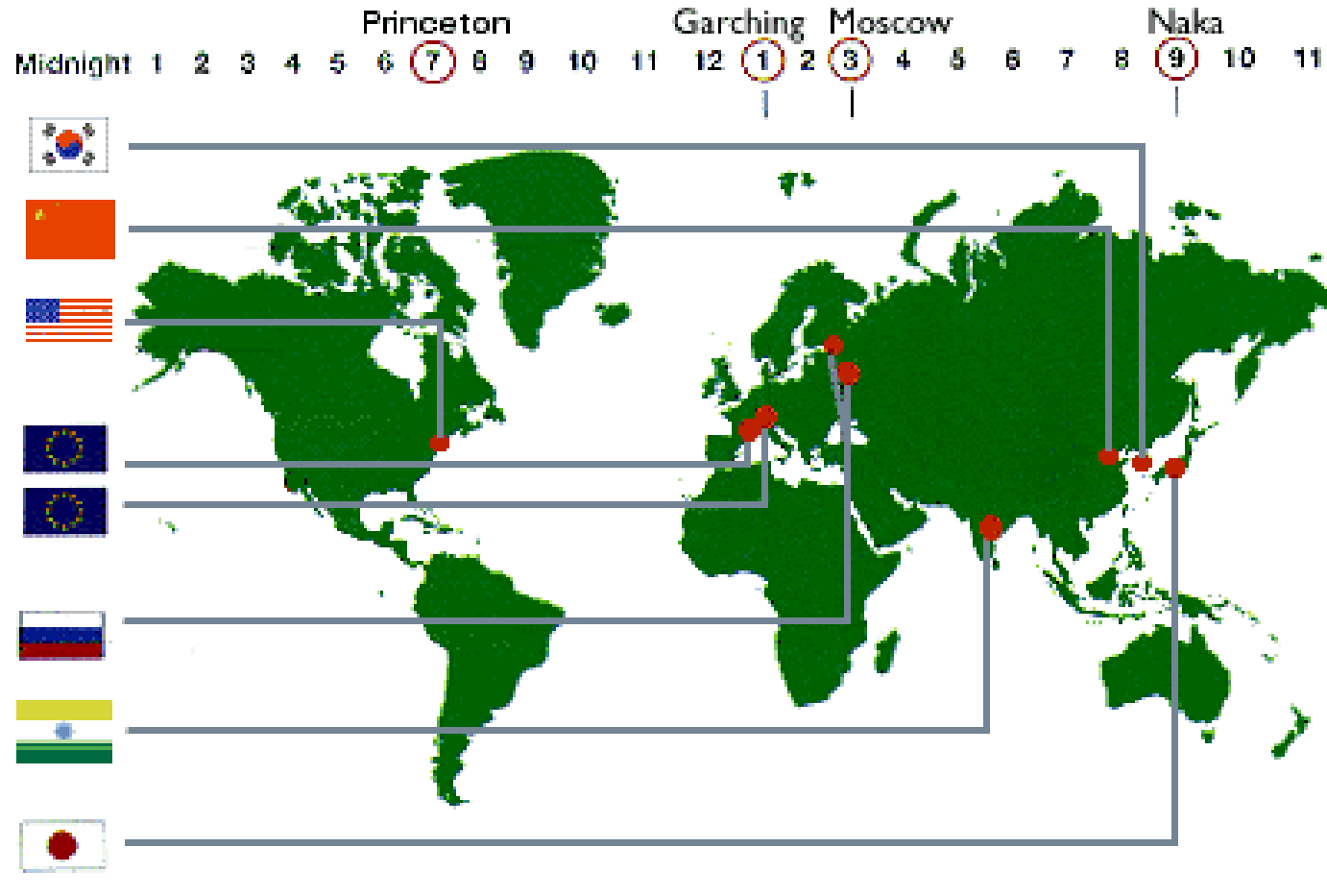
**•1-Septiembre-2005 Inauguración Agencia Europea del ITER en
Barcelona, EFDA-CSU-BCN, Campus del Besos.**

•24-mayo-2006, firma tratado internacional de construcción ITER

•Juliol -2006, finaliza el nombramiento equipo directivo, ITER.



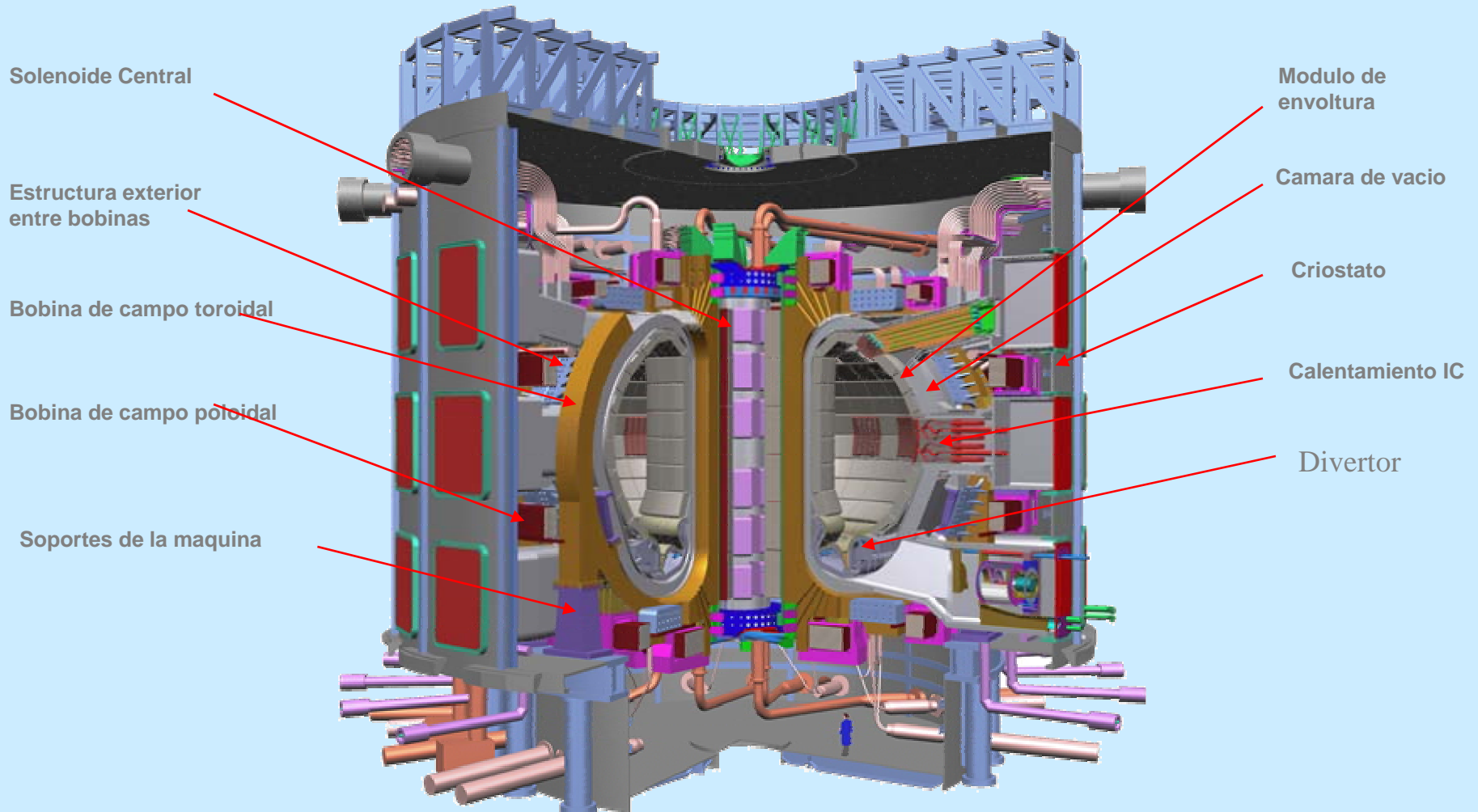




ITER

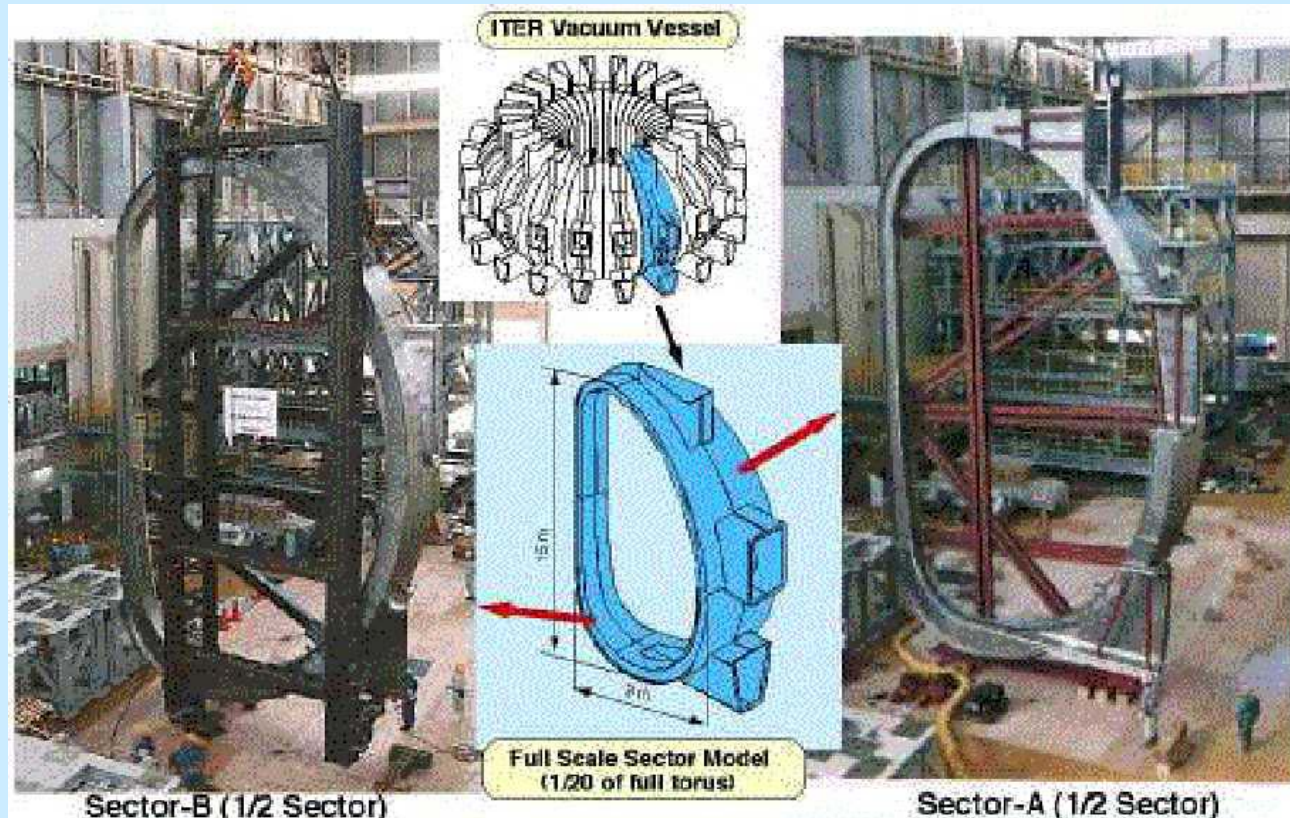
Potencia de total de fusión	500 MW (700 MW)
$Q = \text{potencia de fusión} / \text{potencia inyectada}$	≥ 10 (inductivo)
Tiempo de quemado de un plasma inductivo	≥ 400 s
Radio mayor del plasma, R	6.2 m
Radio menor del plasma, a	2.0 m
Corriente del plasma I_p	15 MA
Campo magnético toroidal, B	5.3 T
Volumen del plasma	837 m ³
Superficie del plasma	678 m ²
Flujo neutrónico sobre la pared	0.57 MW/m ²
Sistemas de calentamiento auxiliares instalados	73 MW
Coste	≈ 4500 M €

Diseño y principales características de ITER

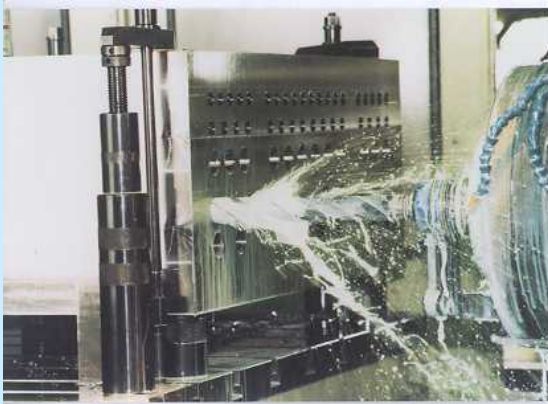




Actividades de I+D ya realizadas relativas a las bobinas magnéticas del solenoide central del tokamak [3]



Modelo a escala 1:1 de un sector de la Camara de Vacio de ITER. Se ha construido con una precisión en las dimensiones de ± 3 mm



Drilling of forged steel block
(Shield block cooling channels)



Bending of ice-plugged steel block
(10,000 ton press machine)



Steel block after solution heat treatment
(1010-1054 °C)



Assembly of steel tubes and DS Cu plates



Final assembly of FW and shield block

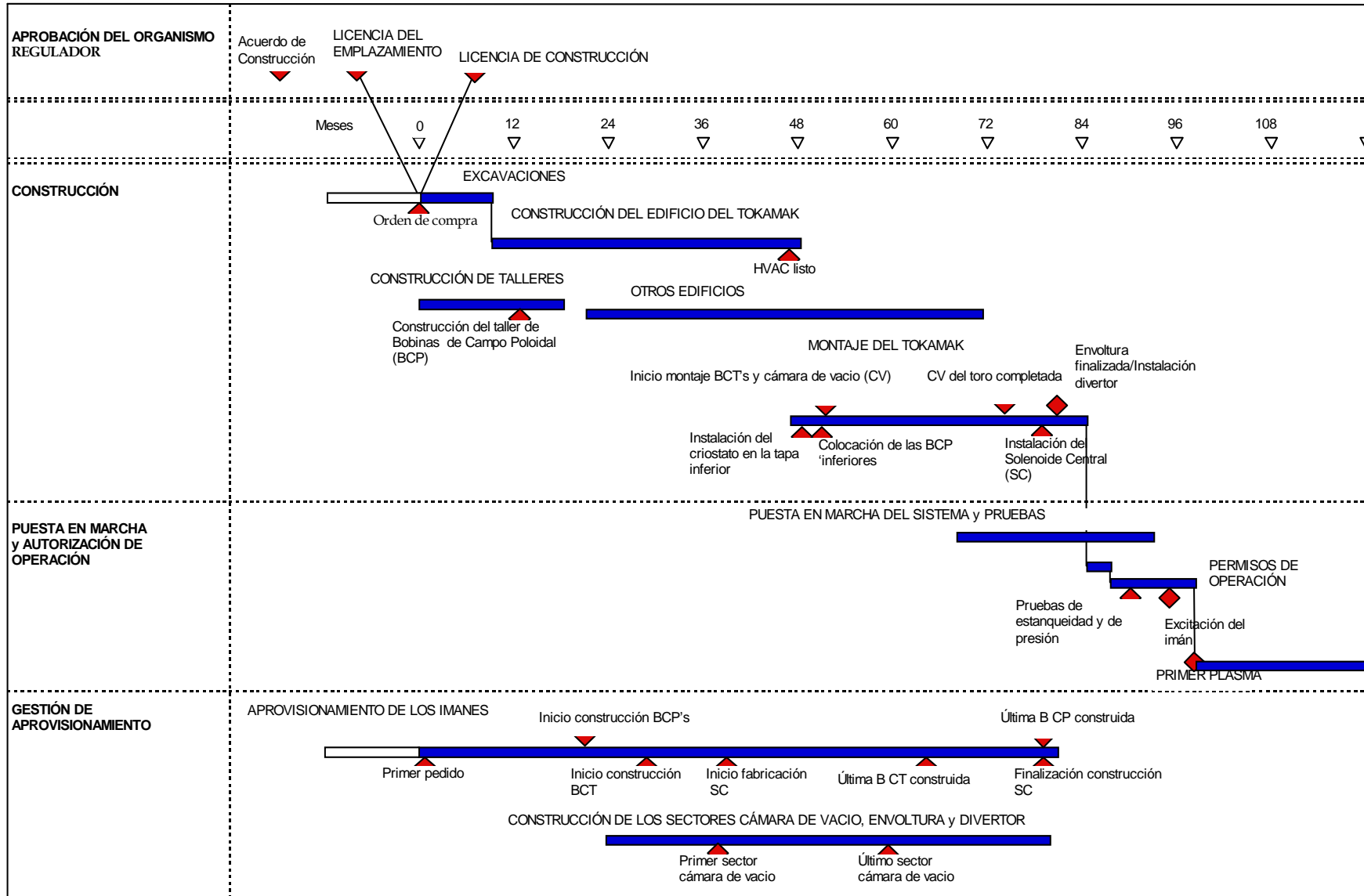


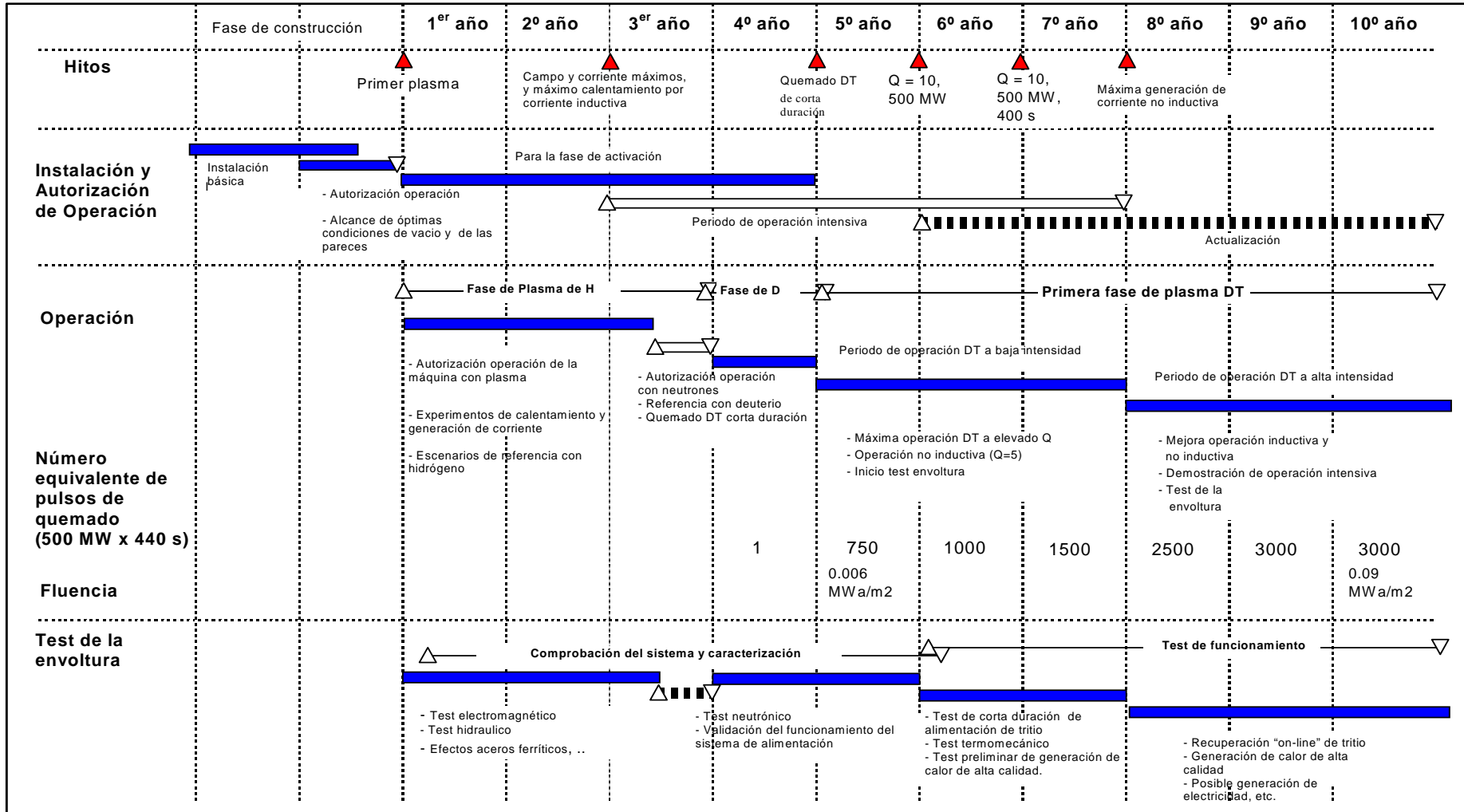
Canning for HIPing

Actividades de investigación y desarrollo realizadas en torno a la envoltura de ITER[3].

Costes directos de construcción	\$Millones (Enero 89)	% del total
Sistemas magnéticos	762	28
Vasija, envoltura, divertor, sistemas de bombeo, alimentación combustible	505	18
Sistema de refrigeración y blindaje térmico	105	4
Montaje	93	3
Sistemas auxiliares	586	21
Edificios	380	14
Sistemas de calentamiento auxiliares (73 MW)	206	7
Diagnósticos	118	4
Total costes directos de construcción	2755	100

Costes globales	
Costes de construcción	\$Millones (Enero 89)
Costes directos de construcción	2755
Personal de dirección y personal de soporte	477
Investigación y desarrollo durante la construcción	≈70
Suman	3302
Costes anuales de operación	
Personal permanente	60
Energía	≈30
Combustible	≈8
Mantenimiento y mejoras	≈90
Suman	188
Desmantelamiento	335







Mes informació ITER:

- www.iter.org
- www.efda.org
- www-sen.upc.es/fusion
- **Curs de doctorat UPC, fusió nuclear, ITER. (FEEL-UPC)**
- **ALE, fusió nuclear, ITER. (FEEL-UPC)**
- **33 EPS Conference on Fusion, Plasma Physics, Roma, del 18 al 22 de juny 2006.**
- **19 i 20 de juliol 2006, seminari ITER, Campus del Besos.**
- **24th Symposium on fusion technology (SOFT), 11 al 15 de setembre de 2006, Warsaw, Polònia.**
- **21st IAEA Fusion Energy Conference, 16-21 octubre, China.**



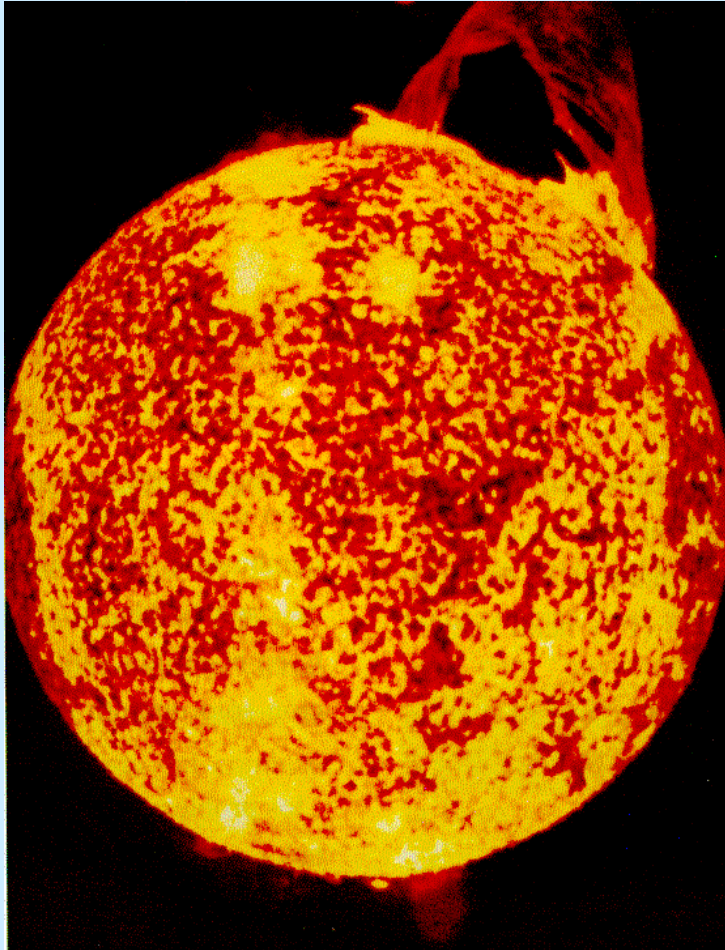
**•1-Septiembre-2005 Inauguración Agencia Europea del ITER
en Barcelona, EFDA-CSU-BCN, Campus del Besos.**



Agencia Europea de Fusió a Barcelona (Campus del Besos)

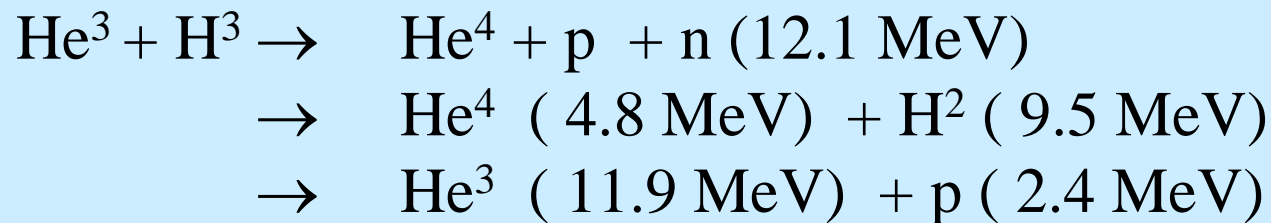
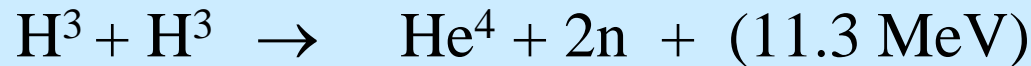
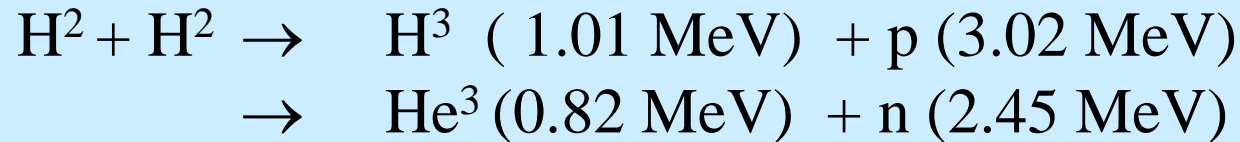
- 3 plantes del edifici torre diagonal litoral.
- 15 persones → 120-140 persones.
- Gestionarà el programa europeu de fusió:
 - part Europea del ITER, 2000 M€
 - funcionament de JET
 - diferents reactors de fusió europeus; W7-X, TJ-II
- Curs 2005-2006 membres de l'agencia han donat classe a l' assignatura de doctorat, i ALE de la UPC.
- Desembre 2005 workshop europeu al Palau de Congressos de Catalunya, participació de la indústria a ITER.
- Serà mes fàcil per la indústria local participar a ITER

- Prestigio para Barcelona/Sant Adria. Agencia Internacional en un tema de muy alta tecnología.
- Numerosas reuniones relativas al ITER tendrán que hacer se en esta Agencia.
- La industria local tendrá más facilidad para participar en este billonario proyecto.
- Los ingenieros locales tendrá más facilidad para trabajar en la Agencia, y en el propio ITER. (hasta ahora la participacion española es pequeña).
- Grupos universitarios tendrán más facilidad de participar en el programa de I+D+I.
 - Se deberia potenciar el Fusion Energy Engineering Laboratory (FEEL)



En el interior del Sol, toneladas de hidrógeno se convierten en helio cada segundo. Son reacciones de **fusión termonuclear** que liberan suficiente energía para hacer posible la vida en la Tierra.

PRINCIPALES REACCIONES



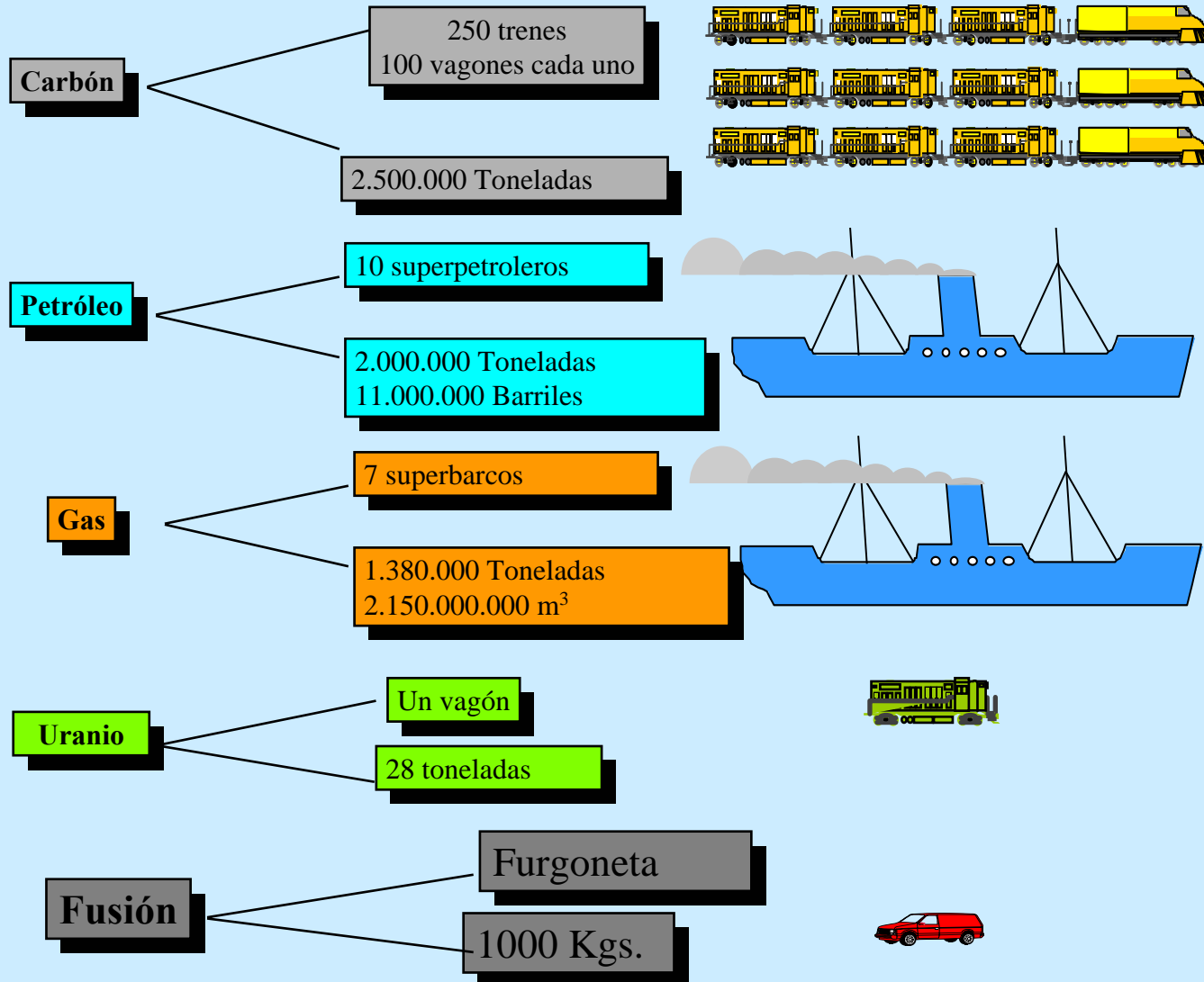
COMBUSTIBLE: DEUTERIO

- Deuterio $\equiv \text{H}^2$
 - $V = 0.015 \%$
 - Abundancia de agua $\Rightarrow \text{H}^2$
 - **1 Litro de $\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 300$ litros de petróleo**
 - $6 \text{H}^2 \rightarrow 2 (\text{He}^4 + \text{H}^1 + \text{n}) + 43.2 \text{ MeV}$
- Fácil separación isotópica
 - $M(\text{H}^2) = 2 M(\text{H}^1)$

COMBUSTIBLE: TRITIO

- Reacción deuterio-tritio \longrightarrow más fácil
- Tritio
 - No existe en la naturaleza
 - Isótopo radioactivo del H (T=12 a)
 - Difusión a través de cualquier material
- Reacción D+T produce n de 14,2 MeV
- 80% de la energía corresponde a neutrones

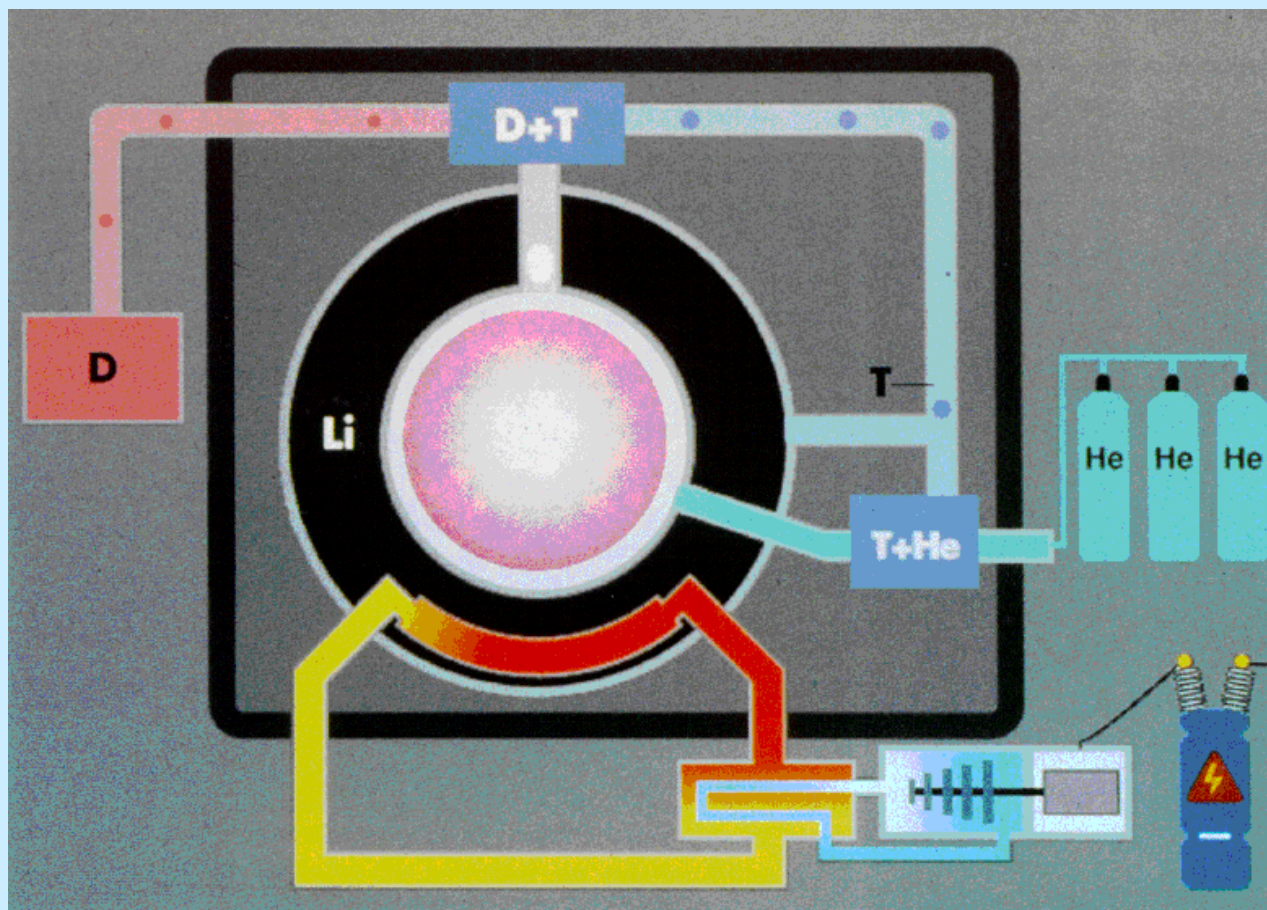
Comparación del consumo de combustible de cinco centrales eléctricas. Todas ellas con una potencia eléctrica de 1000 MWe y que funcionan continuamente todo el año y por tanto generan 8.760.000 MWh de electricidad.



PRODUCTOS DE FUSIÓN

- **No radiactivos**, excepto el Tritio (se recicla, combustible)
- **No genera CO₂** ⇒ Disminuye el calentamiento global
- **No contaminación atmosférica** ⇒ Disminuye la lluvia ácida

PLANTA PRODUCTORA DE ENERGIA DE FUSION



VENTAJAS

- Sistema **intrínsecamente seguro**, sin riesgo de pérdida de control de la combustión.
- Calor residual desaparece en **decenas de segundo**.
- El reactor contiene cantidades muy pequeñas de combustible (10 gramos aproximadamente).
- La activación de la estructura tiene una **duración inferior a 100 años**.
- Combustibles **abundantes, baratos y ampliamente distribuidos por la geografía mundial**.
- No requiere el uso de grandes extensiones de terreno.

VENTAJAS

- Las cantidades de combustible y cenizas son muy pequeñas (unos pocos centenares de kilogramos por año y reactor).
- Permite el almacenamiento de energía a gran escala.
- Puede ser utilizada para producir electricidad o hidrogeno.
- Puede suministrar energía para desalinizar.
- Puede contribuir a la **SEGURIDAD** del suministro energético de España, Europa,...

REQUERIMIENTOS

- Calentar plasmas a **100 M K**
- Confinar a **$n \tau > 10^{20} \text{ s/m}^3$**
- Sistema continuo:
 - Alimentar combustible
 - Extraer productos de fusión
 - Extraer impurezas
- Seguridad y economía

SISTEMAS CONFINAMIENTO

- **No sirven paredes convencionales**
 - Deterioro de la pared
 - Átomos superficiales contaminarían el plasma
- **Confinamiento magnético**
 - Partículas del plasma tienen carga:
 - $\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$
- **Campo uniforme:** las partículas confinadas en sentido perpendicular a las líneas de campo.

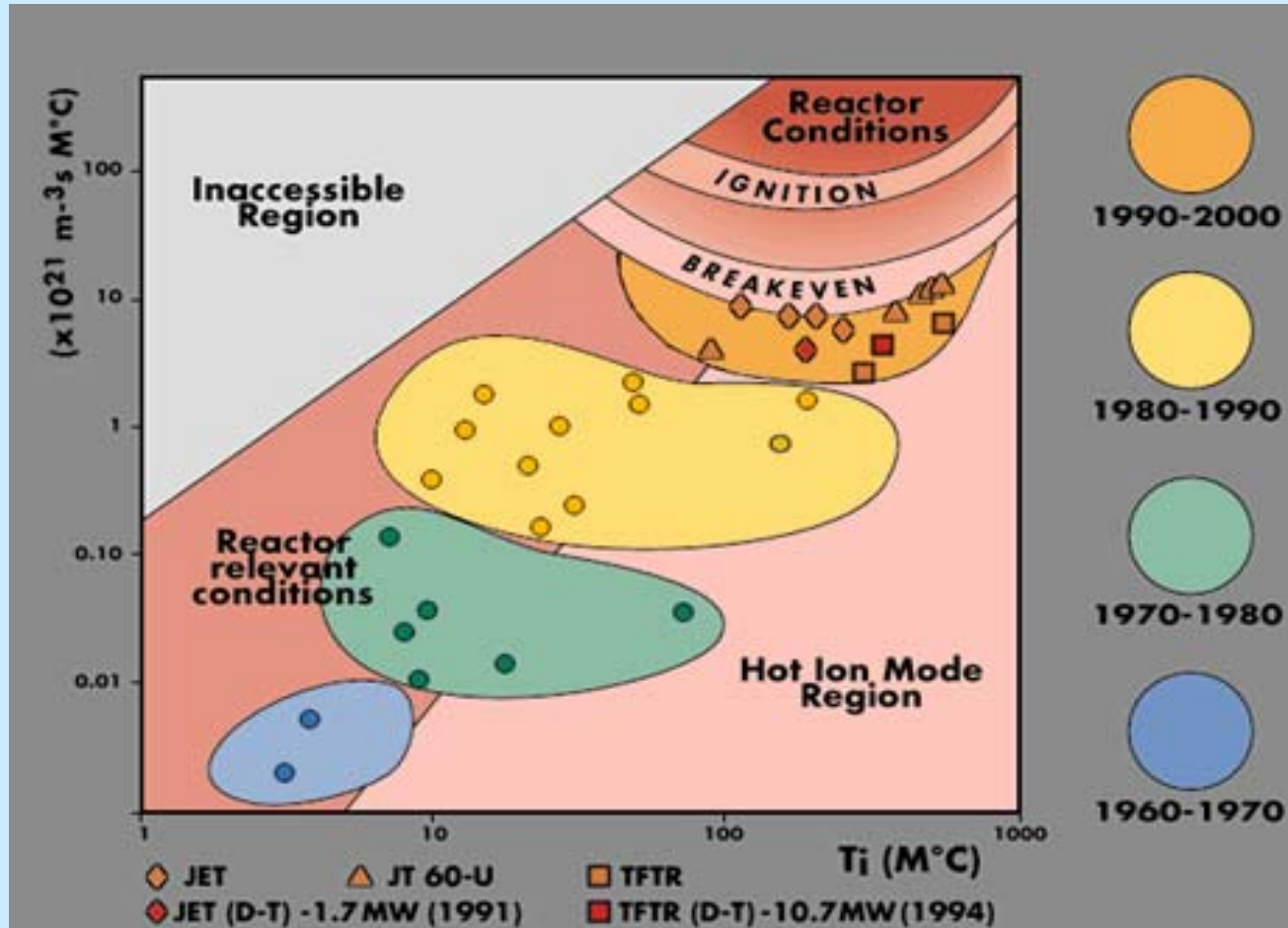
BREVE HISTORIA

- **1929** Proceso energético básico en las estrellas
- **1925** Primera fusión: colisión D acelerado
- **1950** Truman decide construcción bomba H
- **1952** Primera explosión
 - Estudios fusión secreto militar
- **1958** Conferencia Ginebra “**Átomos para la paz**”
 - Inicio colaboración internacional
- **1958** Aparato experimental “ZETA” (UK)

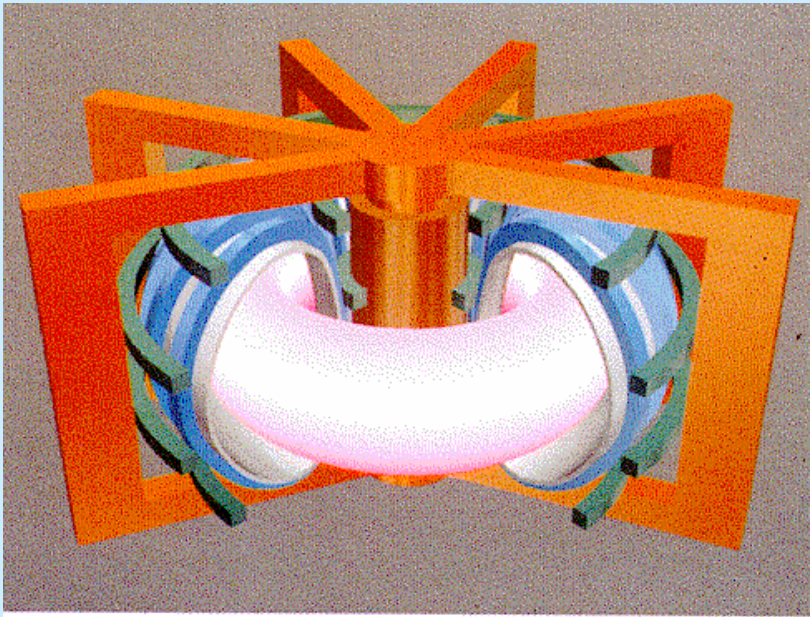
- **1960** Retorno a la física del plasma
- **1968** Congreso Novosibirsk
 - Presentación del **TOKAMAK**
- **1974** Empresa KMS → Fusión inercial
- **1982** TFTR Tokamak Fusion Test Reactor
- **1983** JET Joint European Torus
- **1985** JT-60
- **1986** MFTF-B Mirror Fusion Test Facility B

- **1988** Tore-Supra (bobinas sepeerconductoras)
- **1991** Se consigue fusión en el **JET**
- **1993** Se consigue fusión en el **TFTR**
- **1997** Triple récord en el **JET**
($P_{fus} = 16 \text{ MW}$, $E = 21 \text{ MJ}$, $Q = 65\%$)
- **1997** Se pone en marcha el stellarator **TJ-II**
- **1998** Primeros plasmas del stellarator **LHD**
- **2002** Francia, España, Japon y Canada candidatos a alojar **ITER**.
- **2015** Fecha prevista para el funcionamiento de **ITER**

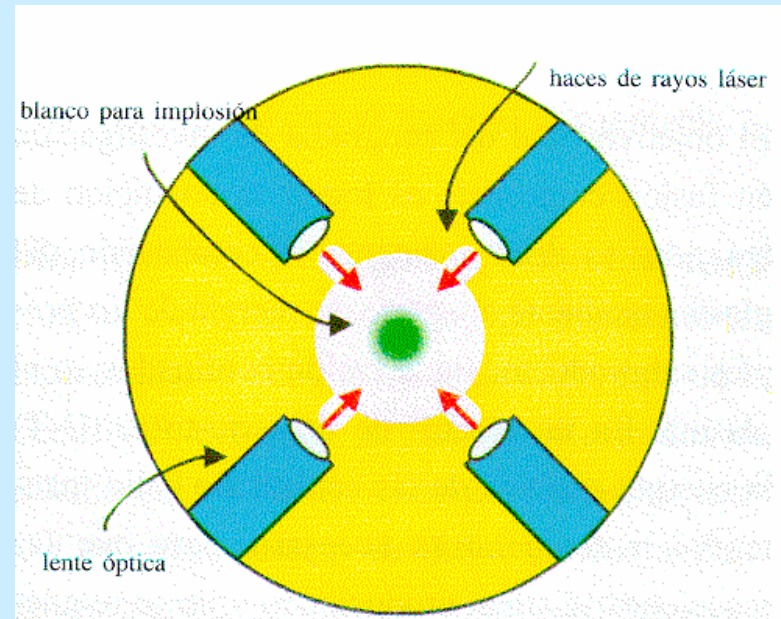
PROGRESO Y ESTADO ACTUAL



TIPOS DE CONFINAMIENTO



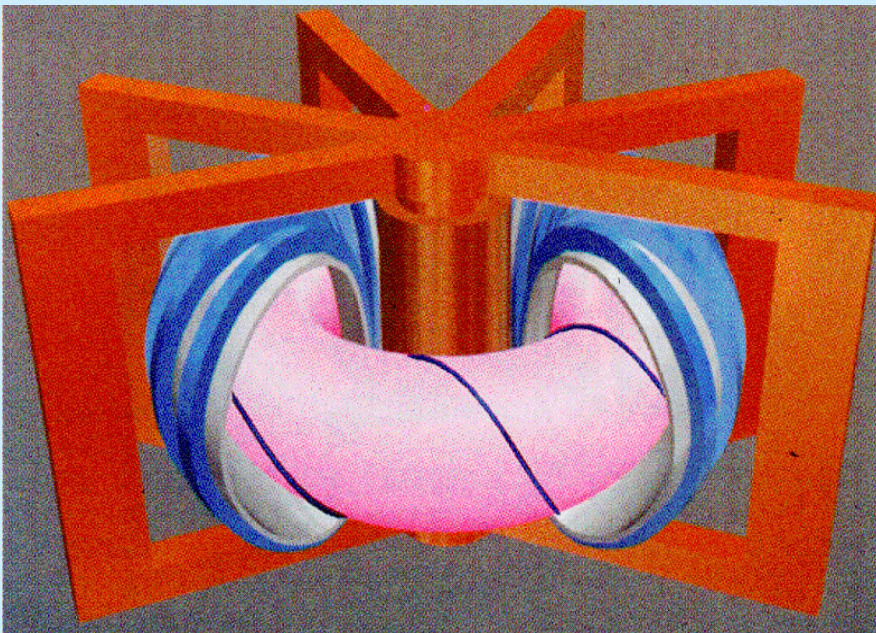
Esquema de principio representando el confinamiento magnético tórico (aquí un tokamak). El plasma tiene la forma de un anillo y se mantiene alejado de las paredes de la cámara



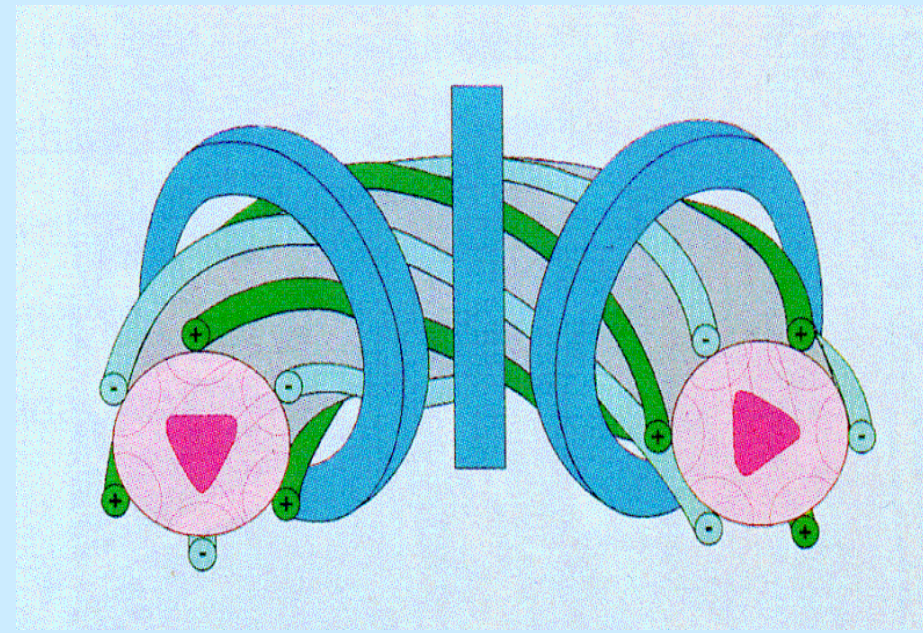
Esquema de principio de irradiación de un blanco mediante haces de rayos láser. Los haces comprimen y calientan el blanco; después de la implosión, la explosión lleva la energía hacia las paredes

CONFINAMIENTO MAGNÉTICO

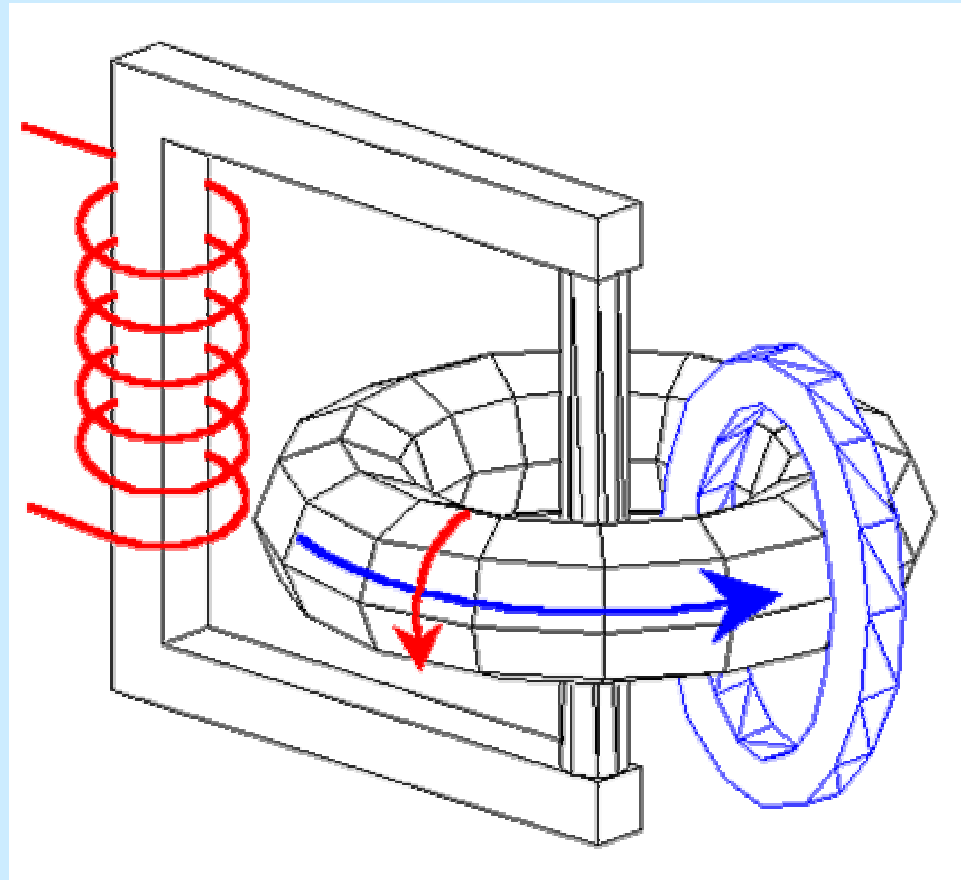
TOKAMAK

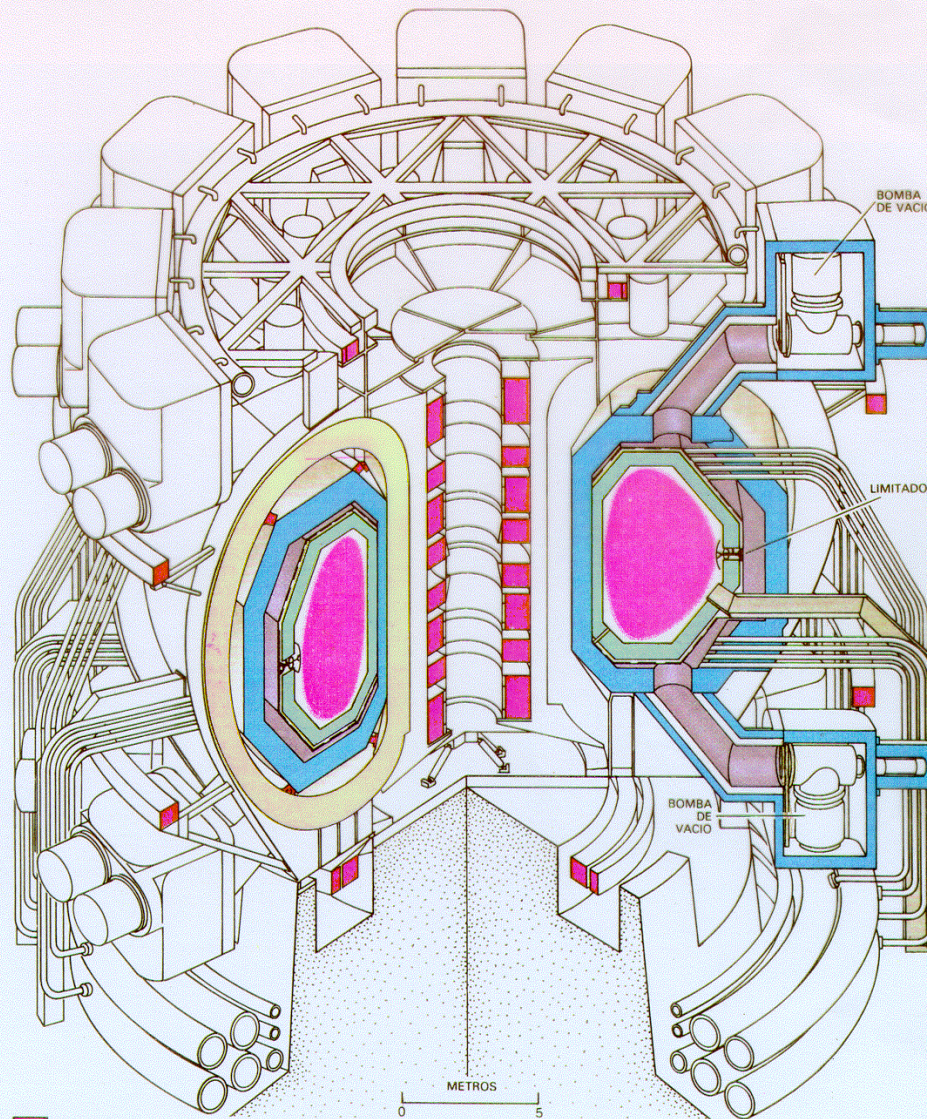


STELLARATOR



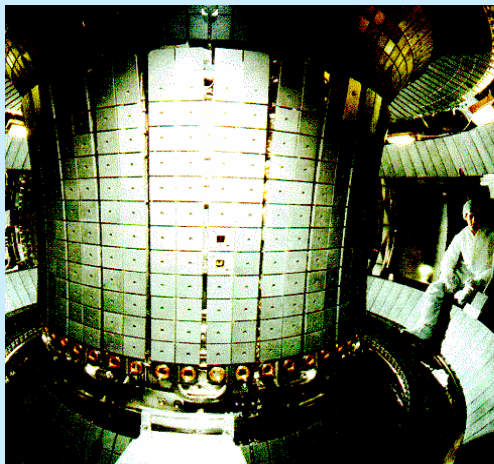
TOKAMAK



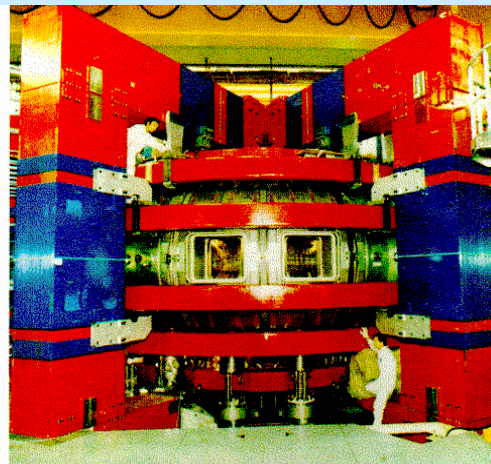


- PLASMA
- PRIMERA PARED Y ENVOLTURA
- BLINDAJE
- BOBINAS DE CAMPO TOROIDAL
- BOBINAS DE CAMPO POLOIDAL Y DE CALENTAMIENTO OHMICO
- CONDUCCION DE RADIOFRECUENCIA
- CONDUCTOS DE VACIO

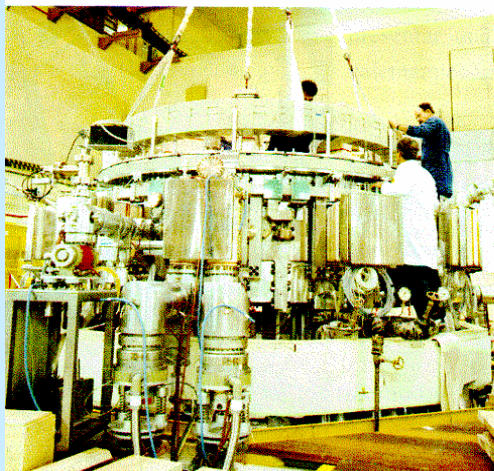
1. DISEÑO DE UN REACTOR DE FUSION STARFIRE tras dos años de estudio realizado en el Argonne National Laboratory; emplea campos magnéticos para confinar un plasma de fusión (gas de deuterio y tritio, isótopos pesados del hidrógeno, ionizados) dentro de una cámara toroidal. Se muestran dos secciones del toro. En el corte izquierdo se observa una de las 12 bobinas superconductoras que forman anillos alrededor del toro. Hay otras bobinas superconductoras, concéntricas con la cámara toroidal. El corte de la derecha enseña el equipo situado entre los arrollamientos anulares. Las bombas de vacío extraen el plasma, que está en contacto con un "limitador" que sobresale de la "primera pared" del reactor. Las tuberías conducen el refrigerante hasta la primera pared y la envoltura. Ciertos conductos guían ondas de radiofrecuencia a través de la envoltura. Estas ondas ayudan a dirigir la corriente en el plasma y colaboran en su calentamiento hasta una temperatura de decenas de millones de grados. En cada reacción de fusión, el deuterio y el tritio se combinan para producir un nuevo elemento, el helio, un neutrón y energía.



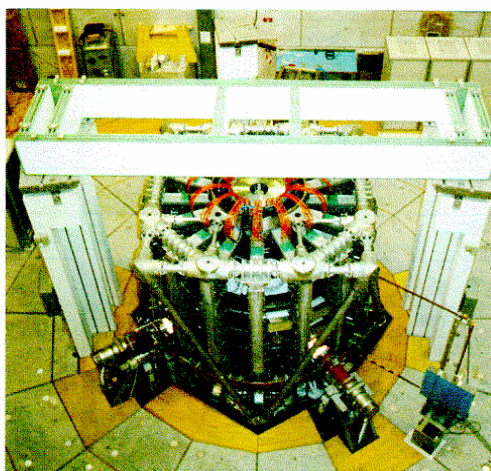
*ASDEX-U (interior del toro)
(Asociación Euratom-IPP, Garching, Alemania)*



*Tore Supra
(Asociación Euratom-CEA, Cadarache, Francia)*

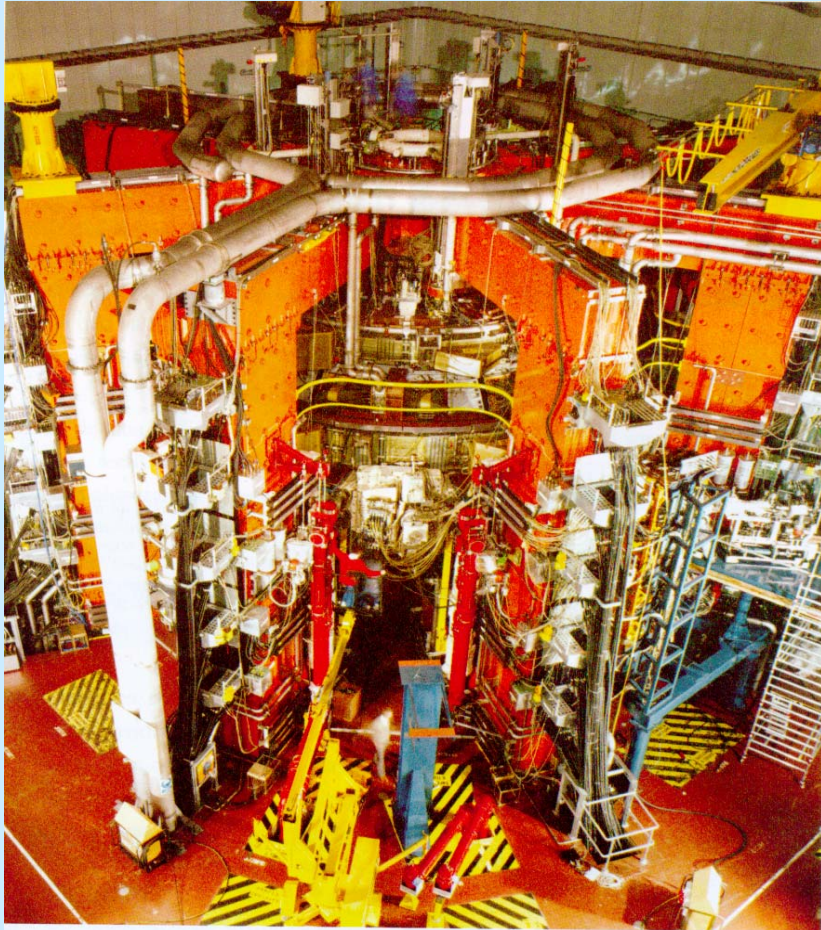


*FTU
(Asociación Euratom-ENEA, Frascati, Italia)*



*TCV
(Asociación Euratom-Suiza, Lausanne-Suiza)*

JET (Joint European Torus)



El tokamak europeo JET (Empresa Conjunta, Abingdon-Reino Unido), el mayor tokamak del mundo y el que ha obtenido mejores resultados

Es el mayor **tokamak** en funcionamiento

Características:

Radio mayor: 2.96 m

Radio menor: 1.25 m

Campo magnético: 3.45 T

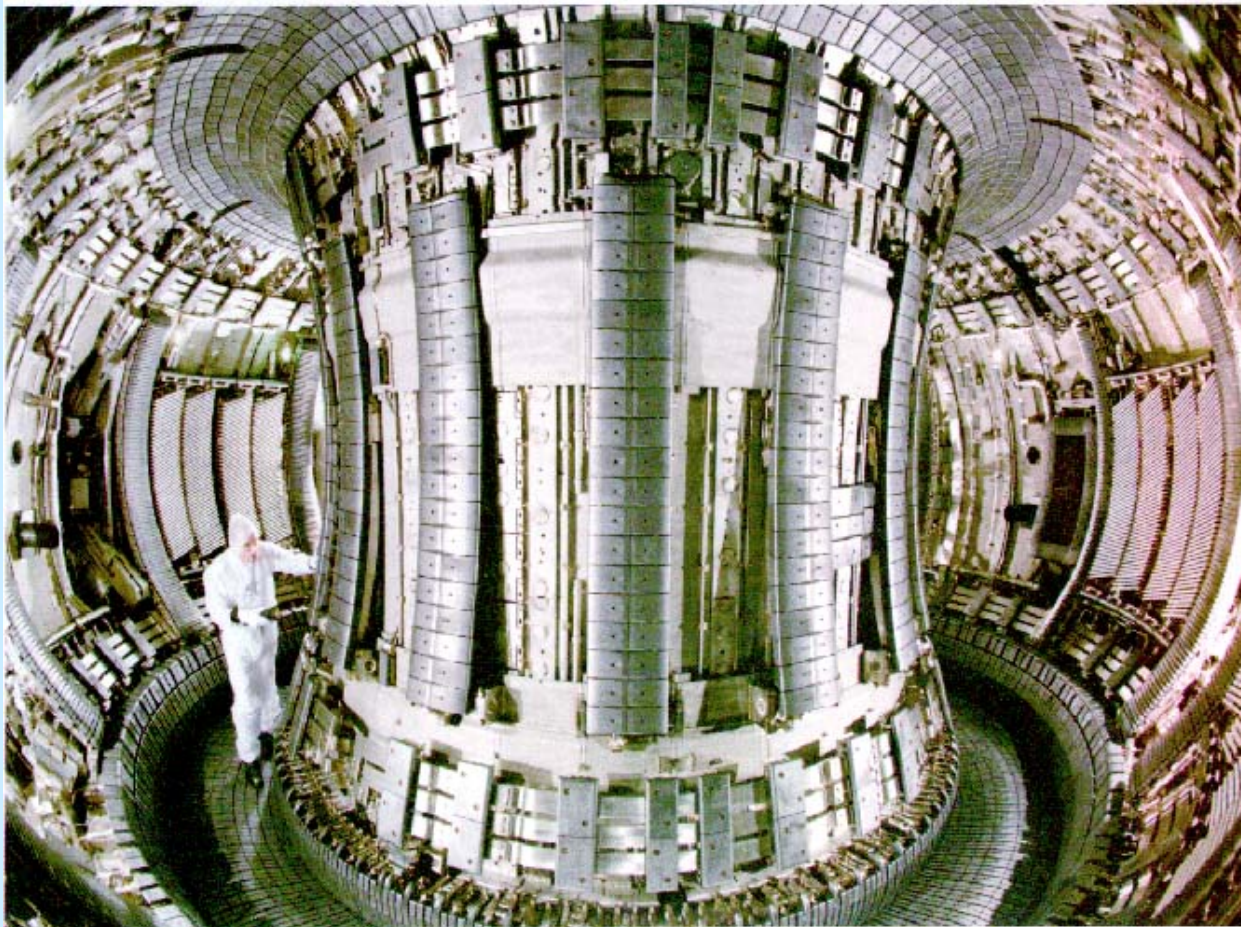
Corriente máxima: 4.8 MA

Peso del núcleo: 2800 Tn

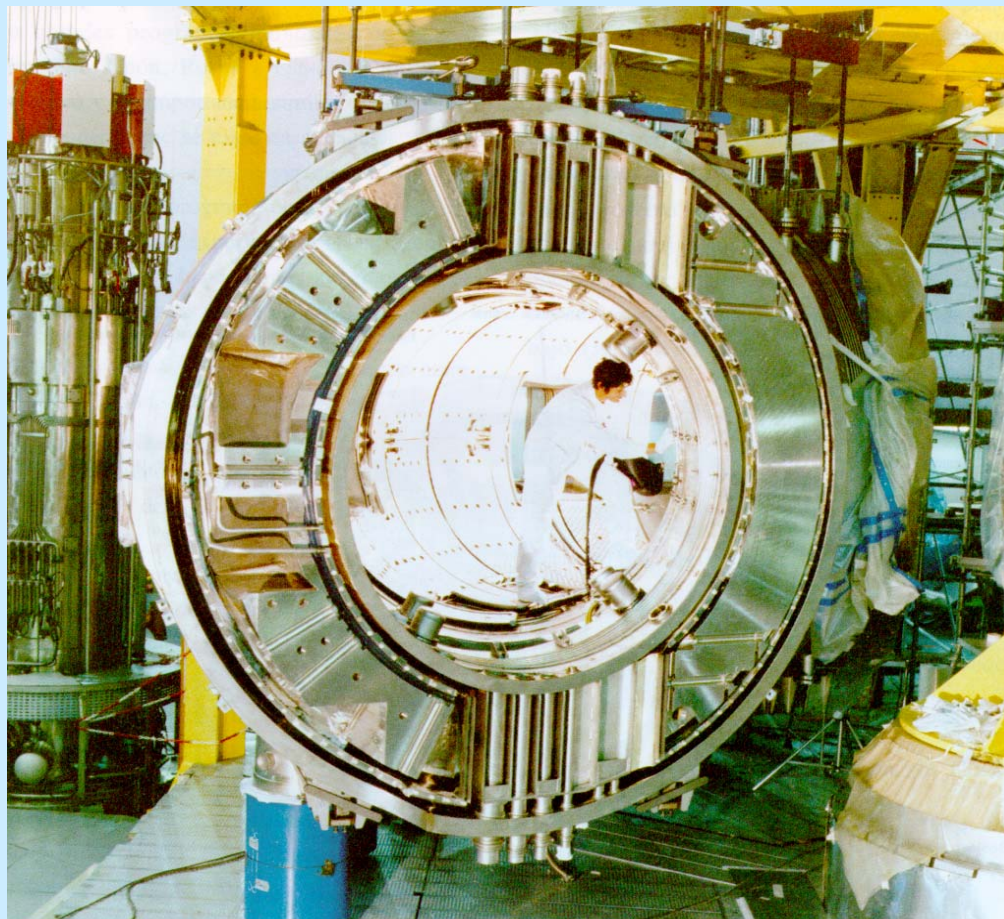
Diámetro: 15 m

Altura: 12 m

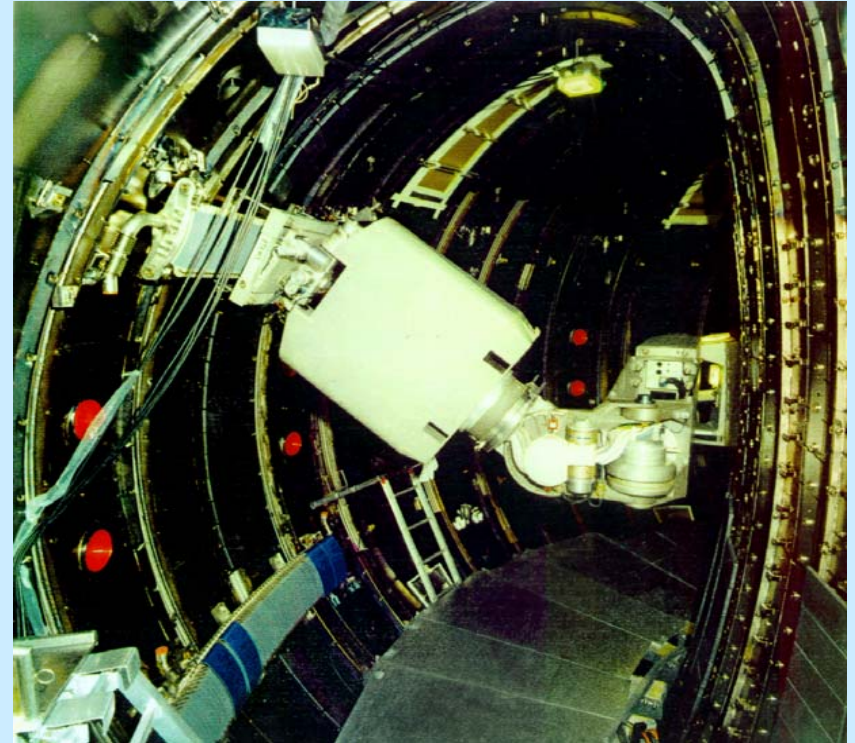
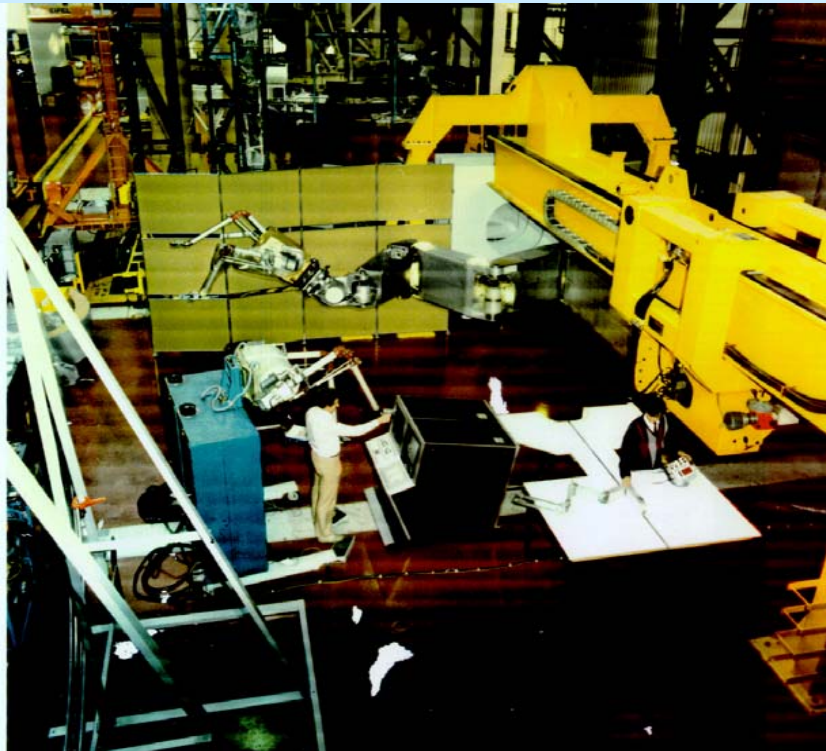
CÁMARA DE VACÍO



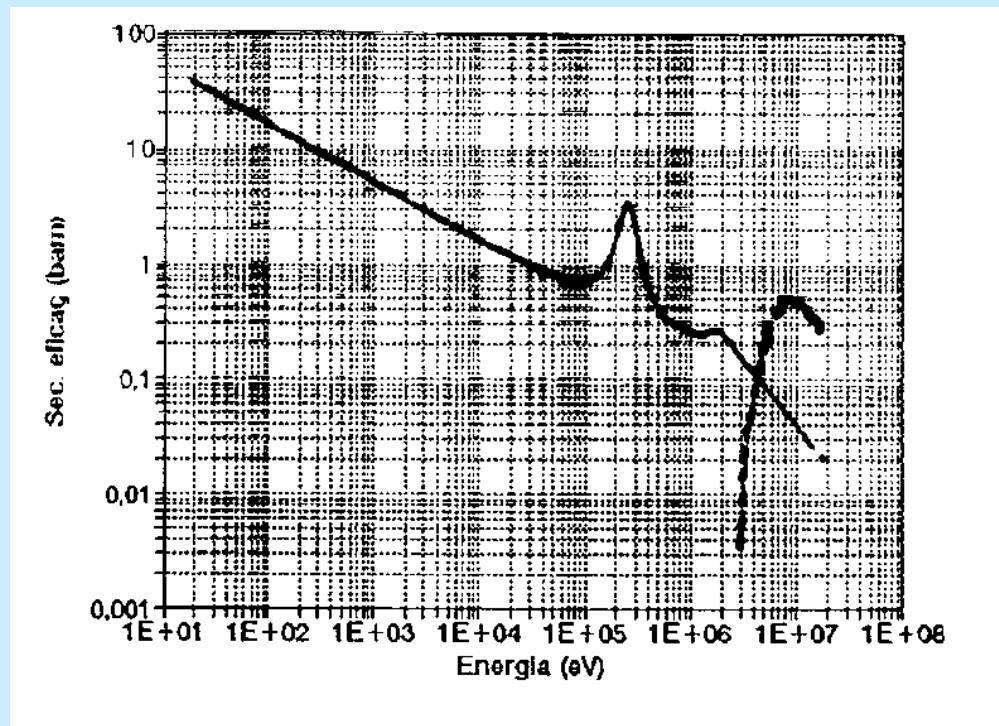
CÁMARA DE VACÍO



CONTROL REMOTO



GENERACIÓN DE TRITIO

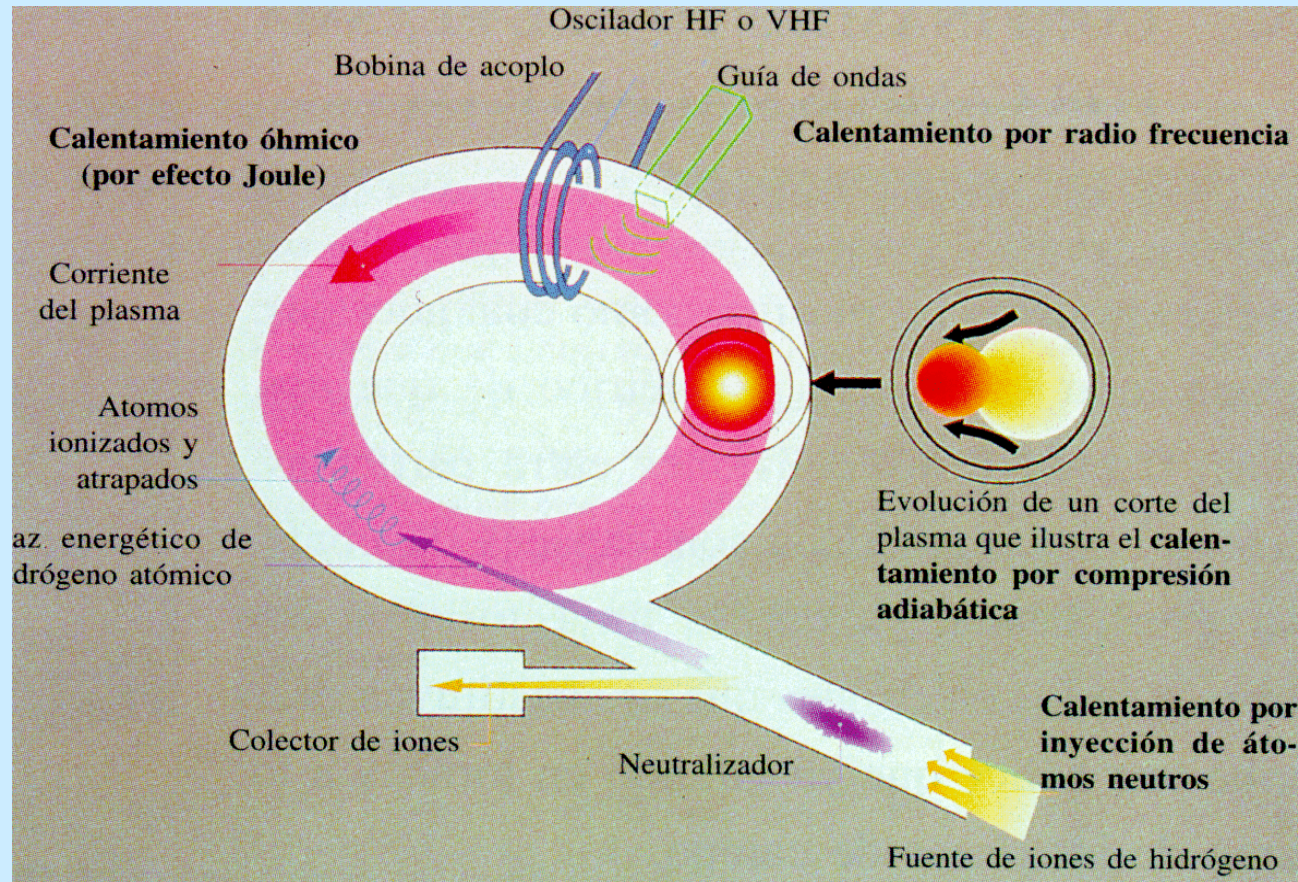


ENVOLTURA DE TOKAMAK

- **Refrigerante:** **Agua ligera**
 - Presión 15.5 MPa
 - Temp. Ent./Sal. 260/325 °C
 - Velocidad máxima 7 m/s
- **Material reproductor:** **Pb-17Li**
 - Temp. Ent./Sal. 260/325 °C
 - Velocidad media 5 mm/s
 - Flujo total 300 m³/h

- **Material estructural:** **Acero MANET**
 - Temperatura máxima interfase Pb-17Li
 - Parte frontal SMB 480 °C
 - Parte posterior SMB 430 °C
- **Tubos refrigerante:** **Acero MANET**
 - Diámetro externo 13.5 mm
 - Diámetro interno 11.0 mm
 - N° tubos interno 110
 - N° tubos externo 196

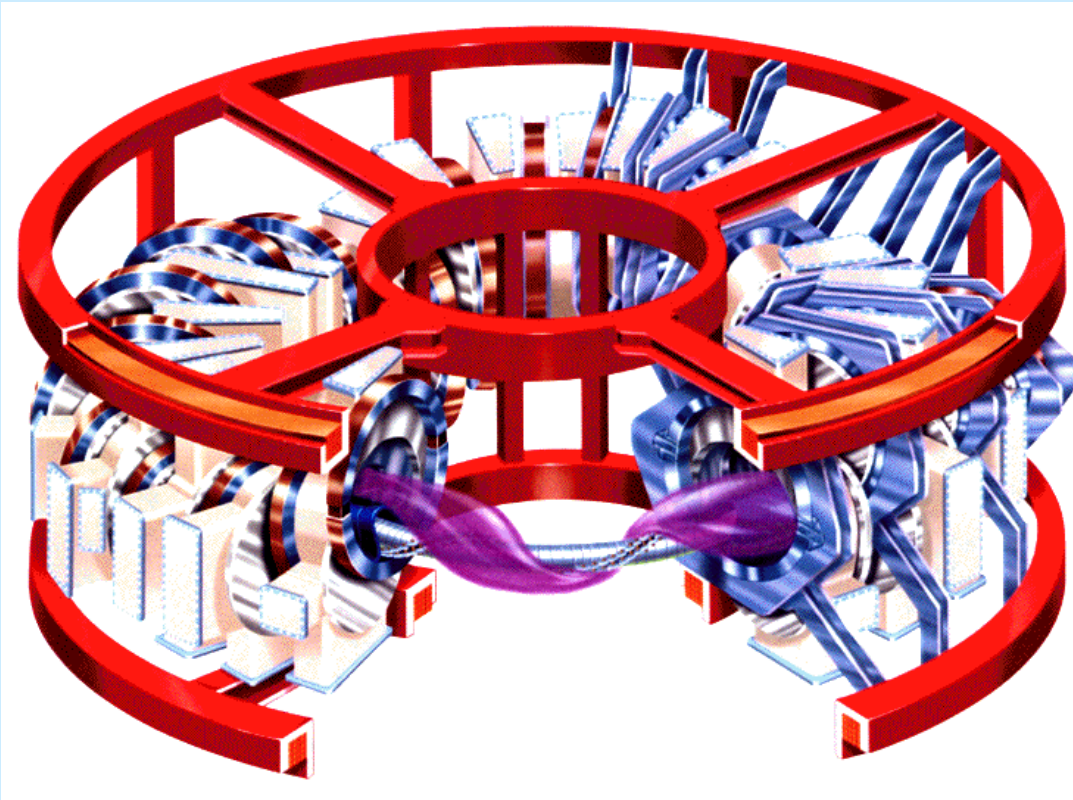
SISTEMAS DE CALENTAMIENTO



SISTEMAS DE CALENTAMIENTO



STELLARATOR: TJ-II



Valores máximos

Temperatura: $2 \cdot 10^7$ K

Densidad: $2 \cdot 10^{14}$ cm⁻³

Campo magnético: 1 T

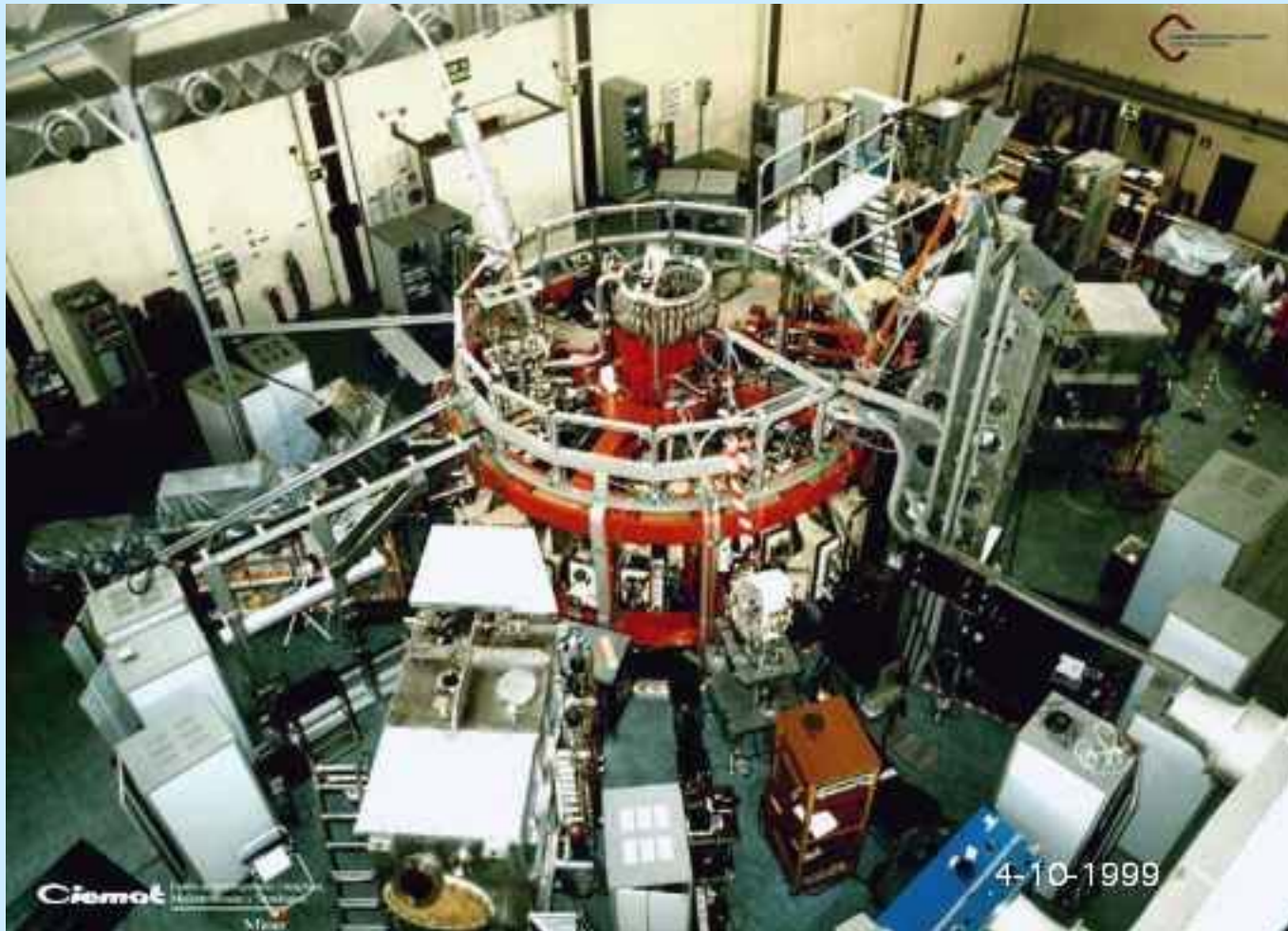
Características

Bobinas toroidales: 4

Radio mayor: 1.5 m

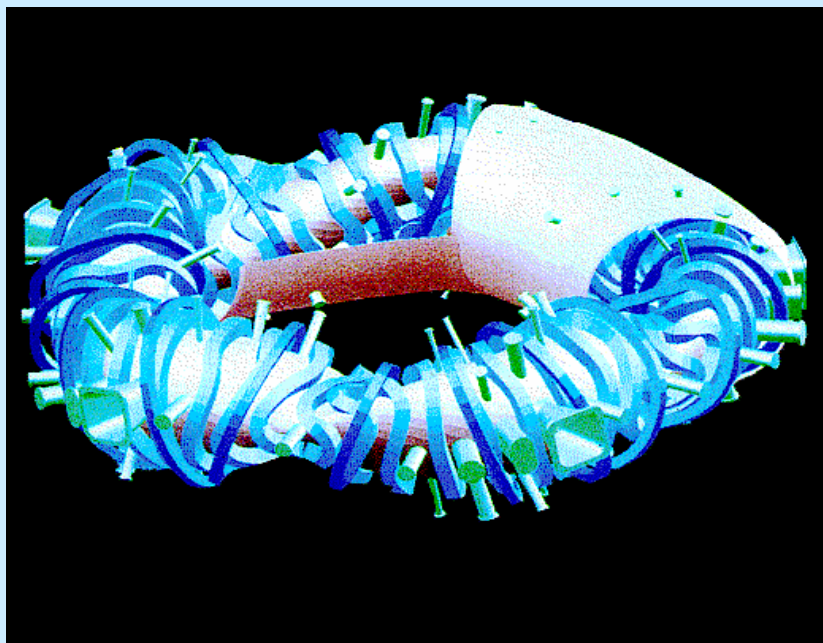
Radio del plasma: 0.2 m

Diámetro: 5.2 m

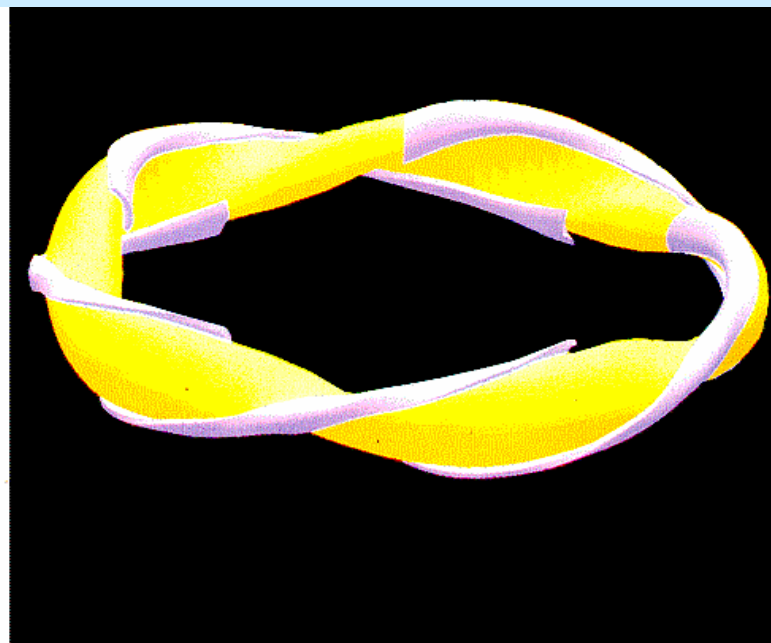


Aspecto del TJ-II rodeado de diagnósticos. Sobresalen las torres del sistema Thomson Scattering (derecha) y HIBP (izquierda). Laboratorio Nacional de Fusión, Ciemat [4].

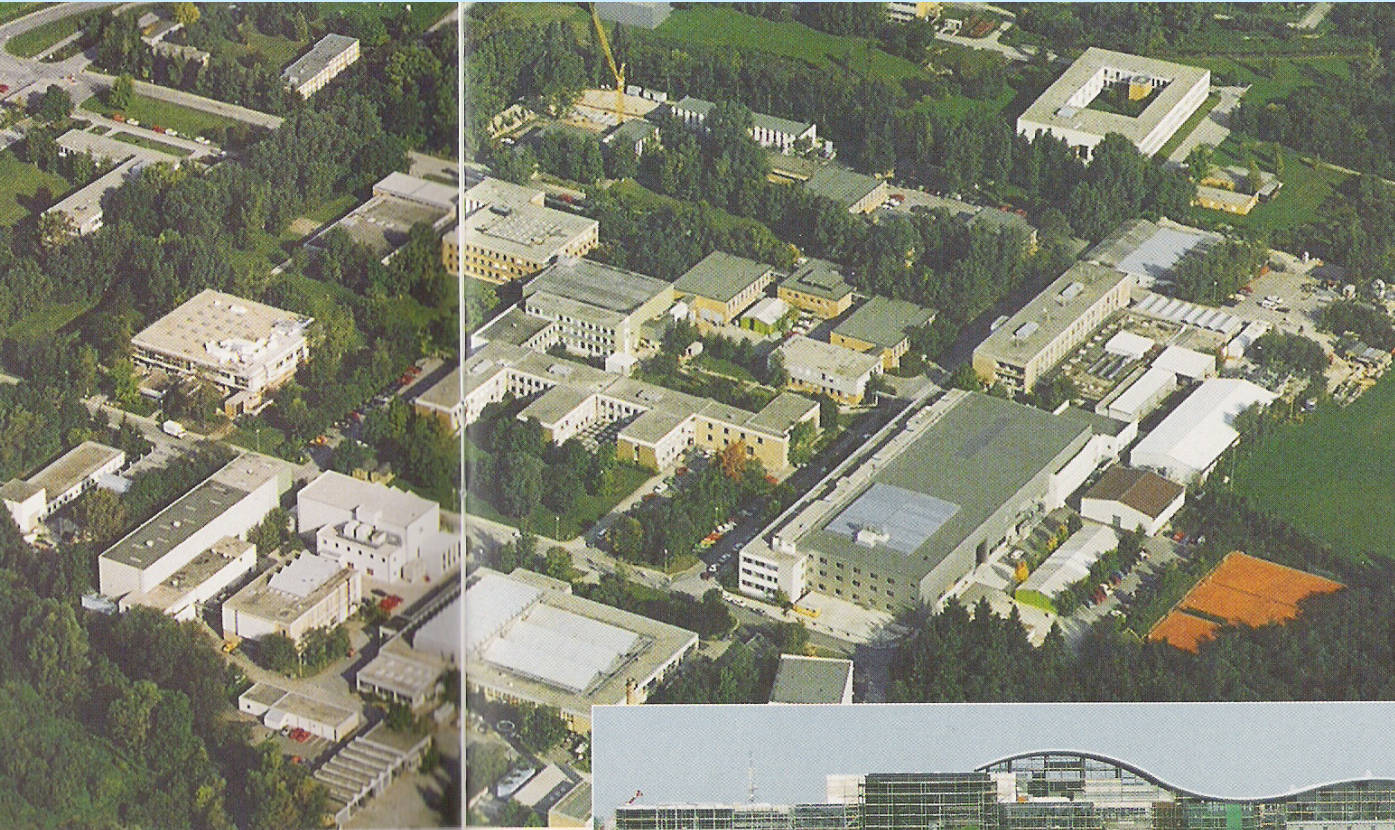
STELLARATOR: W7-X



*Proyecto Wendelstein 7-X, stellarator de tipo Helias (Asociación Euratom-IPP, Garching y Greifswald, Alemania).
Bobinas del campo toroidal y criostato*



Plasma y placas del divertor



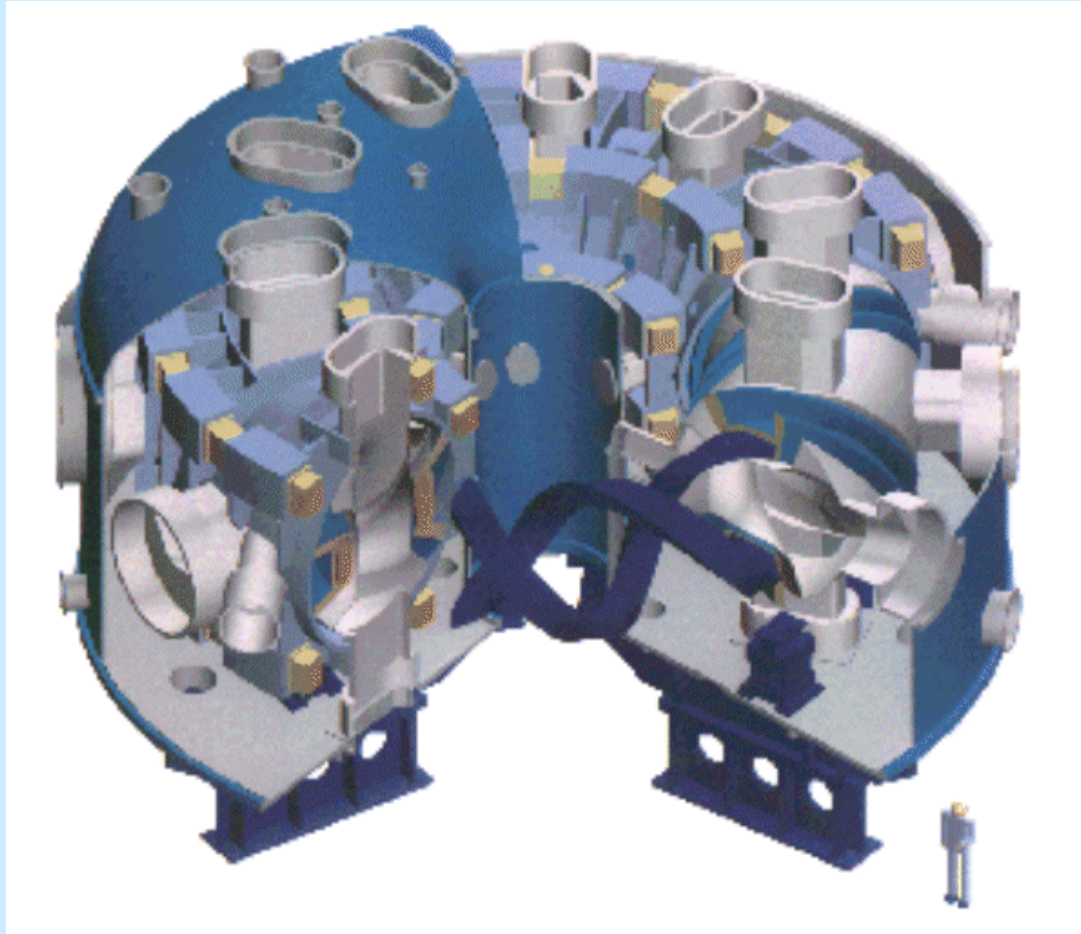
IPP at Garching research site

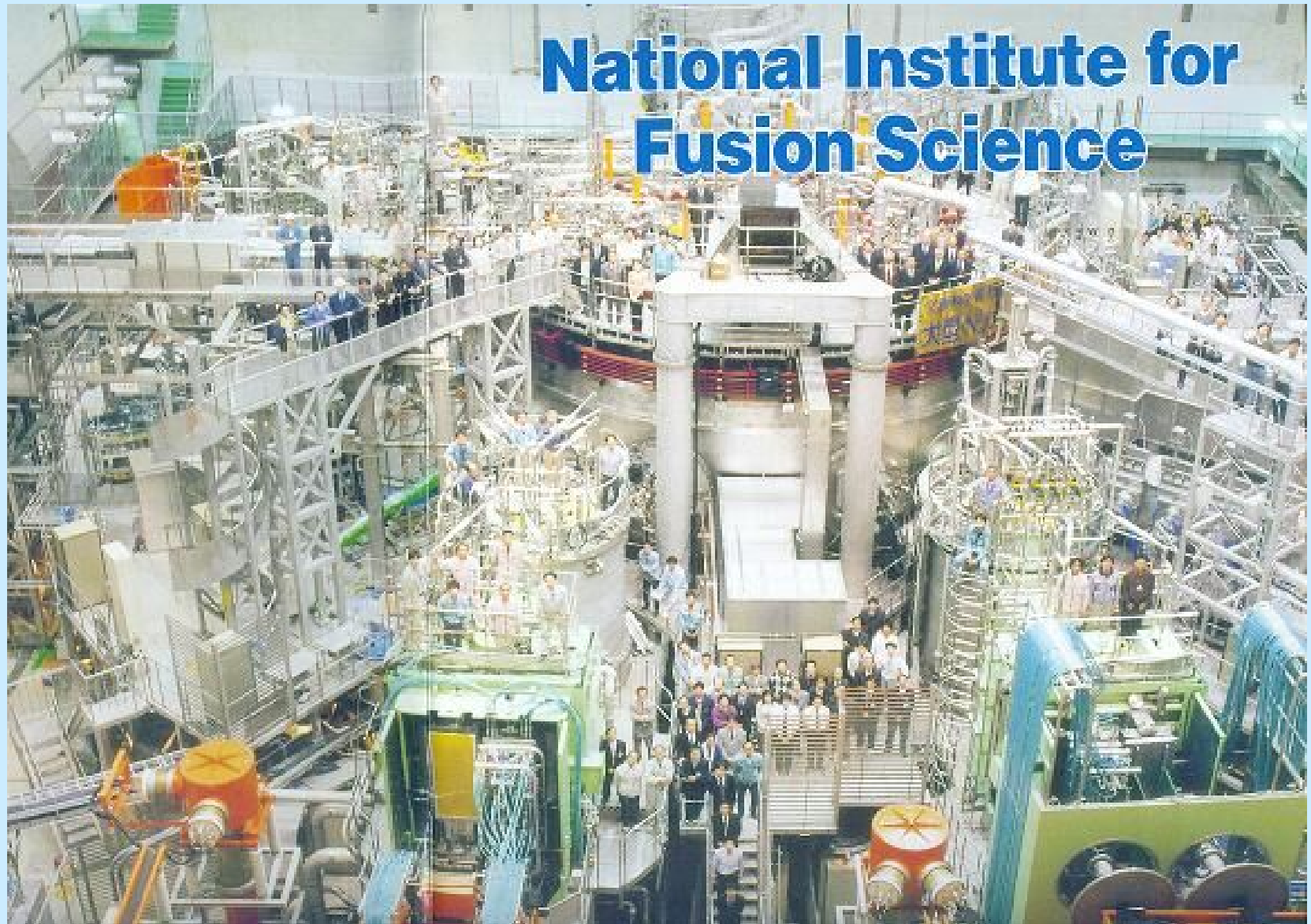
3

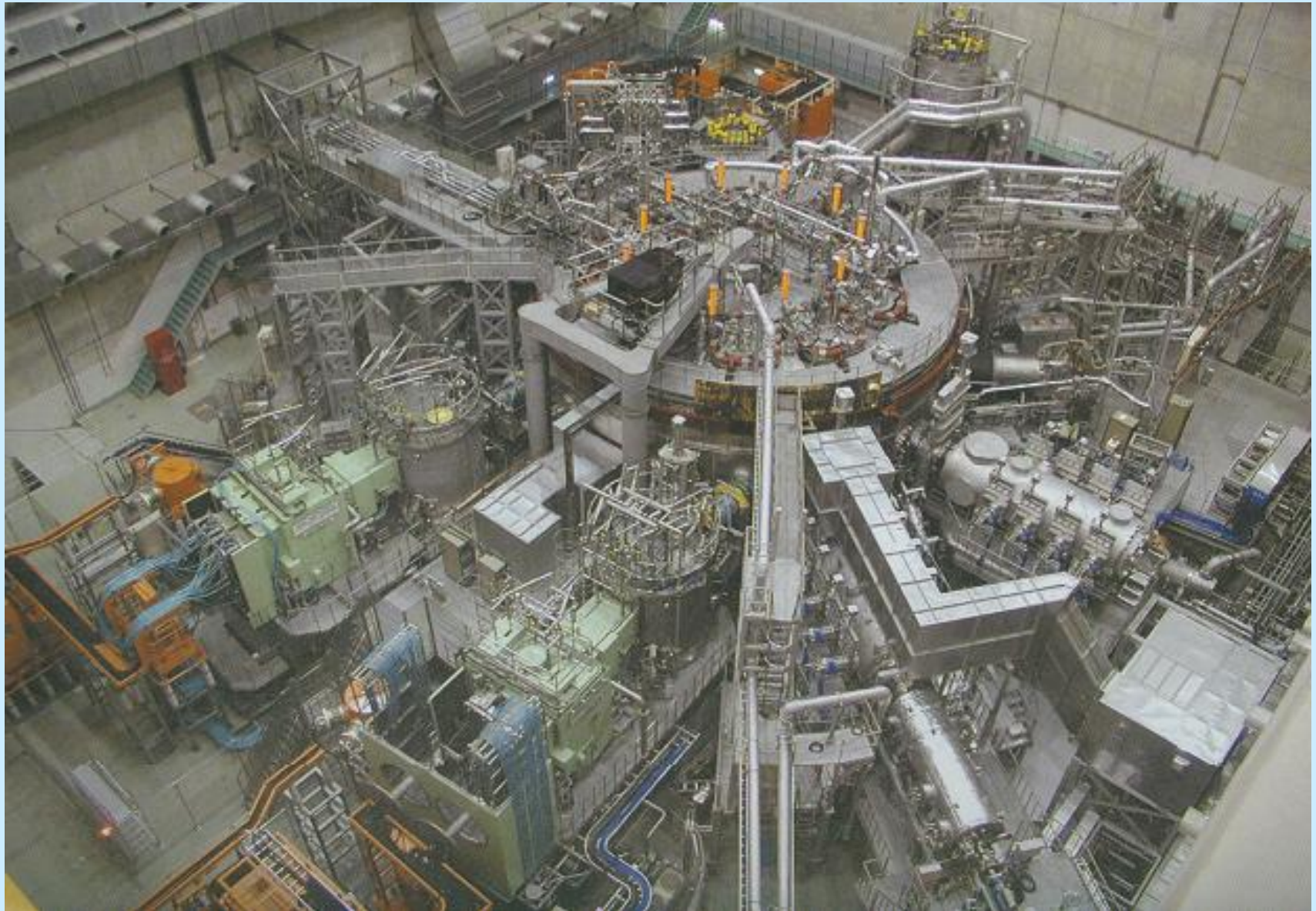


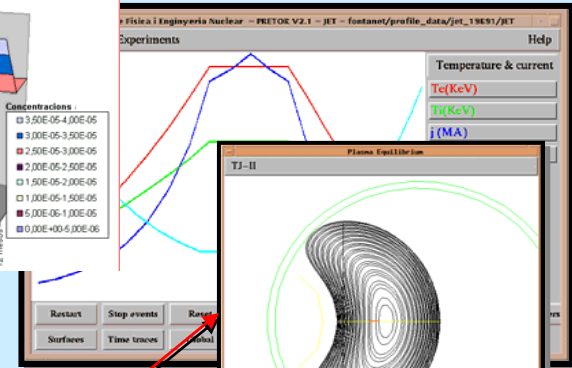
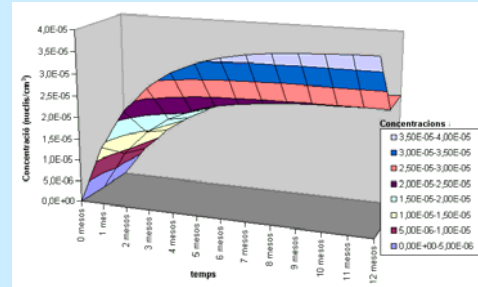
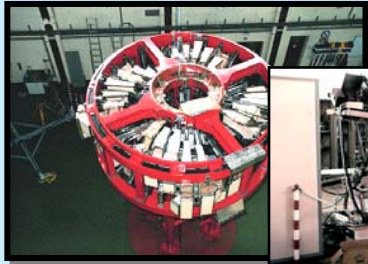
Building site of Greifswald
Branch Institute of IPP

STELLARATOR: LHD

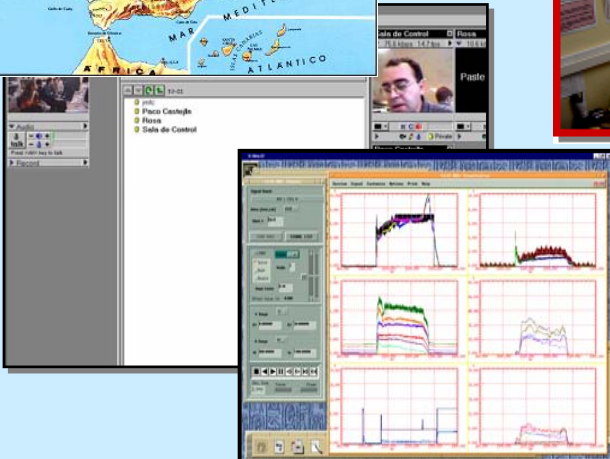








- Asociación Euratom-CIEMAT
- Asociación Euratom-IPP
- Asociación Euratom-ENEA
- ITER International Team
- Joint European Torus (JET)
- National Institute for Fusion Science (NIFS)
- European Fusion Development Agreement
- Consejo de Seguridad Nuclear
- United Kingdom Atomic Energy Authority
- Comisariat Energíe Atomique
- Università degli Studi di Pavia
- Nagoya University



- Contribution to ITER safety assessment.

Collaboration UPC-FEEL Asociation Euratom-Ciemat para la Fusion.

Ministerio de Ciencia y Tecnologia by means of three National Plans for R & D:

- TJ-II and LHD transport studies with semiempirical and theoretical models using remote participation techniques (ENE2004-05647-FTN).
- Contribution to the remote study of Transport in TJ-II. Remote operation of the charge exchange spectrometer (FTN2000-1743-C02-02)
- Implementation of synchrotron radiation losses in international plasma simulation codes. Application to ITER (FTN2002-02601)

and a postdoc fellowship program (Ramón y Cajal) and a fellowship program for PhD studies (FPU)

Main educational activities

- **'Nuclear Fusion' for engineering studies (60 hours at semester, 5 ECTS)**
- **'Nuclear Fusion' for postgraduate studies in Nuclear Engineering PhD Program**
- **Direction of degree projects**
- **Seminars, workshops, visits to TJ-II and Tore-Supra devices, and itinerant exhibitions**

Program Overview

- 1. Introduction (3h).**
- 2. Fusion reactions rate (5h).**
- 3. Energy losses (3h).**
- 4. Thermonuclear plasma balance (3h).**
- 5. Plasma confinement devices (5h).**
- 6. Heating systems (2h).**
- 7. Plasma impurity. Fuel breeding (2h).**
- 8. Energy extractor devices (2h).**
- 9. Diagnostic systems (2h).**
- 10. Neutronics. Tritium production (2h).**
- 11. Inertial fusion (2h).**
- 12. ITER project (4h)**

Main research activities

- *Safety assessment in magnetic devices and reactors*
- *Plasma Simulation: transport and cyclotron waves*
- *Remote participation and diagnostics operation*

"Importance of Electron Cyclotron Wave Energy Transport in ITER"

F. Albajar, M. Bornatici, G. Cortes, J. Dies, F. Engelmann, J. Garcia, J. Izquierdo

Nuclear Fusion v. 45, pp. 642-648, June 2005

"Internal transport barrier simulation in the LHD"

J. García, K. Yamazaki, J. Dies, J. Izquierdo

32nd EPS Conference on Plasma Physics, Tarragona, p5-037, June 2005

"Safety analysis of abnormal fueling in ITER using SAFALY"

J. Dies, J. Izquierdo, J. Garcia, C.Tapia, G. Cortes

32nd EPS Conference on Plasma Physics, Tarragona, p2-106, June 2005

"Theoretical transport analysis in TJ-II scenarios with enhanced heat confinement"

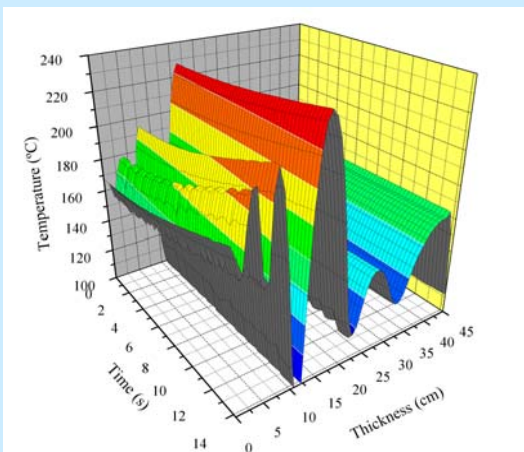
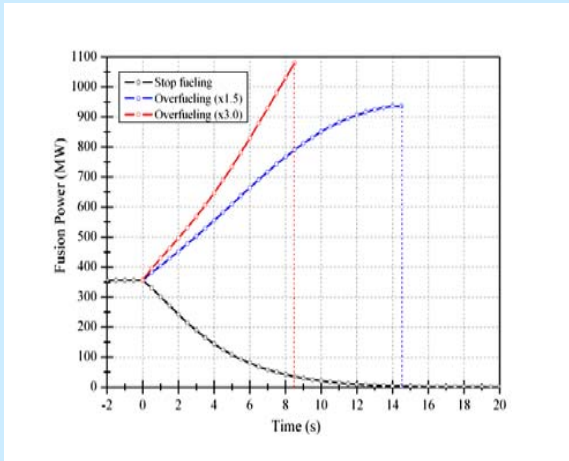
J. Dies, F. Castejón, J. Garcia, J. Izquierdo

32nd EPS Conference on Plasma Physics, Tarragona, p5-036, June 2005

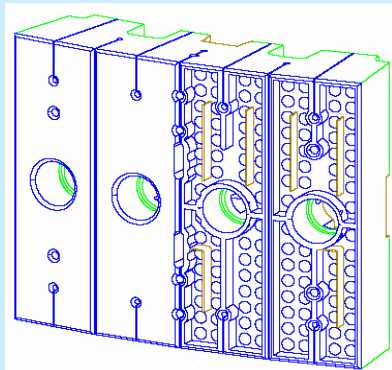
"Fusion Component Failure Rate Database (FCFR-DB)"

T. Pinna, J. Izquierdo, M.T. Porfiri, J. Dies

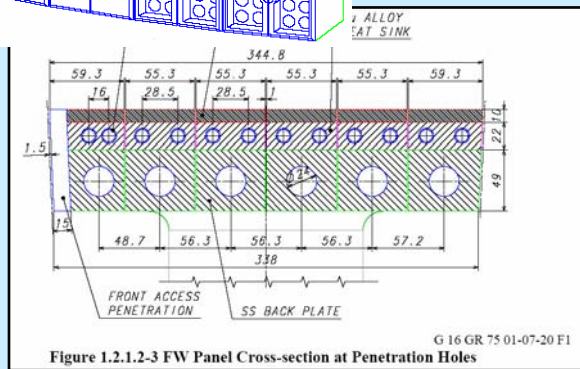
7th International Symposium on Fusion Nuclear Technology, Tokyo, Japan, May 2005



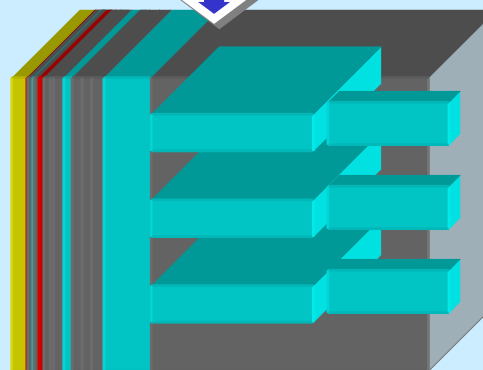
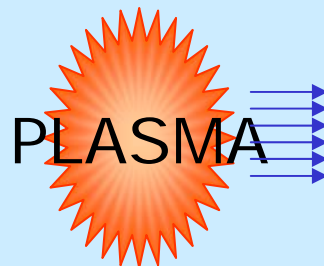
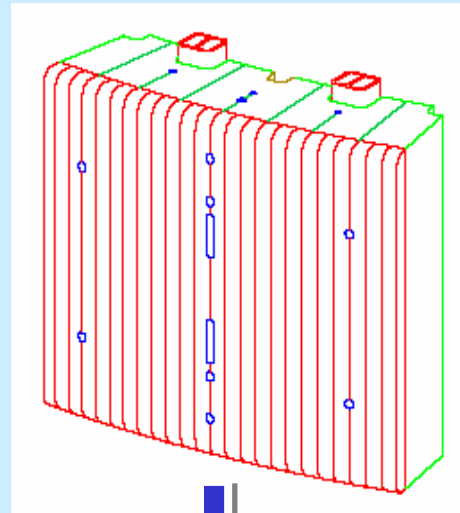
Plasma-wall interaction: SAFALY (safety approach)



+

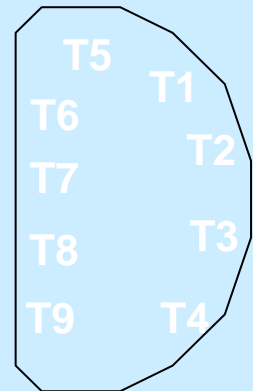
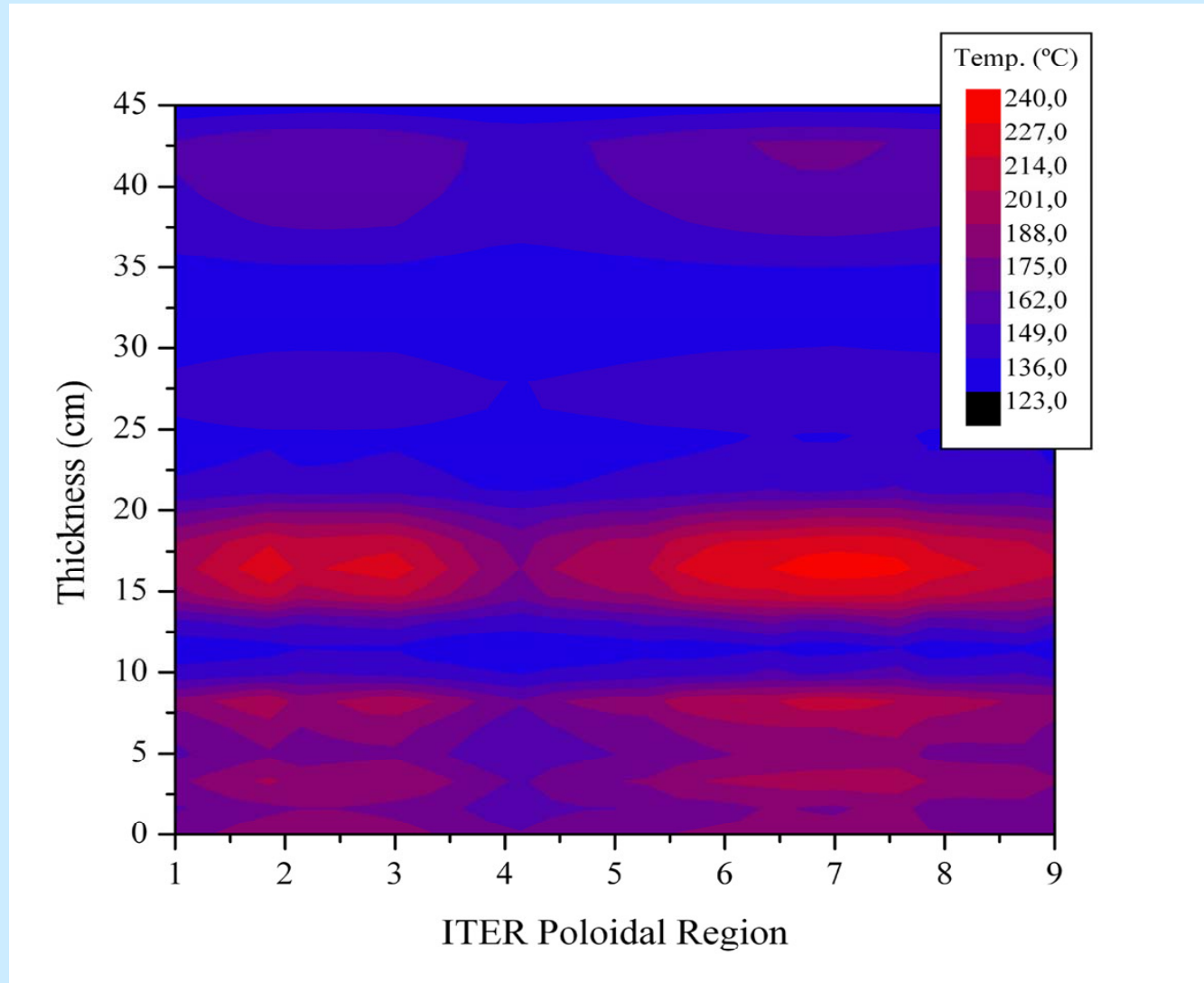


=



Thickness of layer (cm)	Material
1,00	Be
0,50	Cu
0,06	SS
0,28	Co
0,06	SS
1,29	Cu
2,04	SS
0,82	Co
2,04	SS
2,00	SS
2,59	Co
0,91	SS
7,20	SS
3,89	Co
5,73	SS
3,89	Co
10,40	SS

First test – Abnormal plasma event Overfueling



Collection of component failure data in TJ-II

Id	Stages	M-1	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	Task approval		■					
2	Collection of failure data		■	■	■			
3	Localization, screening and preparation of failure data information		■	■	■			
4	Failure data extraction		■	■	■			
5	Localization, screening and preparation of component data information		■	■	■			
6	Component data extraction		■	■	■			
7	Preliminary Database		■	■	■			
8	Statistical process of recovered data					■	■	
9	Global values assessment					■	■	
10	Individual values assessment					■	■	
11	Database making up							■
12	Joint international Fusion Component Failure Ra Database if desirable							■
13	Final report							■



→ To collect all the information available about single component malfunctions and failures

→ To collect other information useful to evaluate probabilistic failure values

→ To estimate the main reliability parameters, (such as the failure rate and the corresponding standard errors and confidence intervals), associated to the components

→ To point out practical information on the operating experience acquired

Upgrade of the
Fusion Component Failure Rate Database (FCFR-DB)

IEA + ENEA + FEEL
background and human resources

Upgrade of the FCFR-DB by

- **Refinement of the FCFR-DB v1.05 component taxonomy (component classification)**
- **~~Refinement and enumeration of every relevant system in a generic fusion facility (fusion system breakdown)~~**
- **Synthesis of the failure mode list**
- **Introduction of JET and TLK data**



...Y si creásemos estrellas a partir del agua...