



# LA ENERGÍA DE FUSIÓN NUCLEAR

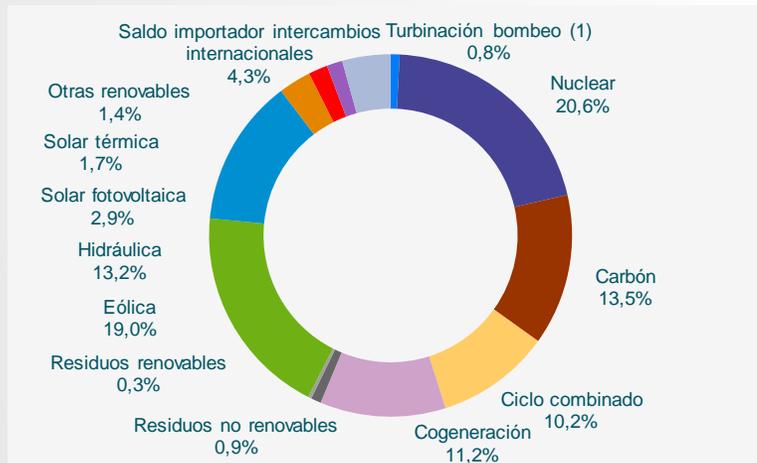
**Antecedentes**

*Enrique A. Cayetano Garrido*

Sistema peninsular

Cobertura de la demanda eléctrica peninsular  
Año 2018

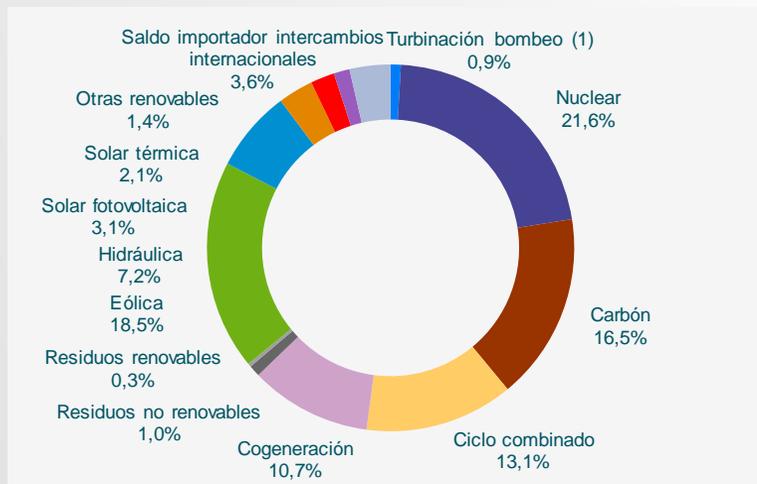
(%)



(1) Turbinación de bombeo puro + estimación de turbinación de bombeo mixto.

Cobertura de la demanda eléctrica peninsular  
Año 2017

(%)



(1) Turbinación de bombeo puro + estimación de turbinación de bombeo mixto.

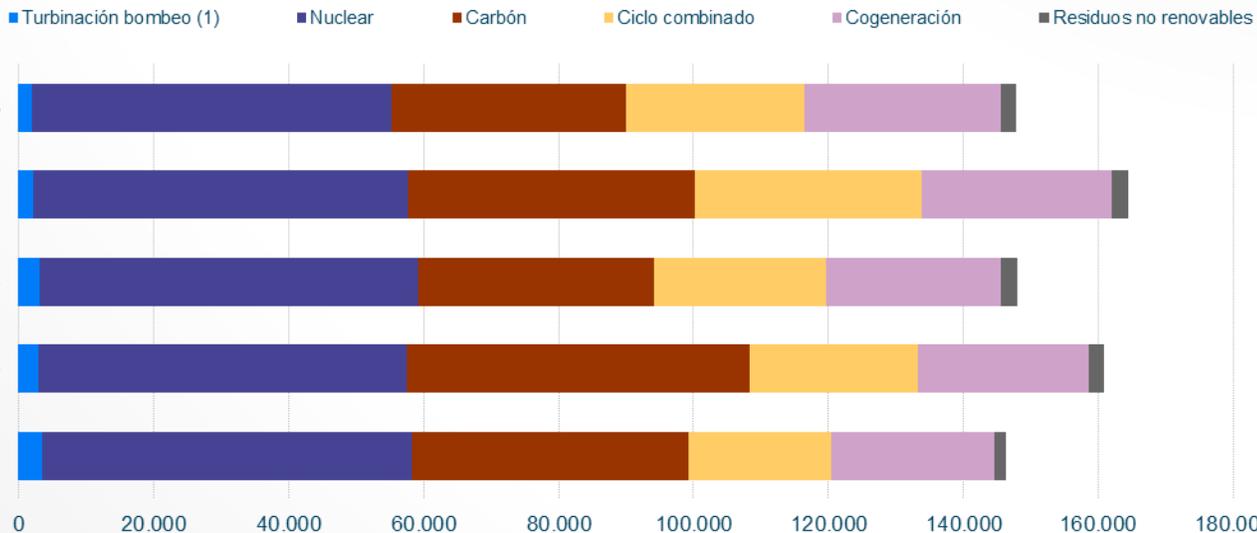
Sistema peninsular

Evolución de la demanda eléctrica peninsular

	Demanda b.c.	
	GWh	Δ Anual (%)
2014	243.174	-1,1
2015	247.970	2,0
2016	249.680	0,7
2017	252.506	1,1
<b>2018</b>	<b>253.495</b>	<b>0,4</b>

Evolución de la generación eléctrica peninsular no renovable

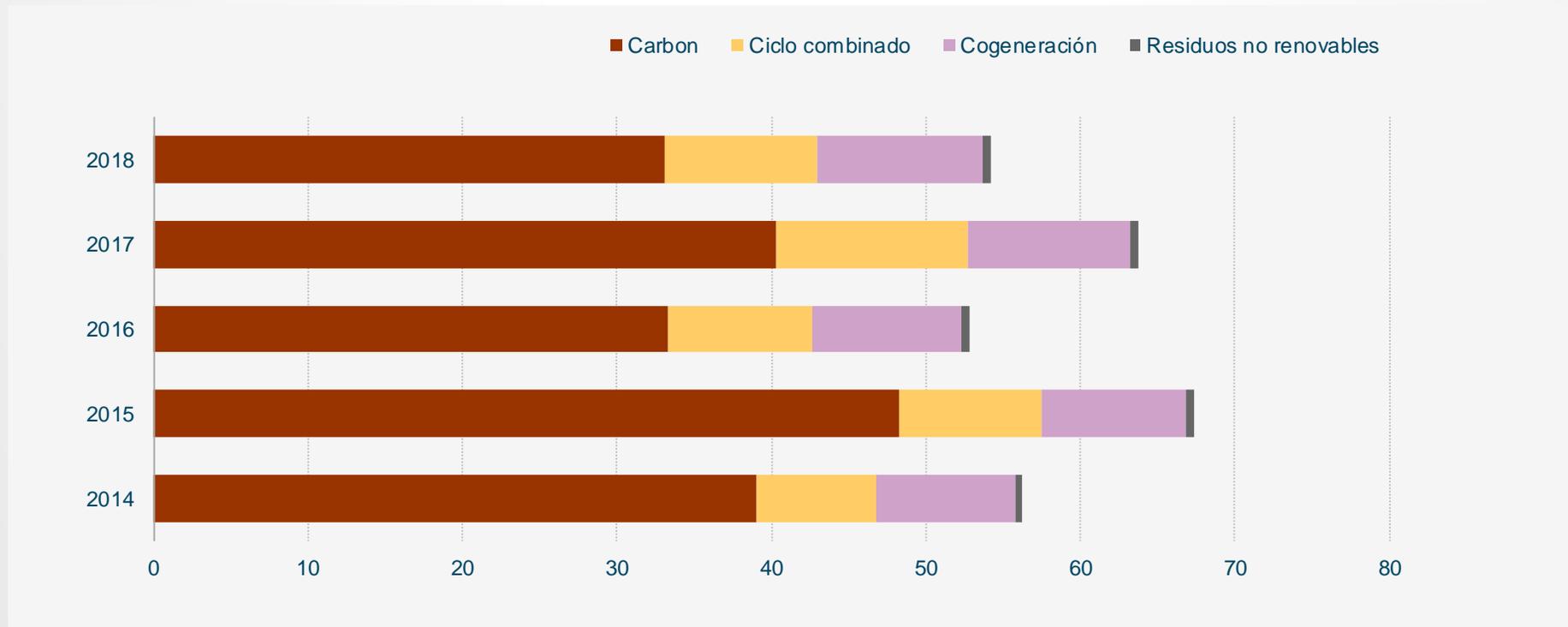
(GWh)



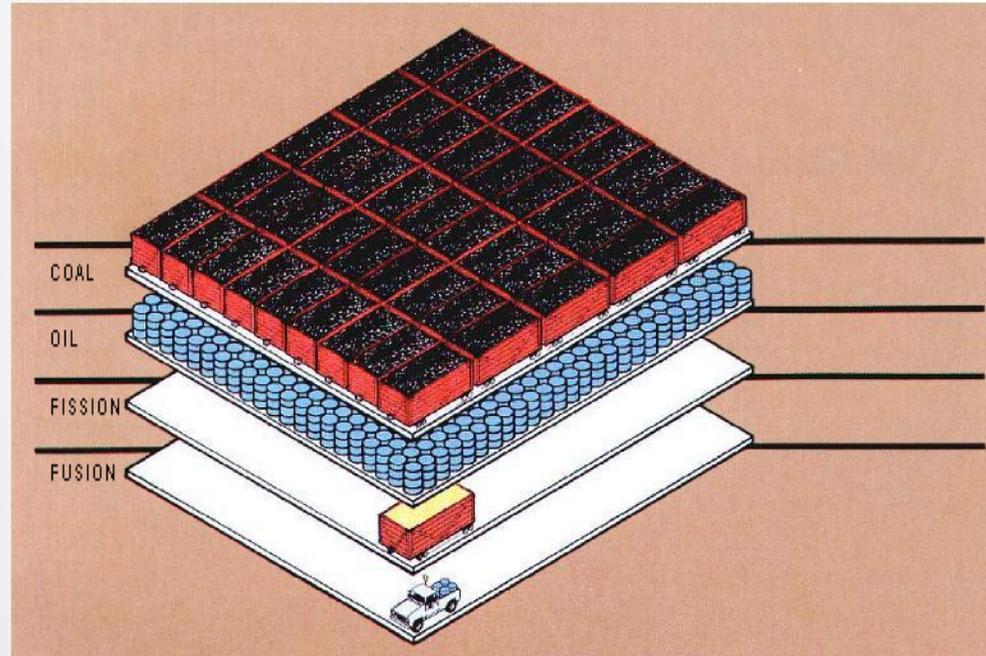
## Sistema peninsular

Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la generación eléctrica peninsular

(Mill.tCO<sub>2</sub>)



## Comparación de combustibles



- Fisión de Uranio :  $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{140}\text{Cs} + ^{93}\text{Rb} + 3\text{n} + 200 \cdot 10^6 \text{ eV}$
- Fusión de Hidrógeno :  $^2\text{D} + ^3\text{T} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n} + 17,6 \cdot 10^6 \text{ eV}$
- Combustión :  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 3,6 \text{ eV}$



# ¿QUÉ ES LA FUSIÓN?

Introducción

## Antecedentes (fundamento de la energía por fusión)

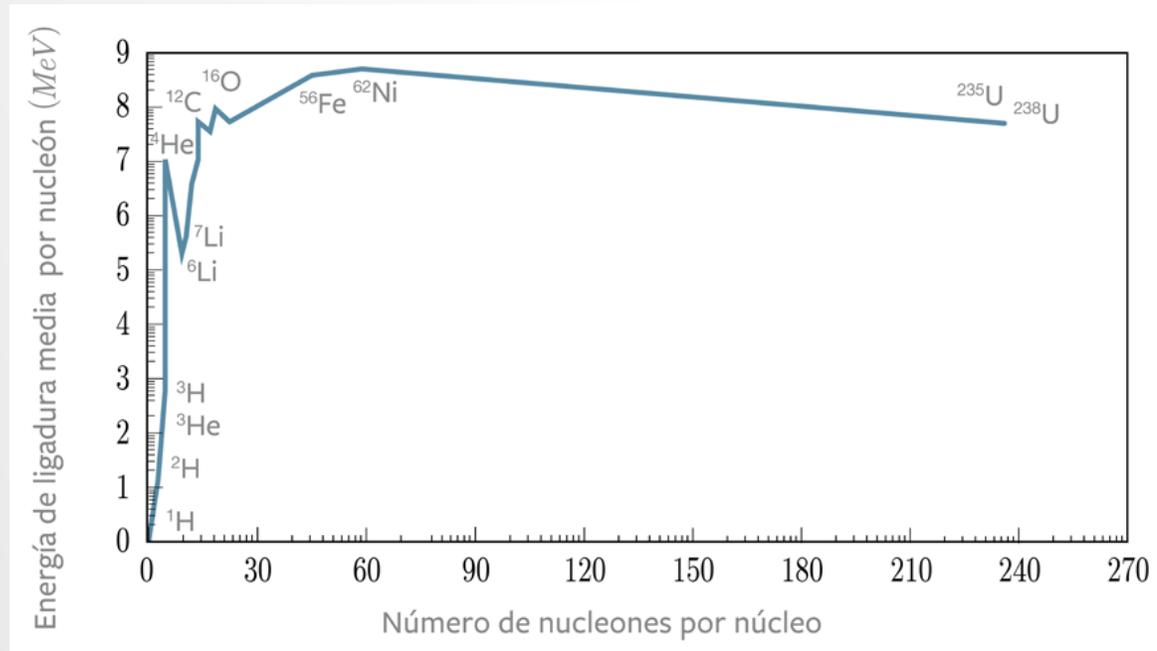
llamamos fusión nuclear a la reacción que da lugar a un nucleido con un número másico mayor que el de cada uno de los nucleidos iniciales. Reacciones de fusión de interés astrofísico son el ciclo protón - protón, que tiene lugar en el sol. De interés tecnológico para producción de energía son las reacciones de fusión de isotopos de hidrógeno, principalmente:



al igual que las reacciones químicas, las reacciones nucleares pueden ser exotérmicas (generan energía) o endotérmicas (es necesario aportar energía neta para que se produzcan). Se puede saber si una reacción es exotérmica o endotérmica realizando un balance de masas y teniendo en cuenta la equivalencia masa-energía  $E = mc^2$ , donde  $E$  es la energía,  $m$  la masa y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío. Si la masa de los nucleidos iniciales es mayor que la de los nucleidos finales, su diferencia (llamada  $Q$  de la reacción, dada en eV) será positiva y se producirá energía. En caso contrario, será necesario aportar energía (generalmente en forma de energía cinética de los nucleidos iniciales) para que la reacción se produzca.

Por ejemplo, para la reacción de fusión nombrada anteriormente tenemos,

$$Q = m(^2\text{H})c^2 + m(^3\text{H})c^2 - m(^4\text{He})c^2 - m(^1\text{n})c^2 = 17,59 \text{ MeV} > 0$$



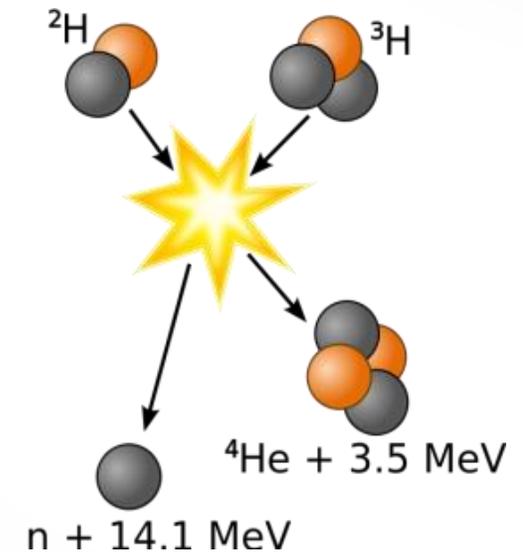
El electrón-Voltio (eV) es una unidad de medida de la energía correspondiente a  $1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

La **fusión** es la energía usada por las estrellas y el sol: se basa en la energía liberada al unirse dos átomos “ligeros” para dar lugar a uno más pesado

$$E = m c^2$$

la energía nuclear es sin duda la fuente más importante de energía de la naturaleza. Nuestro sol y todas las otras estrellas brillan durante la mayor parte de sus vidas precisamente por las **reacciones nucleares en sus núcleos**.

La reacción Deuterio – Tritio es la seleccionada para reactores fusión:  
reacción fusión con mayor sección eficaz



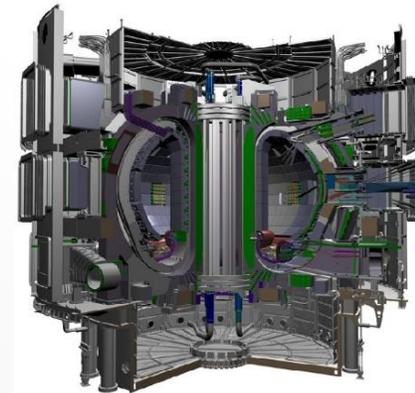
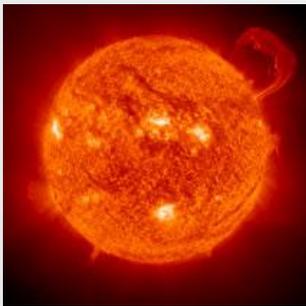


En el interior del sol, el hidrógeno choca y se funde a altísimas temperaturas (en torno a 15 millones de °C) y sometido a enormes presiones gravitatorias: cada segundo se funden en helio 600 millones de toneladas de hidrógeno.

## Para reproducir la energía de fusión:

- 1.- Disponer de Deuterio (fácil a partir de agua) y Tritio (radiactivo, vida media 12 años) en cantidades suficientes para que se produzca un mínimo de reacciones D-T (**n**)
- 2.- Calentarlo a 150 Millones °C (10 veces superiores al SOL) para generar el plasma (romper barrera coulombiana) (**T**)
- 3.- Confinar el **plasma** durante suficiente tiempo para superar las pérdidas de energía y generar auto calentamiento (**t<sub>E</sub>**)

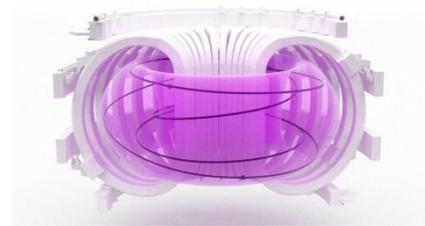
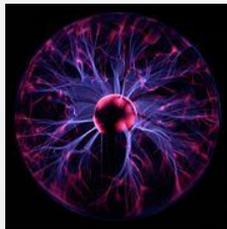
Ley de Lawson (parámetros fusión):  
 $n T t_E > 10^{21} \text{ (keV m}^{-3} \text{ s)}$



## PLASMA I

- Cuarto estado de la materia (sólido, líquido, gas)
- Gas cargado eléctricamente en el que los electrones (-) están separados del núcleo atómico (+)
- Muy raro en la tierra, pero es el 99% del universo
- Reacciona a fuerzas electromagnéticas:

### Confinamiento Magnético o Inercial

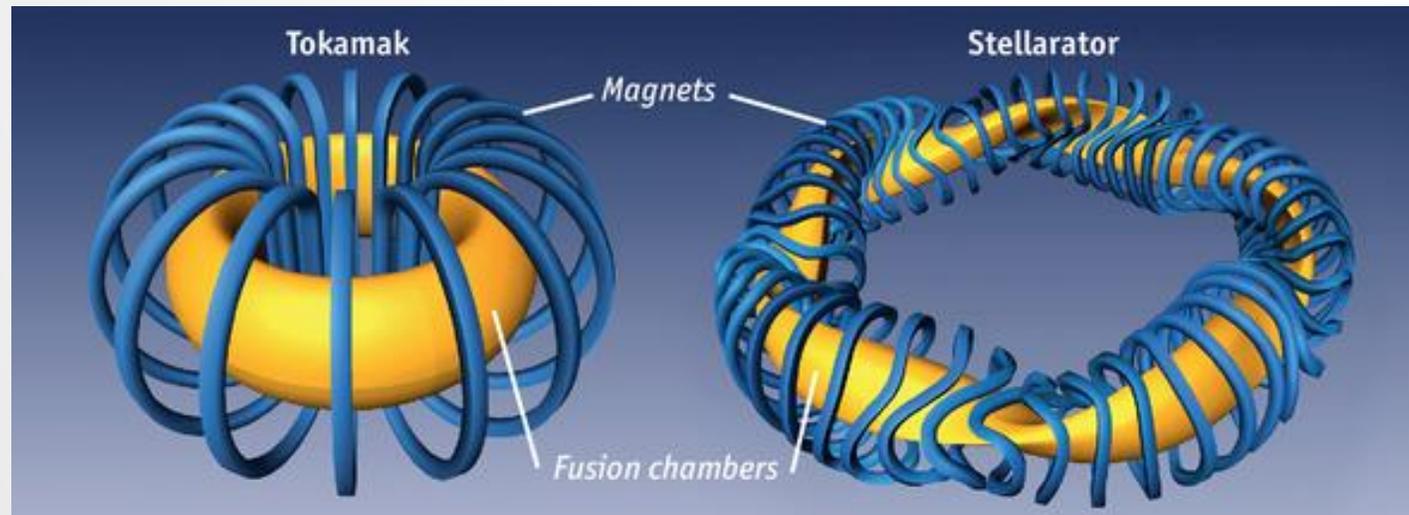


## PLASMA II

- El plasma presenta características propias que no se dan en los sólidos, líquidos o gases, por lo que es considerado un estado de agregación diferente, conocido como el cuarto estado de la materia. Los plasmas presentan muy buena conductividad eléctrica y respuestas colectivas de largo alcance ante perturbaciones.
- Por su alta conductividad, el interior de un plasma está apantallado frente a campos eléctricos constantes, pero no frente a campos magnéticos constantes, que pueden penetrar en el plasma permitiendo mantenerlo confinado.
- Como los gases, el plasma no tiene una forma o volumen definido, a no ser que esté encerrado en un contenedor; pero, a diferencia de los gases (en los que no existen efectos colectivos importantes), el plasma puede formar estructuras complejas (como filamentos o capas) bajo la influencia de un campo magnético.

## Confinamiento Magnético:

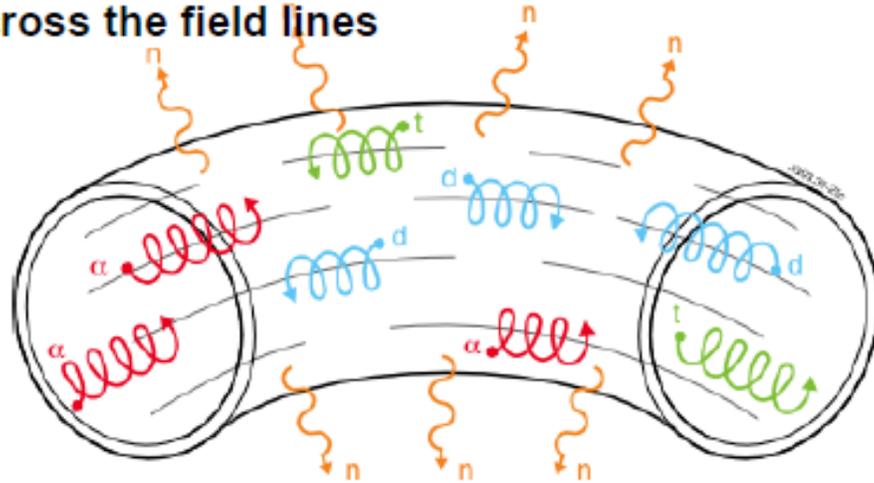
Mediante campos magnéticos se genera la “jaula” magnética- TOKAMAK o STELLERATOR



**STELLERATOR** es concepto más estable de plasma pero mucho más complejo tecnológicamente que el **TOKAMAK**

# Confinamiento MAGNÉTICO

- **Magnetic fields** cause charged particles to spiral around field lines. Plasma particles are lost to the vessel walls only by relatively slow diffusion across the field lines



- Only charged particles ( $D^+$ ,  $T^+$ ,  $He^+$ ...) are confined  
**Neutrons** escape and release energy
- **Toroidal** (ring shaped) device: a closed system to avoid end losses

## Confinamiento Magnético, ejemplos

TOKAMAK – JET (Joint European Thorus) en el Reino Unido



1999 - Fusión controlada durante 2 segundos

### CONDICIONES PARA LA FUSION

- **IGNICION** (reactor de fusión)  
 $(n_i \times T_i \times \tau_E) \simeq 5 \times 10^{21} \text{KeV m}^{-3}\text{s}$ .
- **BREAK-EVEN**  $Q=1$  en D-T  
 $(n_i \times T_i \times \tau_E) \simeq 10^{21} \text{KeV m}^{-3}\text{s}$ .

Resultados del JET en algunas descargas

$$n_i \times T_i \times \tau_E \simeq 8 - 9 \times 10^{20} \text{KeV m}^{-3}\text{s}$$

proximo al break-even

- **Resultados del JET en descargas individuales**

Parametro	Valor conseguido	Valor reactor
$\hat{n}_e$ [ $\text{m}^{-3}$ ]	$4 \times 10^{20}$	$1 - 3 \times 10^{20}$
$\hat{T}_i$ [keV]	30	15 - 30
$\hat{T}_e$ [keV]	12	15 - 30
$\tau_E$ [s]	1.8	1 - 3
$\beta$ [%]	5.5	3 - 6

## Principales dificultades del TOKAMAK

- Altas Temperaturas: Calentamiento inicial efecto Joule, pero se satura y requiere calentamiento adicional:
  - **Radiofrecuencia**
  - **Inyección de haces de neutrones e iones acelerados**
- Impurezas del plasma: Mantener limpio el plasma de impurezas sin interacción con paredes
  - **Cámara de Vacío en Ultra Alto Vacío**
  - **Bobinas de corrección de posicionamiento del plasma**
- Primera Pared de la Cámara: Resistente a la radiación y evacuar el calor generado
  - **“First Wall Panel” con tejas de Berilio**
  - **Circuito de refrigeración, generar energía eléctrica**
- Inestabilidades del plasma: ELM - Edge Localized Mode, la cámara se enfrenta a aumentos repentinos de miles de grados (tormentas solares)
  - **In vessel Coils**
  - **Inyección de “bolas de fuego”**
- Acceso a cámara entre “descargas del plasma”: Diseño de sistemas robóticos para operar en entorno extremadamente hostil
  - **Brazos Robóticos por puertos de acceso**
- Control del Plasma: Equipos de medida neutrónicos, campo magnéticos...
  - **Diagnósticos**

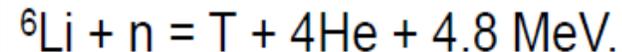
# COMBUSTIBLE I

- Deuterio ( $^2\text{H}$ ): Fácil de extraer del agua
- Tritio ( $^3\text{H}$ ): Radiactivo, no existe en naturaleza y vida media de 12.3 años. Reactores CANDU lo generan (100 gr anuales por reactor), pero se estima necesario 100 – 200 kg año para Fusión comercial (ITER sólo requerirá unos gramos).

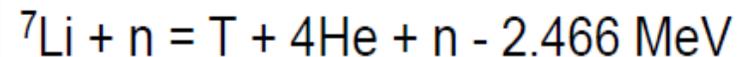
## Reacción fusión auto mantenida: "Breeding system" basado en Litio

**Primera pared deberá tener capa de Li y sistema de extracción del T generado (DEMO será prueba final)**

7 % del Li →



93 % del Li →



# COMBUSTIBLE II

**Break-even / Encendido o Ignición**

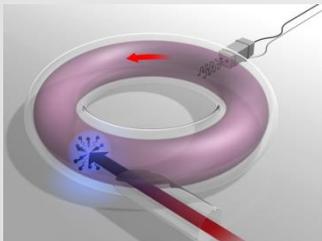
**Ganancia Energética  $Q =$**

**Potencia Fusión Generada / Potencia Inyectada**

Si  $Q = 1$  **Break even**

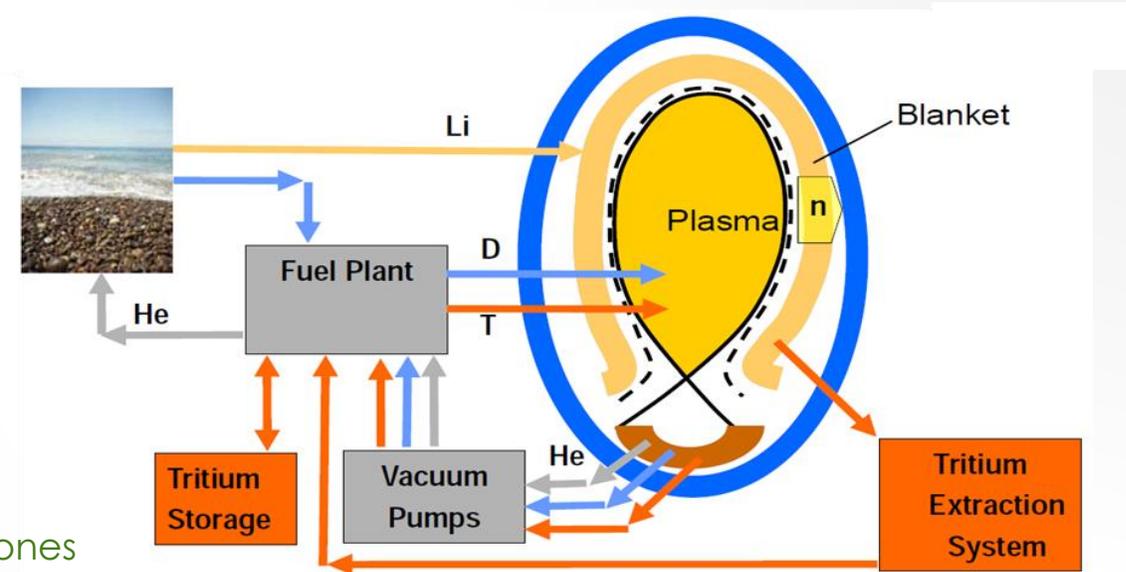
Reactor Fusión  $Q \gg 1 \rightarrow$  **Encendido o Ignición**

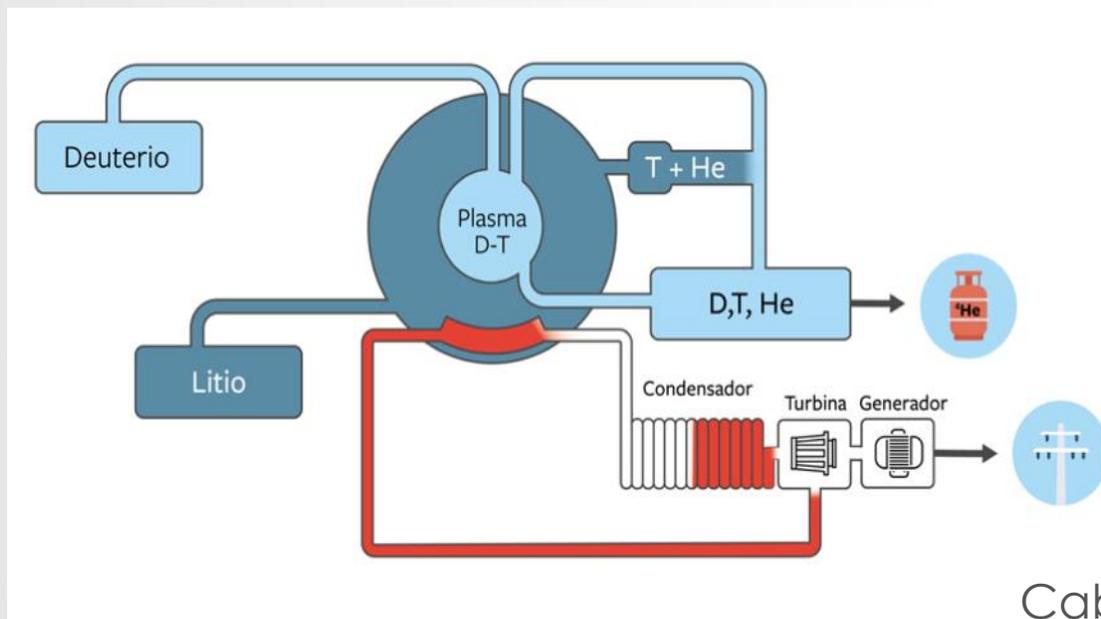
Potencia Fusión Generada = Energía liberada por  $^4\text{He}$  y neutrones



Potencia Inyectada = Potencia necesaria por sistemas de calentamiento del plasma

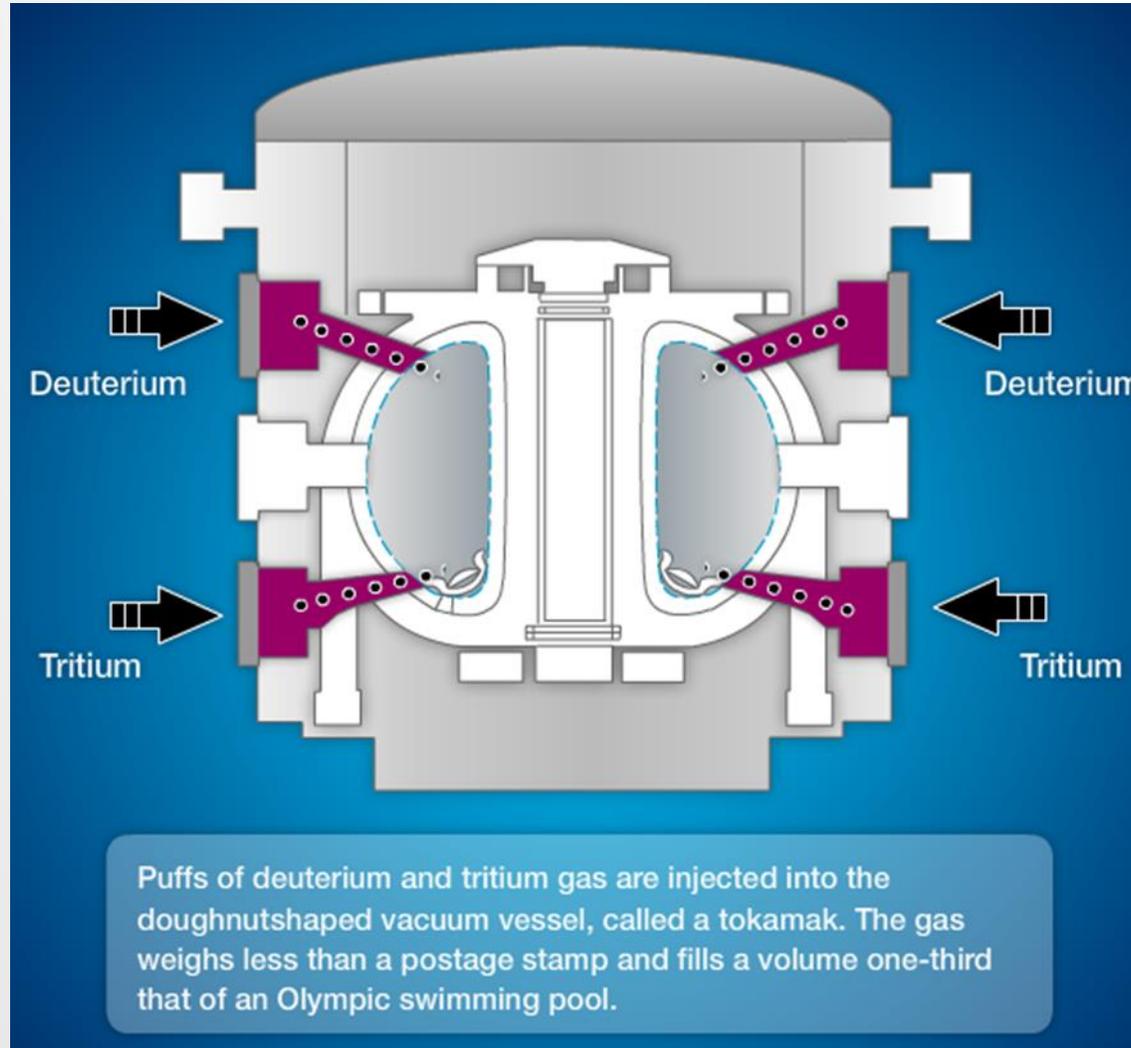
**ITER  $\rightarrow Q=10, 500 \text{ MW Potencia Fusión}$**



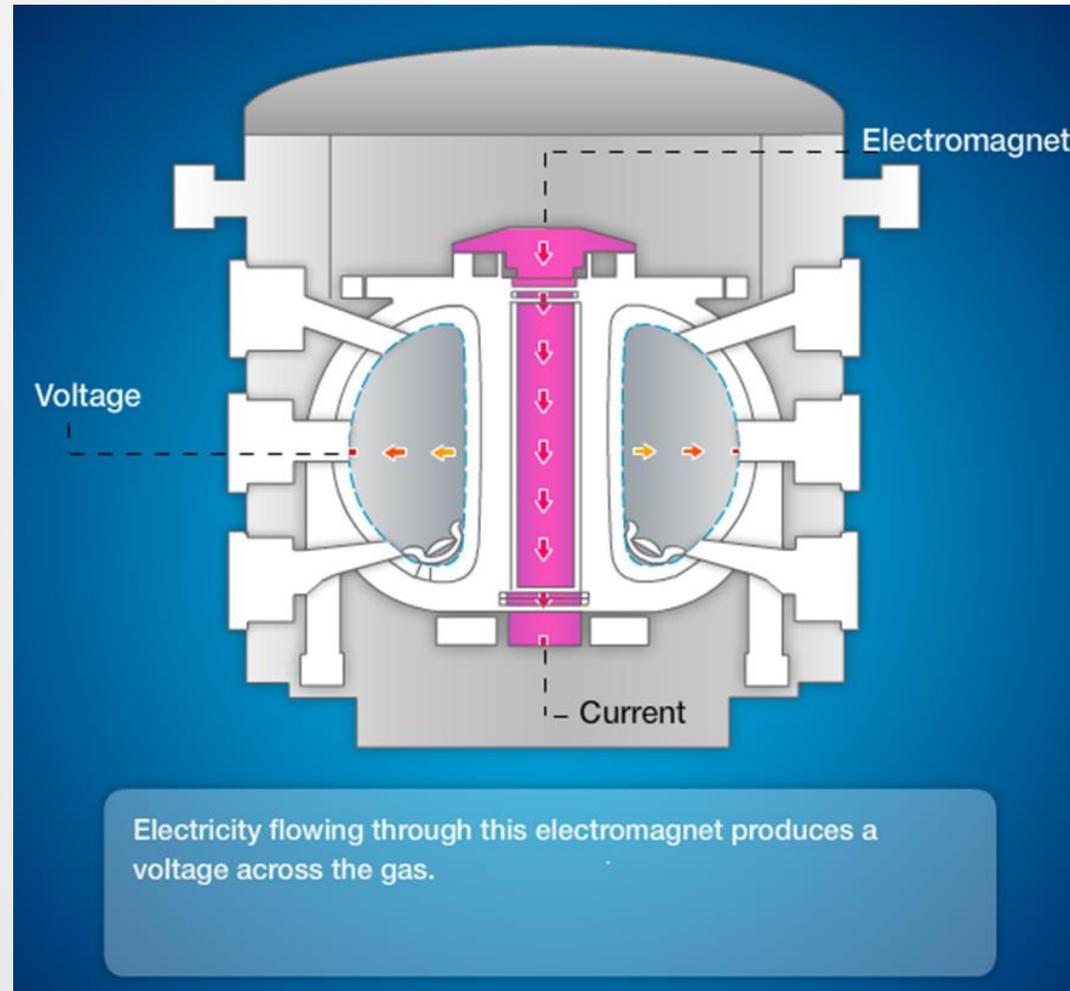


Cabe destacar que el concepto termodinámico no difiere del de otras centrales termoeléctricas actuales basadas en el ciclo Rankine: centrales térmicas convencionales (petróleo, gas o carbón), ciclos combinados, centrales solares de concentración o centrales nucleares de fisión. En todas se aprovecha el calor generado para calentar agua y convertirla en vapor. Este vapor se dirige a una turbina que hace girar un alternador o generador eléctrico. Por último, el vapor es condensado en un ciclo de refrigeración que evacúa el calor al foco frío exterior.

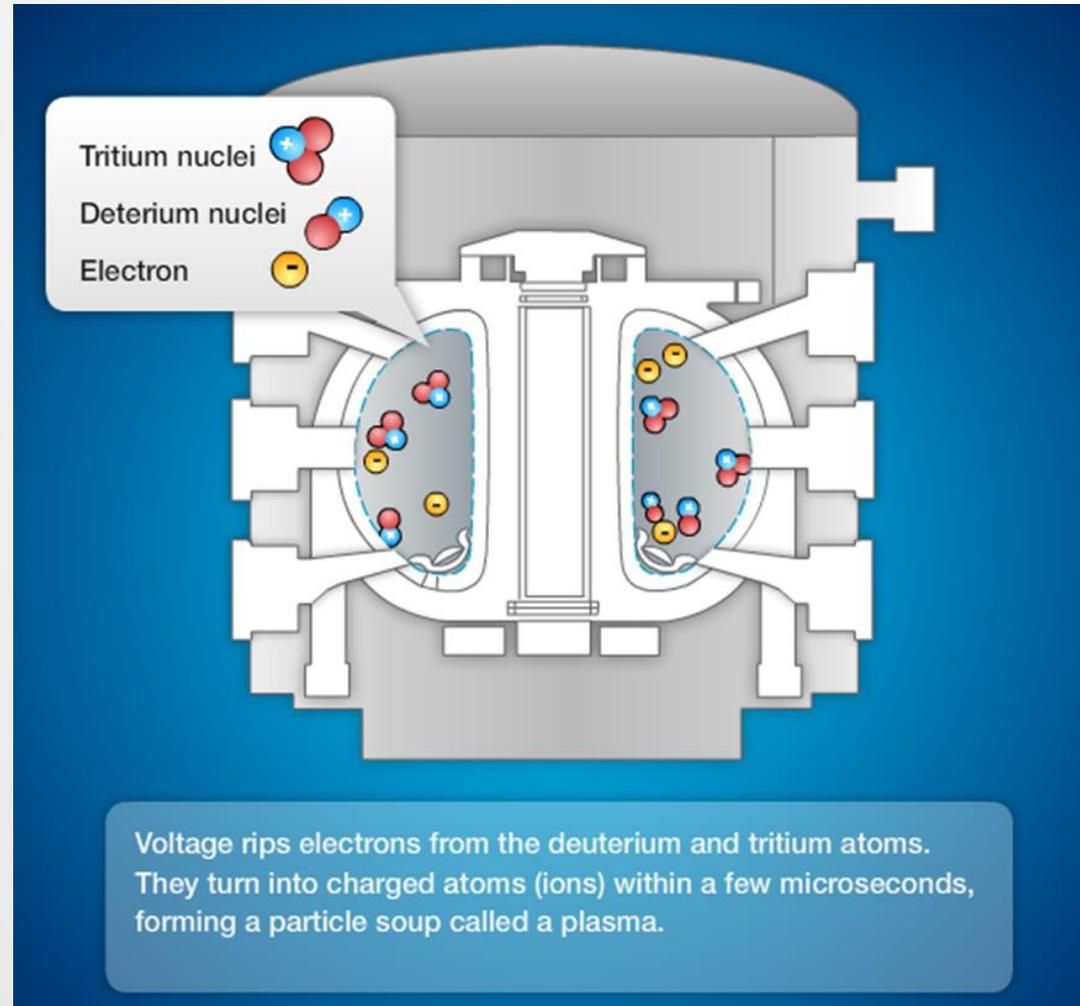
# SECUENCIA INICIO TOKAMAK 1



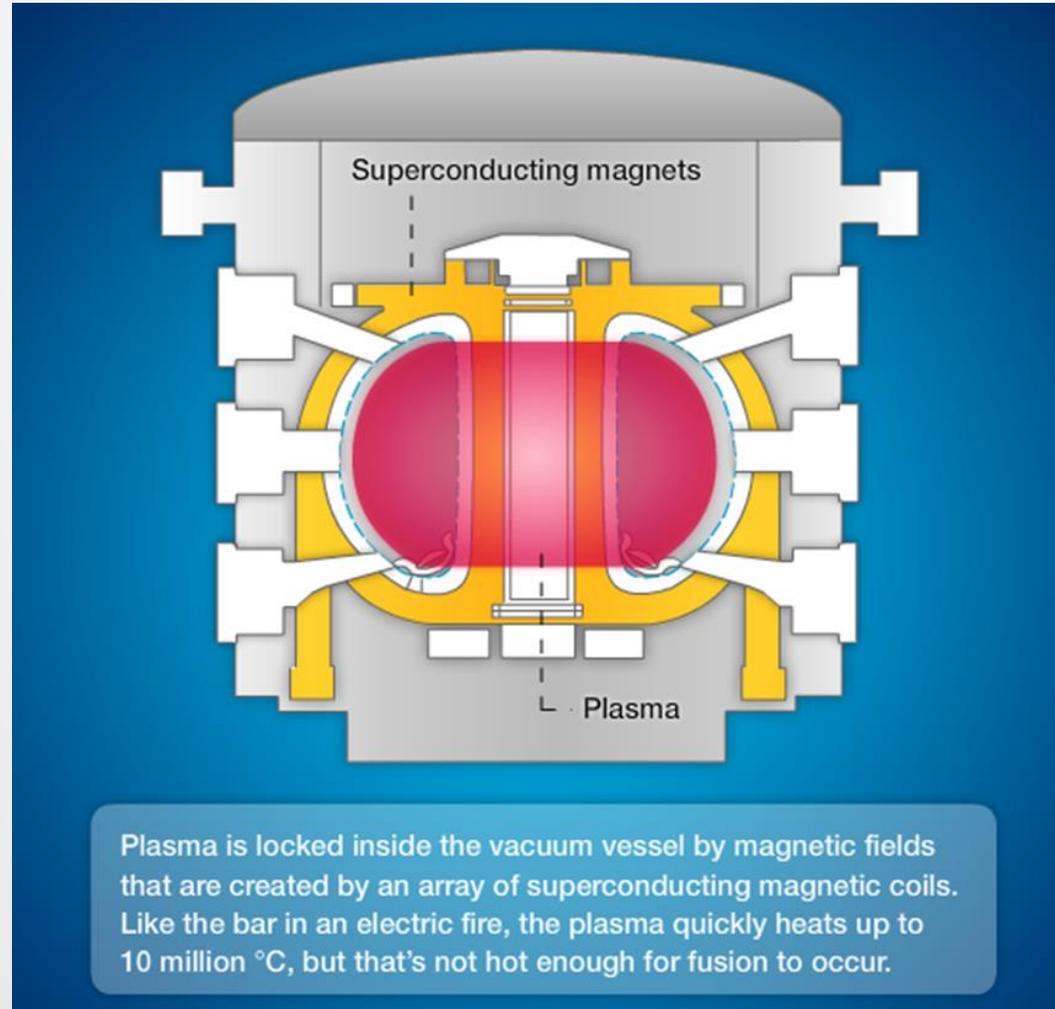
# SECUENCIA INICIO TOKAMAK 2



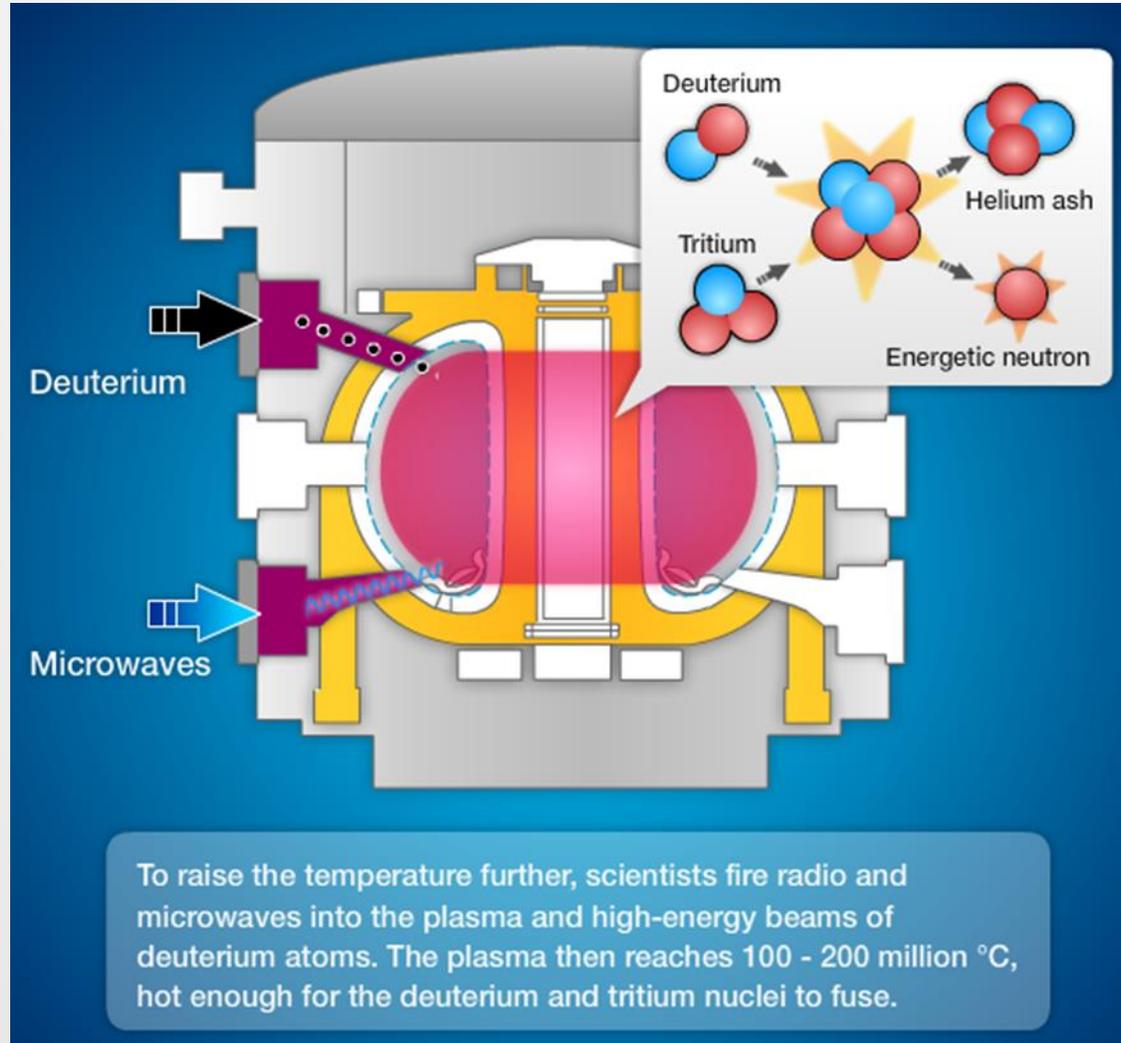
# SECUENCIA INICIO TOKAMAK 3



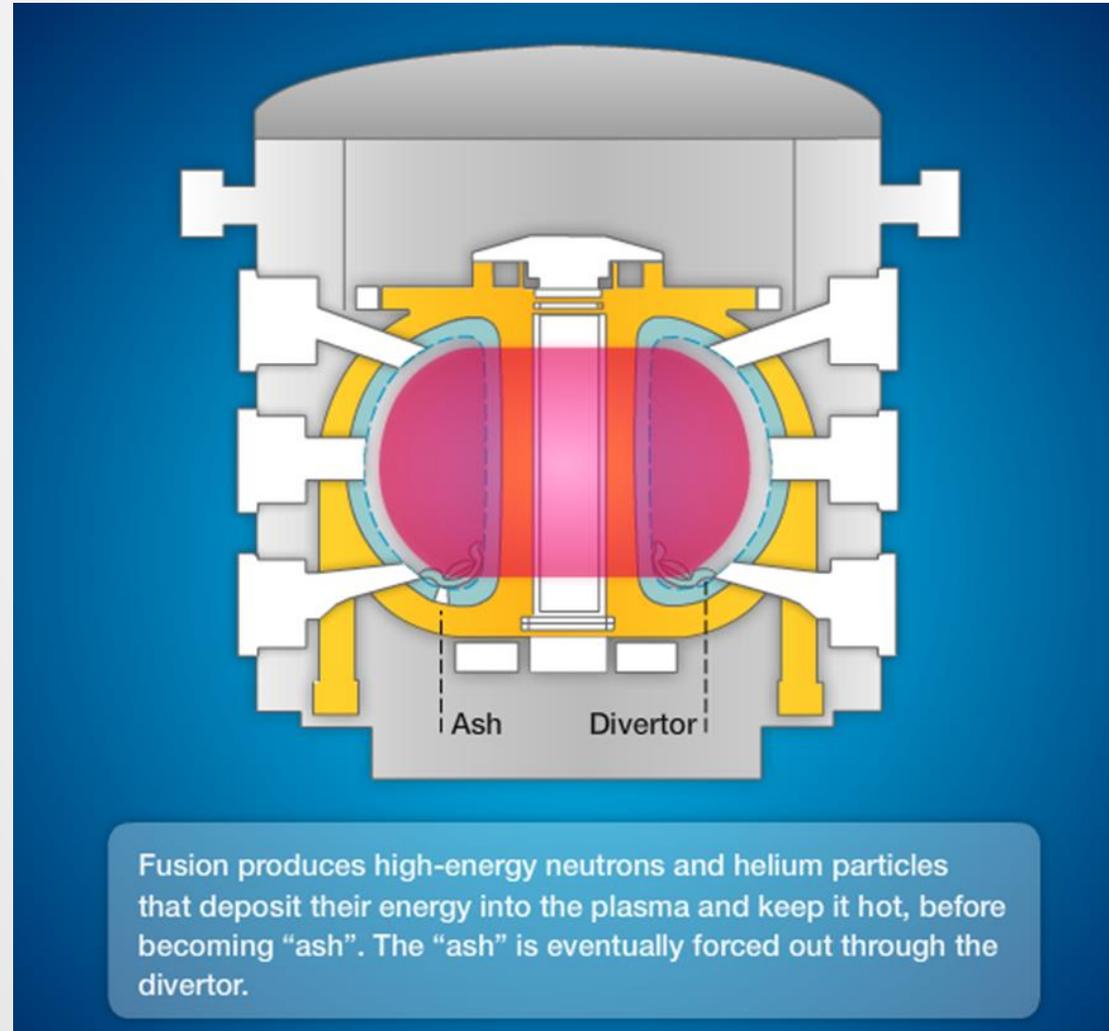
# SECUENCIA INICIO TOKAMAK 4



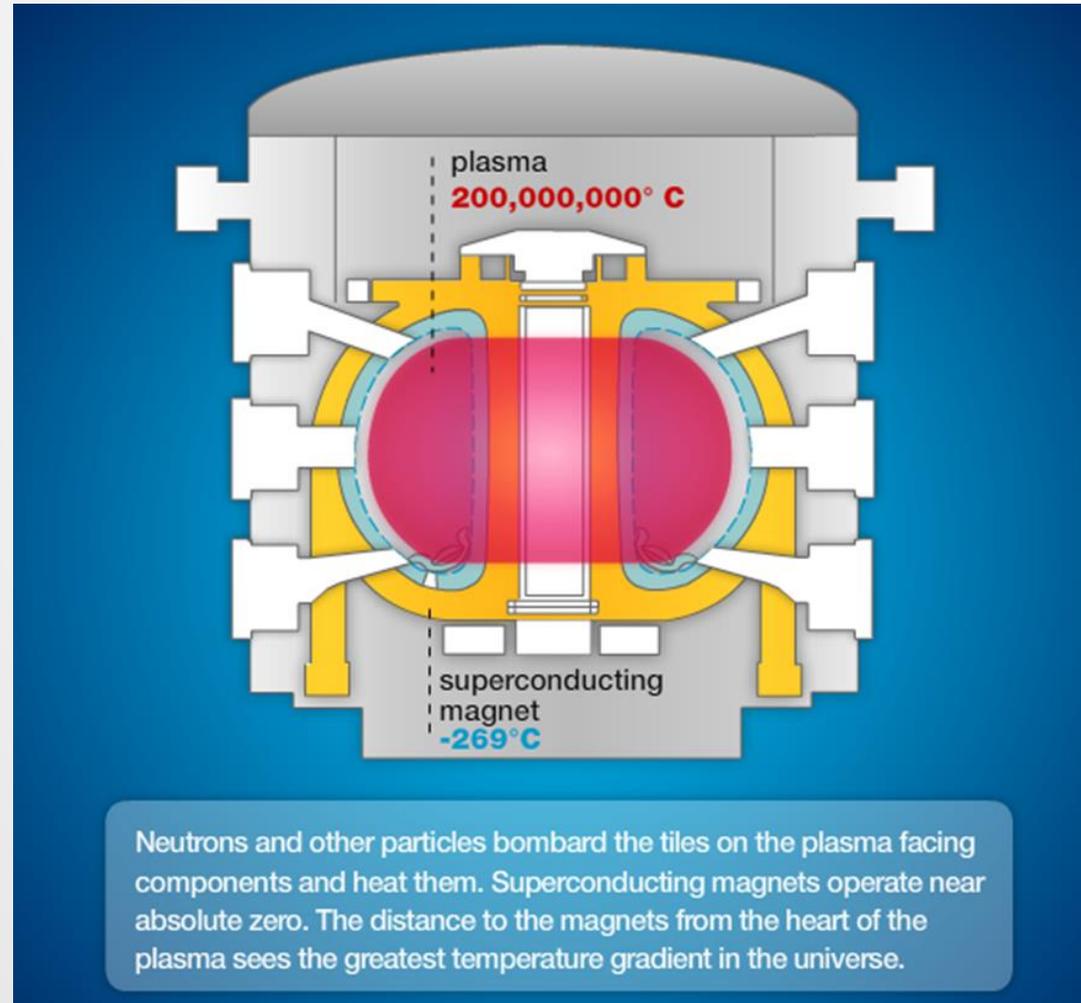
# SECUENCIA INICIO TOKAMAK 5



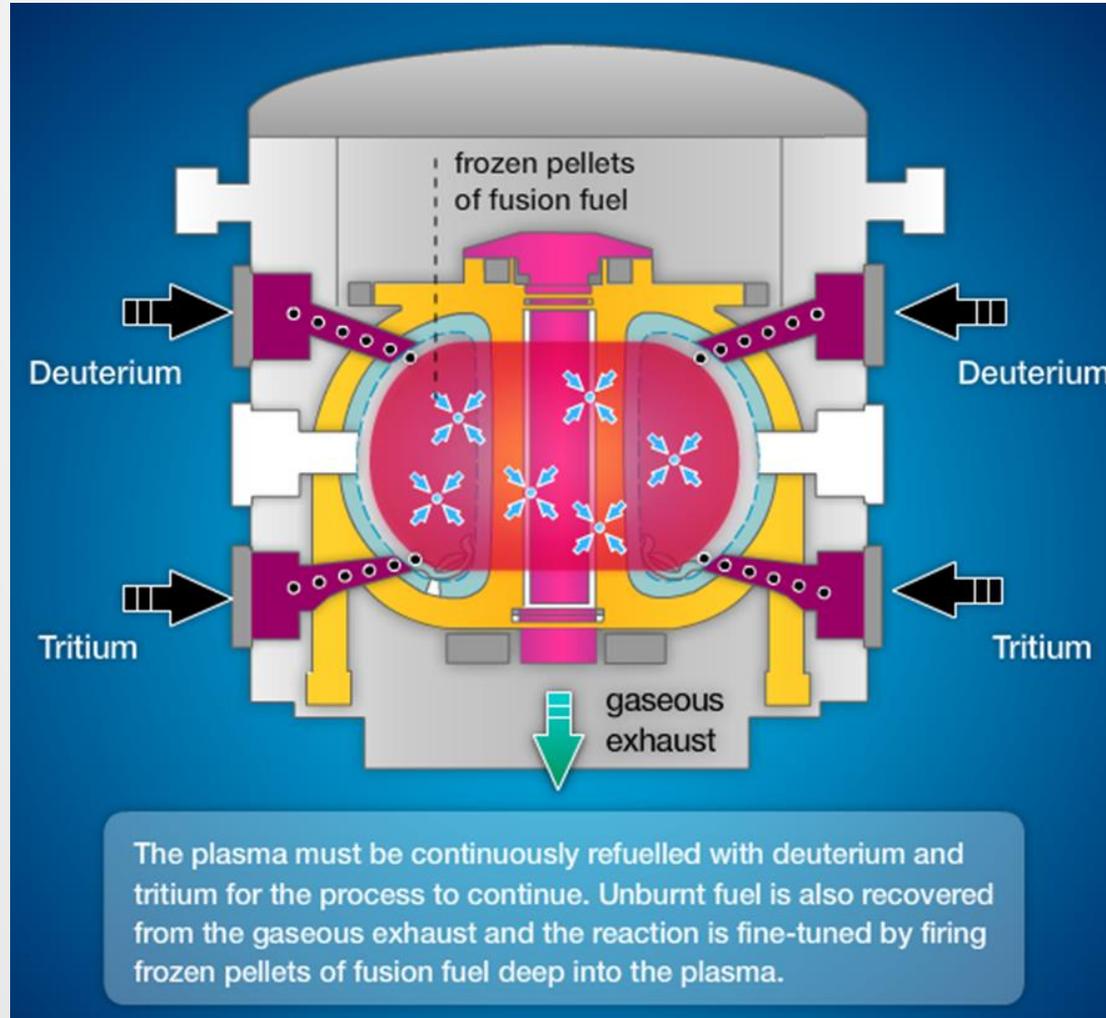
# SECUENCIA INICIO TOKAMAK 6



# SECUENCIA INICIO TOKAMAK 7



# SECUENCIA INICIO TOKAMAK 8





# PROYECTO ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR)

Descripción

# “For the benefit of mankind ”

The idea for ITER originated from the Geneva Superpower Summit in 1985 where Presidents Gorbachev and Reagan proposed international effort to develop fusion energy...

...“as an inexhaustible source of energy for the benefit of mankind”.



China, Europe, India, Japan, Korea, Russian Federation and the United States of America signed the ITER Agreement on 21 November 2006 in the Elysee Palace, Paris



## **ITER: un proyecto internacional**

El Proyecto ITER es un paso muy importante en el desarrollo de la energía de fusión, con una vida útil experimental de 35 años. Sus resultados tienen un interés internacional fundamental y constituye, por tanto, un proyecto auténticamente mundial.

La idea del ITER como experimento internacional fue inicialmente propuesta en 1985 y comenzó como una colaboración entre la antigua Unión Soviética, los Estados Unidos, la Unión Europea y Japón, bajo los auspicios de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA).

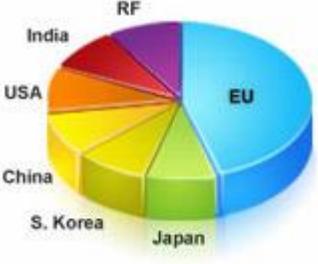
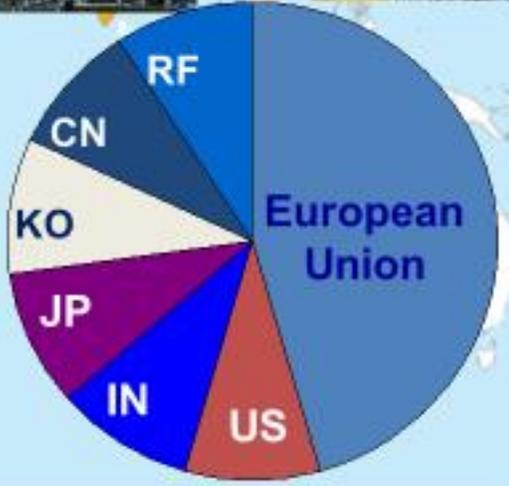
En la actualidad, el consorcio internacional está integrado por los Estados Unidos, la Federación Rusa, India, Japón, la Unión Europea, la República Popular China y la República de Corea, y se espera la incorporación de nuevos países a medida que el Proyecto ITER pase del diseño a la realidad.

# The Domestic Agencies



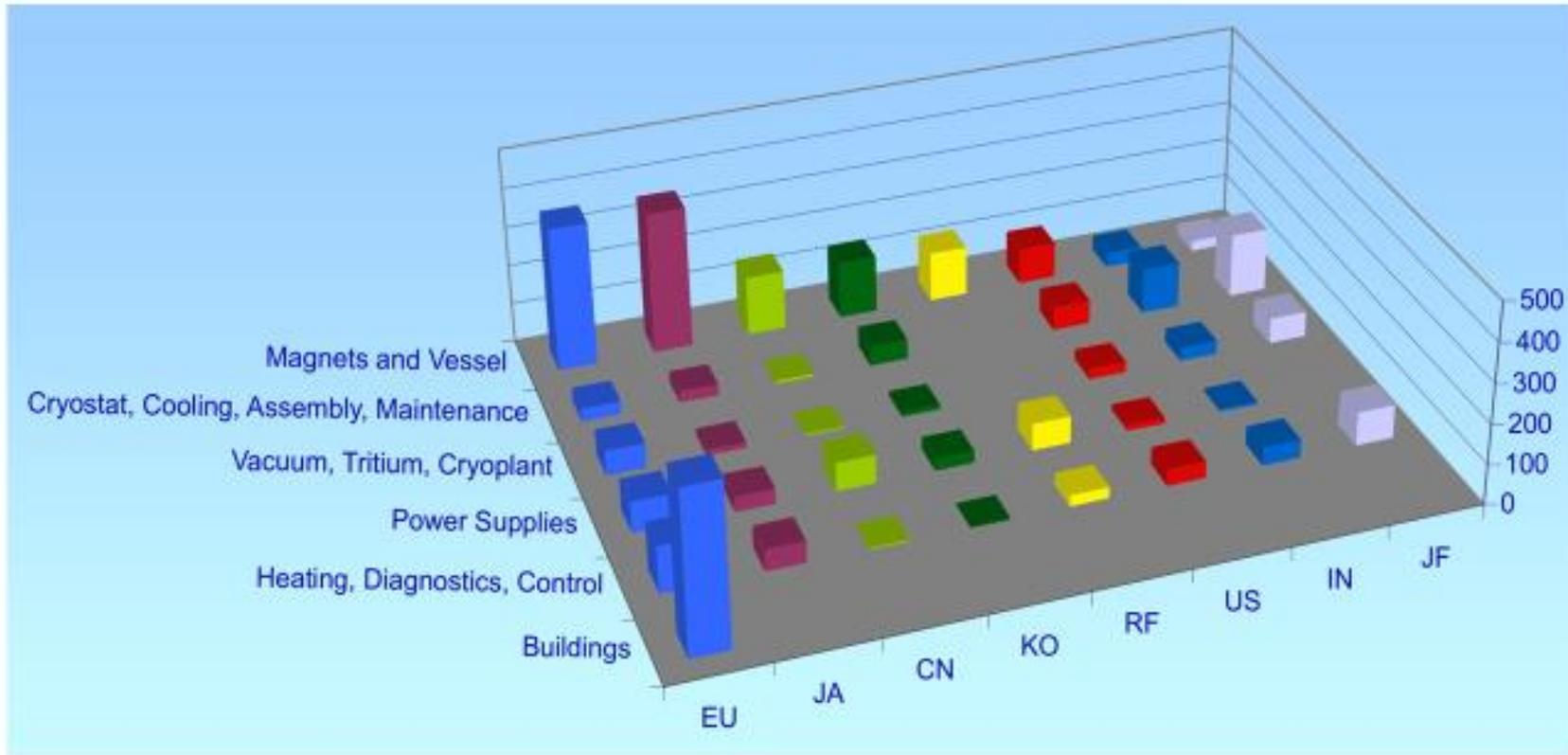
 **ITER Partners**

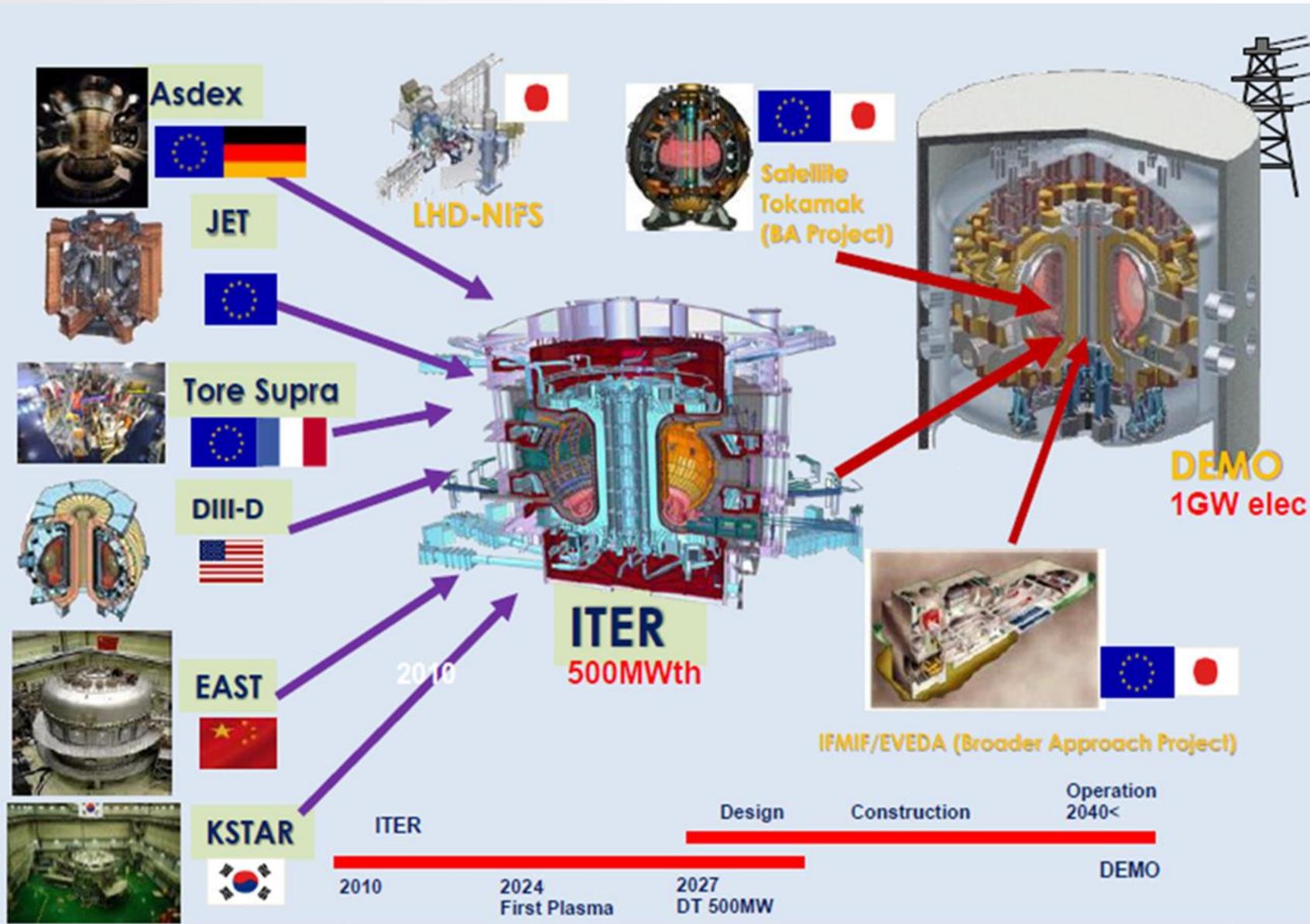
The ITER Domestic Agencies are responsible for implementing the procurement activities under each Member's responsibility



# ITER Procurement Strategy

A unique feature of ITER is that almost all of the machine will be constructed through *in kind procurement* from the Members





Muchos de los elementos probados en ITER se utilizará para una central eléctrica de prueba (DEMO). Paralelamente al desarrollo en ITER, la investigación avanzada sobre los materiales de fusión favorecerá la búsqueda de soluciones tecnológicas necesarias para la planta DEMO y las primeras plantas de fusión comerciales.

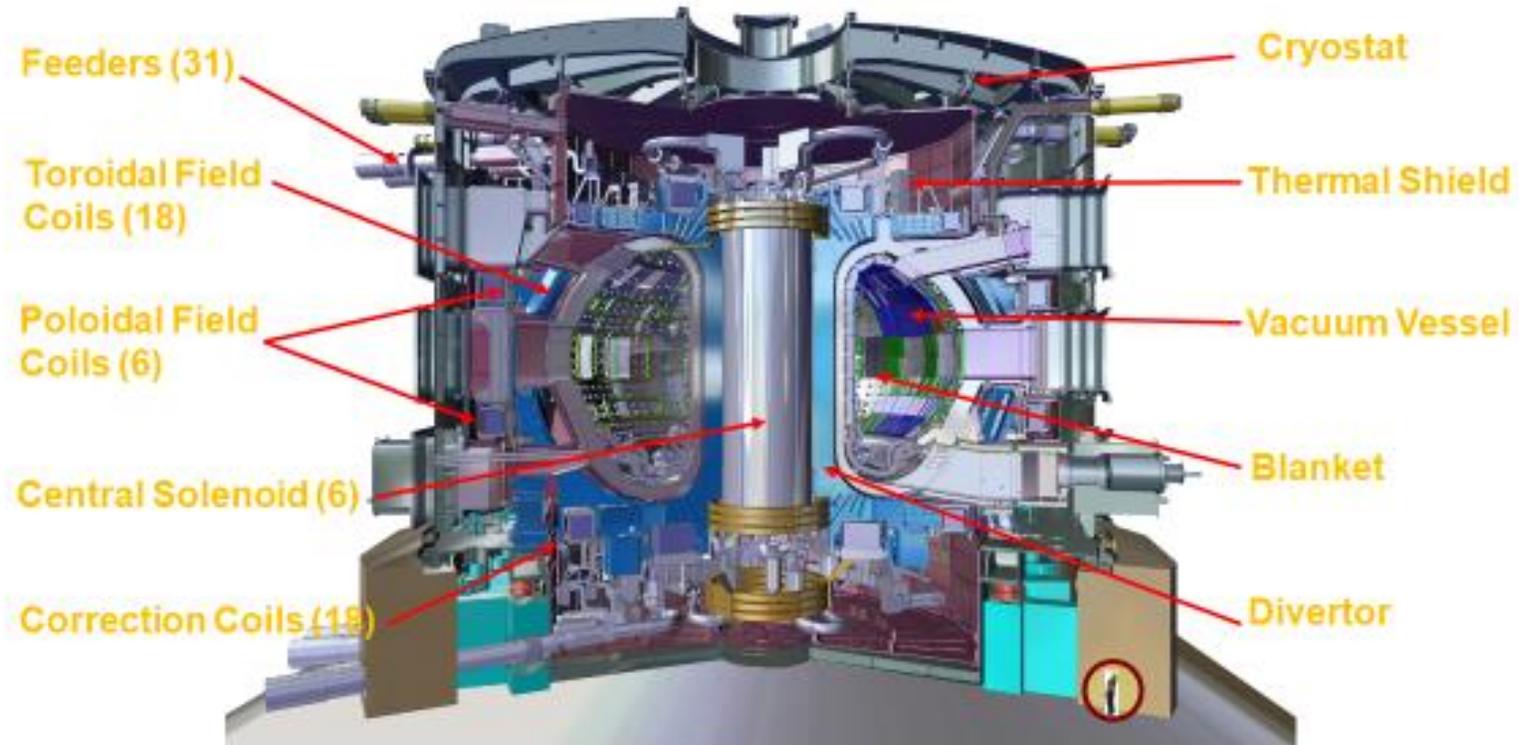
<https://www.iter.org/>



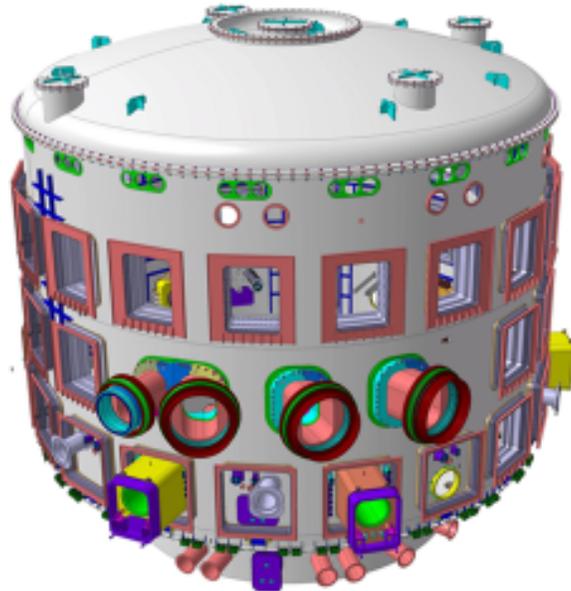
<https://f4e.europa.eu>

## ITER Tokamak

---



## Tokamak – Cryostat



Cryostat is a single wall fully welded stainless steel cylindrical chamber with internally vertical and toroidal ribs. It has top dome shape lid and bottom flat head.

Cryostat Outside Diameter (max)	28.54 m
Cryostat Height	29.25 m
Wall Thickness	40mm-180mm
Number of Sections	4
Main cylinder Shell Thickness	50 & 60 mm
Material of Main Construction	Dual mark304L/304
Toroidal Resistance	>10 $\mu\Omega$
Design base Pressure	$1 \times 10^{-4}$ Pa
Required Leak Rate of completed Cryostat (including inside components)	$\leq 1 \times 10^{-4}$ Pam <sup>3</sup> /s
- Cryostat Surface Area	~3400 m <sup>2</sup>
- Interior Free Volume	~8500 m <sup>3</sup>
- Interior Total Volume	~16000 m <sup>3</sup>
Mass (Approximate)	
- Top lid Main	656 ton
- Upper cylinder	600 ton
- Lower Cylinder (+ TCPH)	809 ton (1023 ton)
- Base Section	1250 ton
- Total mass	~3500 ton

**Criostato:** Recipiente aislado térmicamente que permite mantener en su interior temperaturas muy bajas. En la tecnología de fusión se emplea para reducir el contacto térmico entre los componentes del **tokamak** refrigerado criogénicamente y otros sistemas.

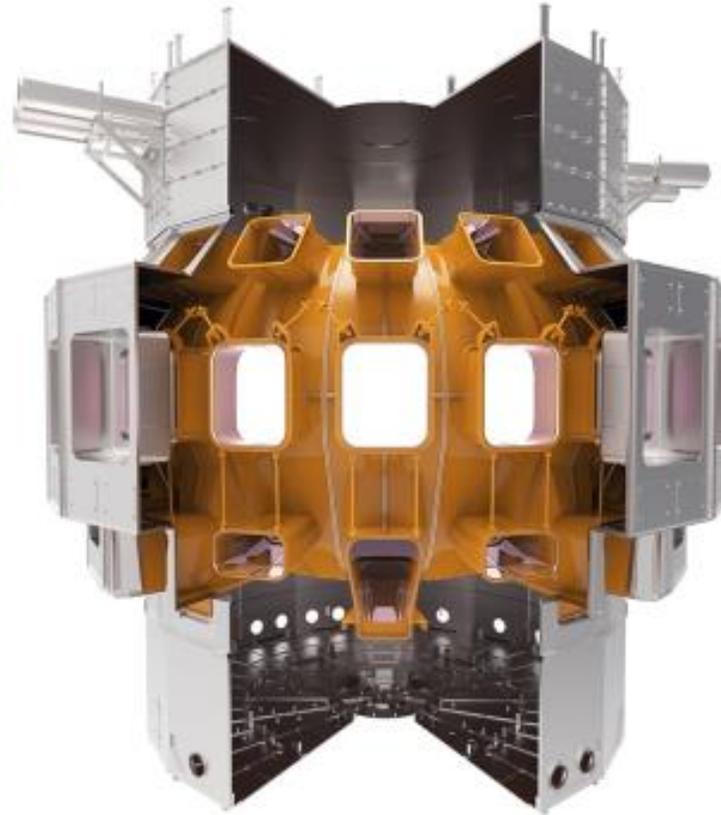
## Tokamak – Thermal Shield

---

The thermal shield consists of stainless steel panels with a low emissivity surface ( $<0.05$ ) that are actively cooled by helium gas flowing inside of a cooling tube welded on the panel surface.

During plasma operation, the temperature of the helium gas ranges from 80 K and 100 K.

---



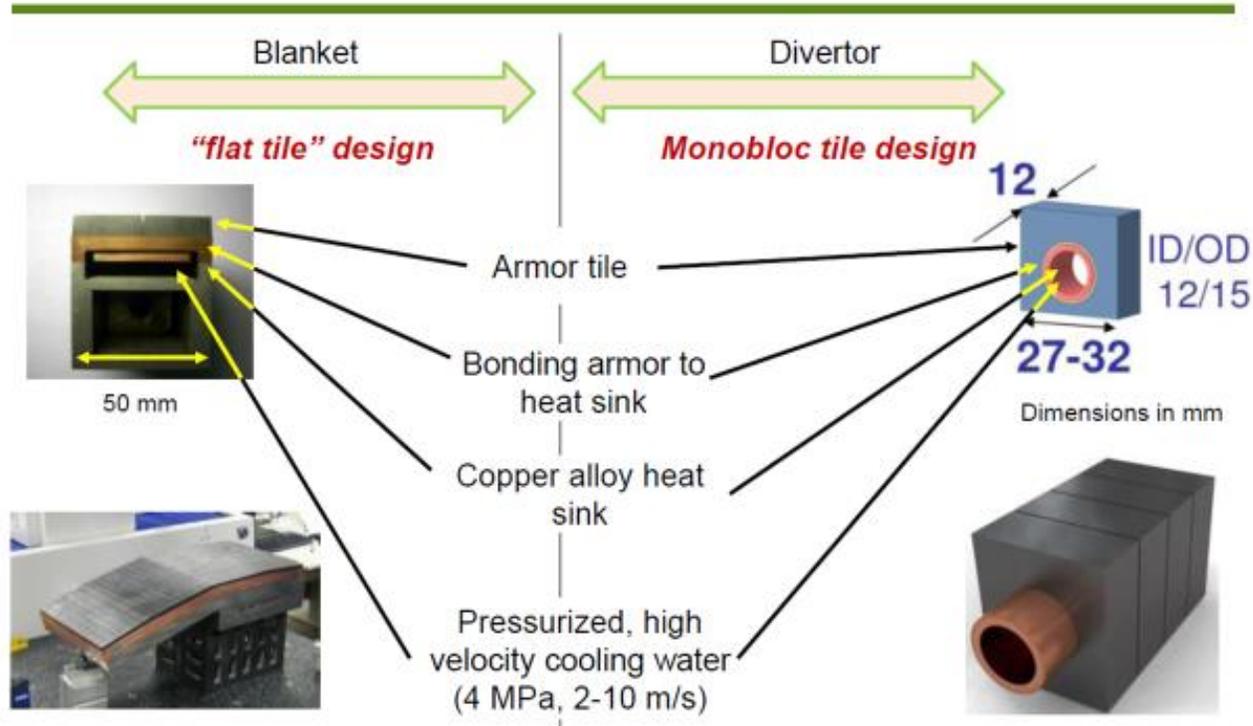
## Tokamak – Vacuum Vessel

---

- All-welded structure mainly constituted by the main vessel, the port structures and the supporting system
- Torus-shaped with double wall structure filled by water & shielding (height 13m & diameter 20m)
- The VV is divided into 9 toroidal sectors (40° toroidal angle) joined by field welding. Same design excepted for 3 irregulars for neutral beam system.
- Main material: SS 316L(N)-IG, low Nitrogen ITER Grade



## Tokamak – Blanket and Divertor



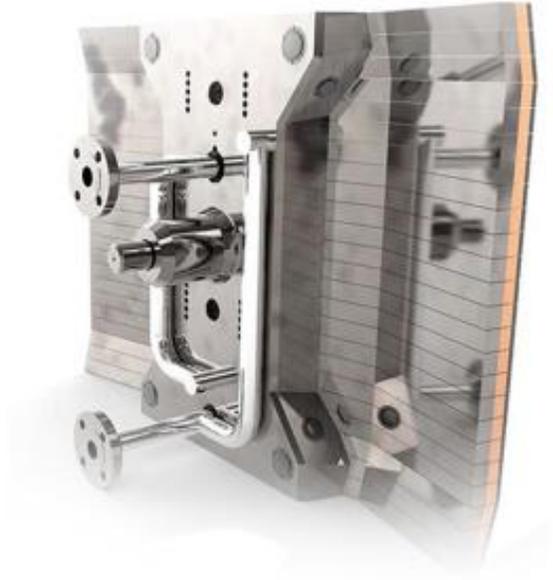
**Blanket** (manto): En una instalación de fusión nuclear, conjunto de módulos instalados de modo que recubren el interior de la cámara de vacío y preparados para soportar una elevada carga térmica y un intenso flujo neutrónico. Su misión es frenar los neutrones y transferir calor al sistema de refrigeración.

**Divertor** (desviador): Su misión es dirigir mediante campos magnéticos las partículas del borde del plasma a una cámara separada donde chocan con unas placas y son neutralizadas. El desviador evita (al igual que el limitador) que las partículas choquen con la primera pared degradando sus propiedades y ocasionando la liberación de partículas secundarias que enfriarían el plasma. En un reactor, el desviador incluye un sistema de extracción de las partículas neutralizadas.

## Tokamak – Blanket

---

- The first wall panels are the detachable, front-facing elements of the blanket that are designed to withstand the heat flux from the plasma.
- These components are made of beryllium tiles bonded with a copper alloy and 316L (N) stainless steel.

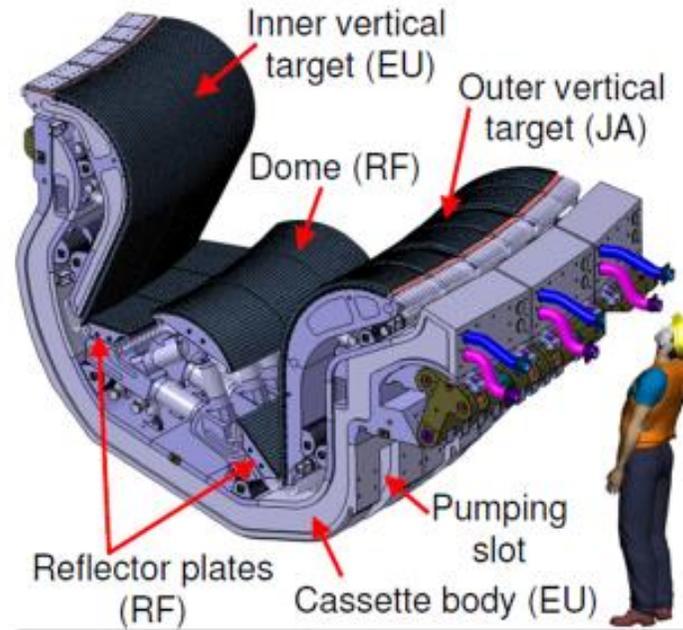


440 blanket modules

## Tokamak –Divertor

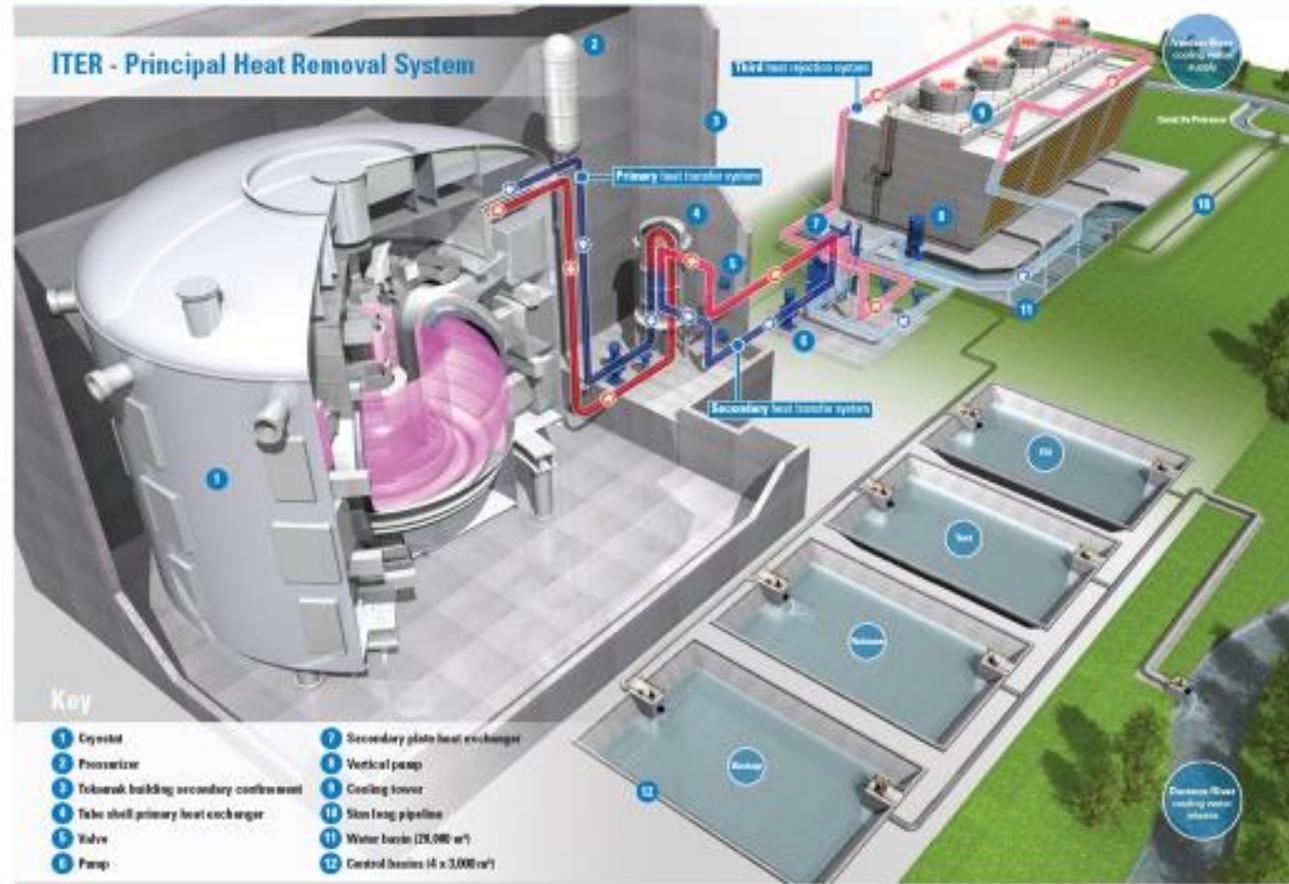
---

The divertor will use exclusively tungsten as armour material  
Highest melting point of any metal  
Second hardest material (behind diamond)  
Does not significantly retain plasma fuel (D, T)  
Low erosion under normal divertor operating conditions

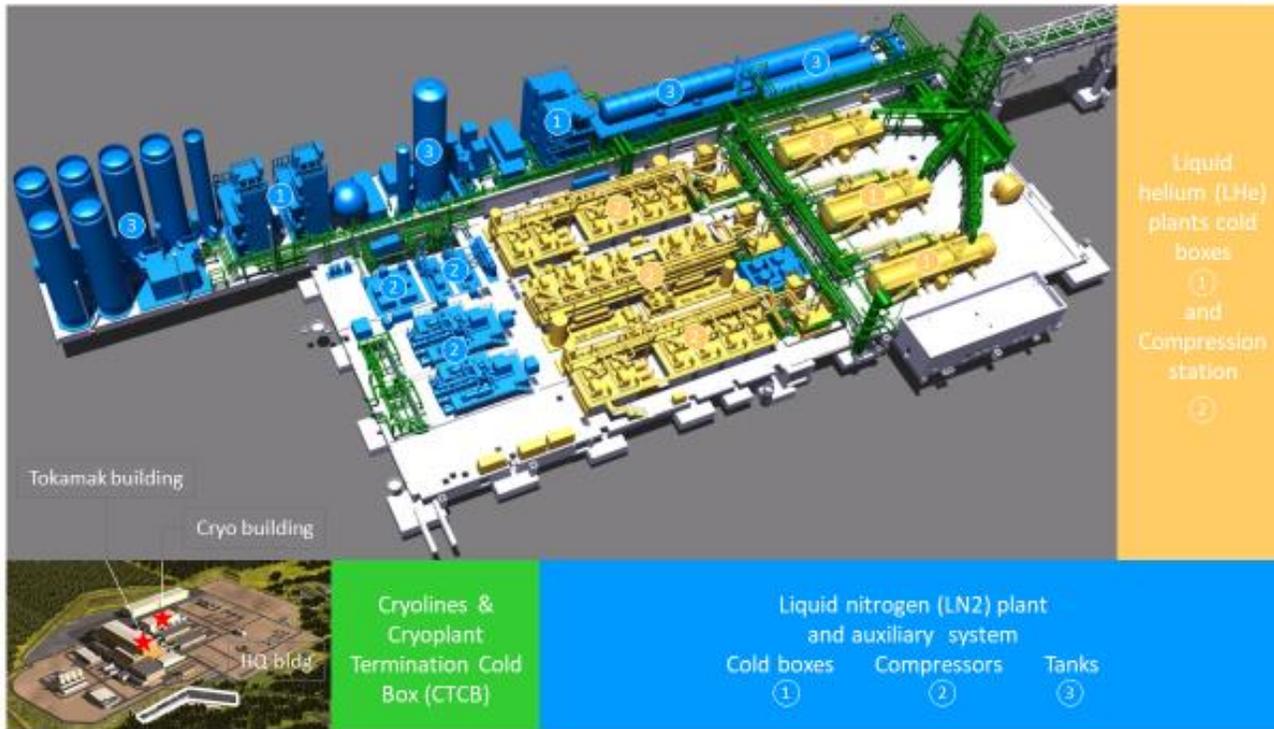


- Reduce impurity contamination
- Exhaust He produced from fusion reactions
- Needs magnetic “X-point” which is what allows the plasma to reach “high” confinement mode (H-mode)

## “Industrial“ Systems – Cooling Water System



## Industrial” Systems – Cryoplant



### Production Capacities

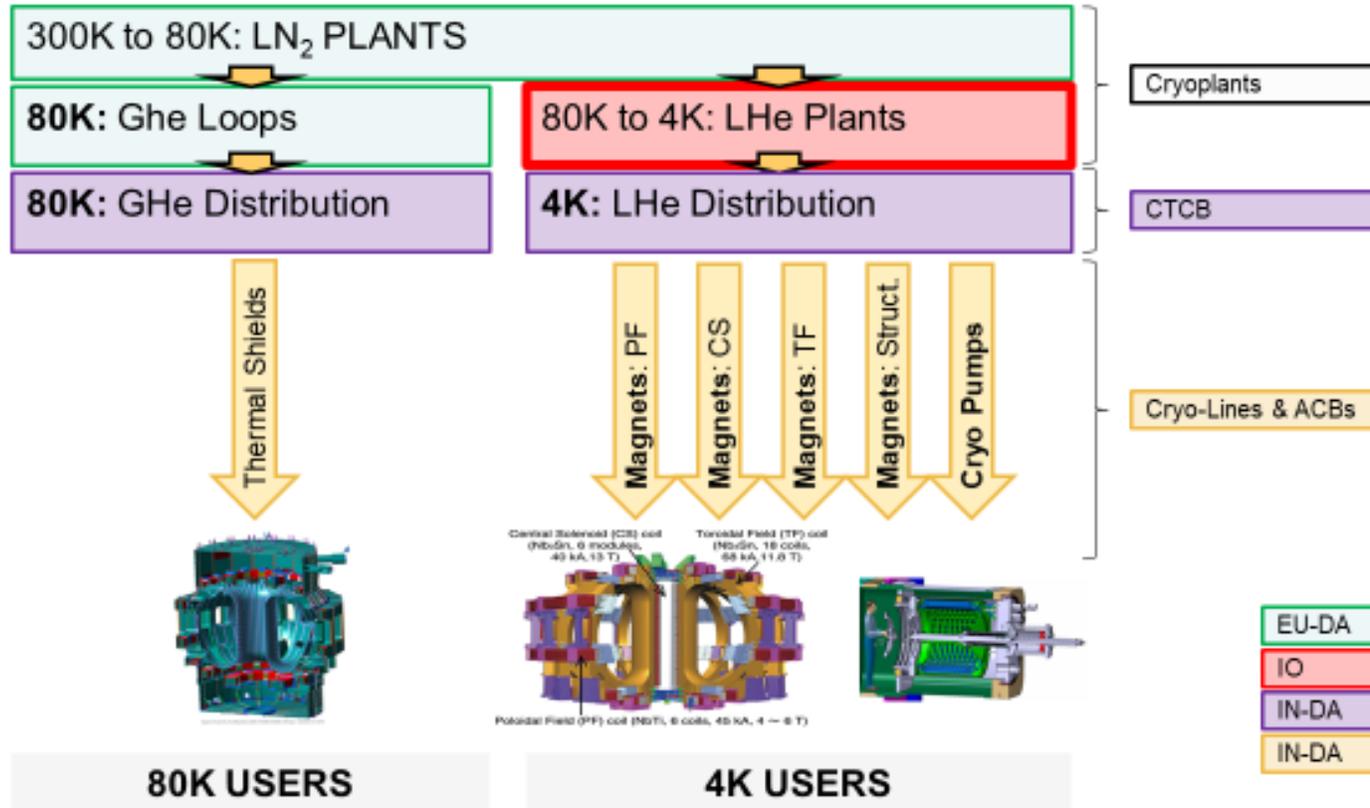
80K He Loops: (2 x 4000 g/s in between 80K to 100K)  
*Thermal Shields*

LN2 Plants: avg. 1100 kW @ 80 K  
*80K He Loop, LHe Plants pre-cooling*

GN2 Generator: avg. 1550 Nm<sup>3</sup>/h  
*Tokamak users, Leaks, Purifier/Dryers, Air Instrument redundancy*

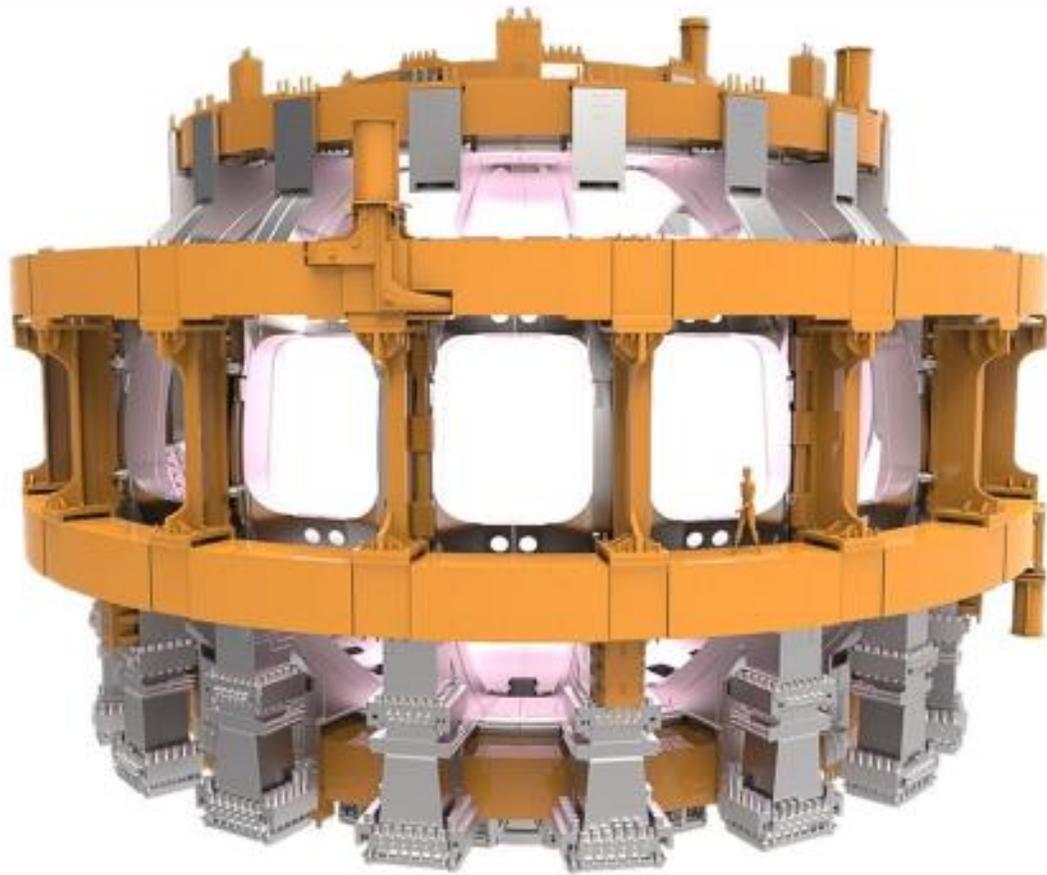
## Industrial” Systems – Cryogenic System

### PROCESS: Schematic Presentation



## Magnets – Poloidal Field & Central Solenoid

---



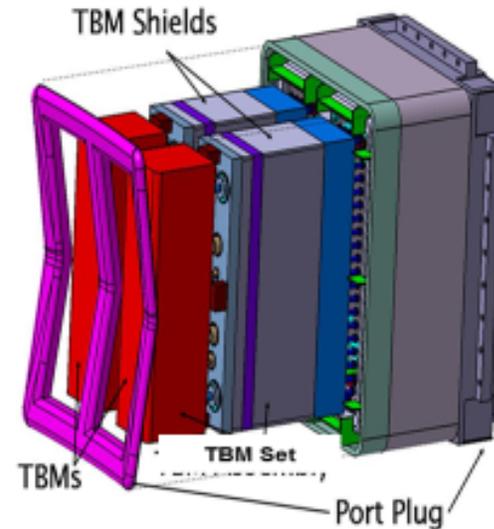
## Tritium Breeding Blankets

---

A Fusion Power reactor needs to produce by itself all the Tritium that is needed as fuel for the D-T plasma (Tritium-breeding self-sufficiency) while ITER is using external Tritium source.

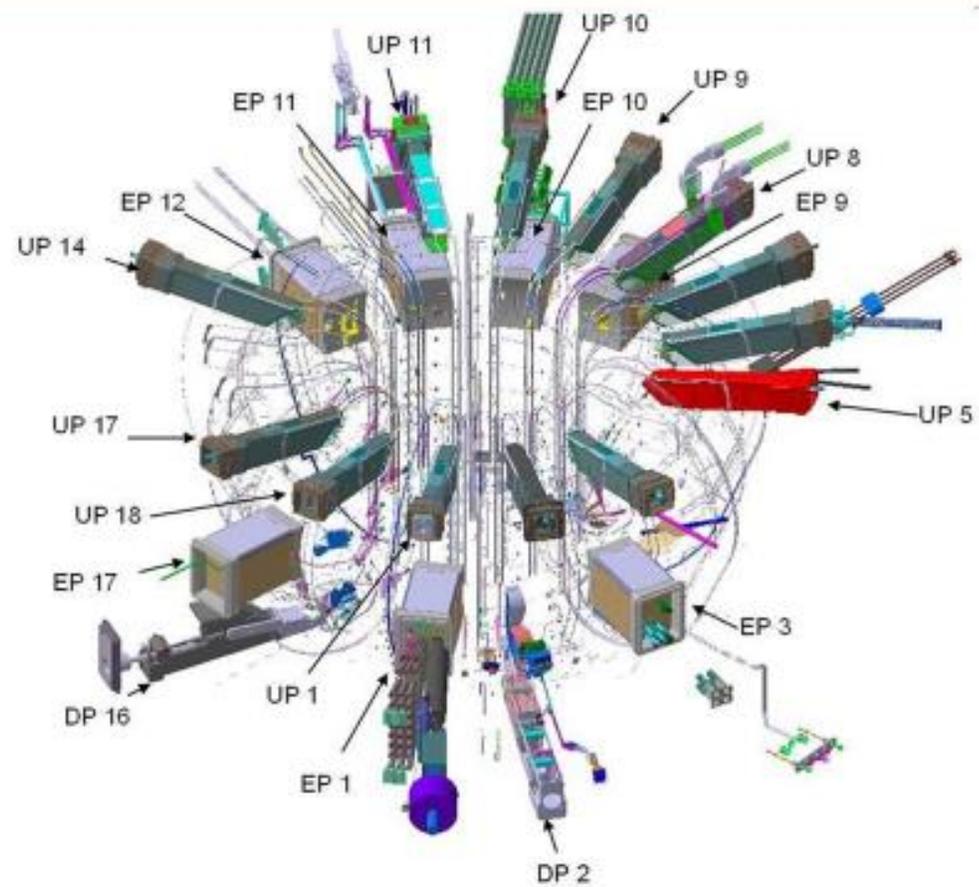
*“ITER should test tritium breeding module concepts that would lead in a future reactor to tritium self-sufficiency, the extraction of high grade heat and electricity production.”*

- The Tritium Breeding Blankets (TBBs) have the 2 main functions:
  - **producing** all the required **Tritium** fuel,
  - **extracting the heat** for power generation
- The **“ITER TBM Program”** foresees the operation of **six TBMs**, located in 3 dedicated ITER equatorial ports (2 TBMs per port), with their own ancillary systems.



## Diagnostics

---



# Problemas relevantes en FCM (I)

- **Producción de tritio**

Los estudios europeos sobre el manto reproductor se concentran en dos modelos: el de Li-Pb, y el de bolas cerámicas fértiles, ambos refrigerados por helio. Esta investigación es crucial para el desarrollo del ciclo del tritio en un reactor de fusión.

- **El confinamiento**

Sabemos que, para que la fusión tenga lugar, el plasma tiene que estar confinado el tiempo suficiente para llegar a las condiciones necesarias.

Es por ello primordial mantener la pureza del mismo, ya que si no la reacción dejará de ser autosostenida y terminará. Esto implica mantener el plasma lejos de las paredes de la cámara, ocupando un volumen bien delimitado en el espacio. De acuerdo a los planes de diseño actuales, se necesitarán 80.000 km de cables superconductores ( $Nb_3Sn$ ) para cablear las 18 bobinas toroidales, el solenoide central encargado de inducir la corriente en el plasma y otra serie de bobinas auxiliares para el “control fino” del campo magnético. Con un total de 48 electroimanes, la generación del campo magnético de 11,8 T (Tera) - es 200.000 veces el campo de la Tierra- ocupa la mayor parte de la máquina, sumando 6.540 toneladas.

# Problemas relevantes en FCM (II)

## Las paredes de la cámara y divertor

Una vez conseguida la reacción de fusión, se generarán ingentes cantidades de calor y energía, de la que el 80% escapará en forma de neutrones rápidos (14,1 MeV). Como los neutrones no tienen carga, no se pueden reconducir con ningún campo magnético hacia un lugar concreto. Este ha sido uno de los mayores retos ingenieriles desde el principio, ya que toda la primera pared de la cámara estará expuesta a un intenso bombardeo de neutrones altamente energéticos; por tanto, los componentes que dan la cara al plasma deben cumplir dos criterios de diseño:

- Ser lo suficientemente resistentes para aguantar tiempo suficiente (meses o años) a la radiación y temperatura. La elección del material de estas superficies ha sido uno de los problemas más rigurosos del diseño del reactor y queda mucho trabajo experimental por delante hasta llegar a una solución válida en un reactor comercial. El material escogido debería tener buena conductividad térmica para evacuar fácilmente el calor (estará expuesto a unos 3000° C), pero a la vez no puede activarse fácilmente, ya que se espera que las piezas aguanten 20 años dentro de un reactor. Se consideran dos opciones: el carbono reforzado con fibra de carbono (CFC) y el tungsteno (o wolframio).
- Ser capaces de evacuar eficazmente el calor que, recuperado mediante un circuito de agua fría, será el que permita generar energía eléctrica en una planta nuclear de fusión real. Para hacerse una idea, la superficie del sol emite 70 MW/m<sup>2</sup>, mientras que los últimos **tokamaks** producen sólo siete veces menos (10 MW/m<sup>2</sup>).

# Problemas relevantes en FCM (III)

## Temperatura

Se precisan más de 100 millones de grados para que arranque la fusión nuclear en el plasma del reactor. Gracias a los millones de amperios que se esperan inducir en el plasma, la temperatura se llevará, por efecto Joule, hasta unos 10 millones de grados. Para aportar la energía que falta hasta los cientos de millones de grados, se espera conseguirlo por dos medios: inyección de neutrones acelerados y el calentamiento por radiofrecuencia y microondas.

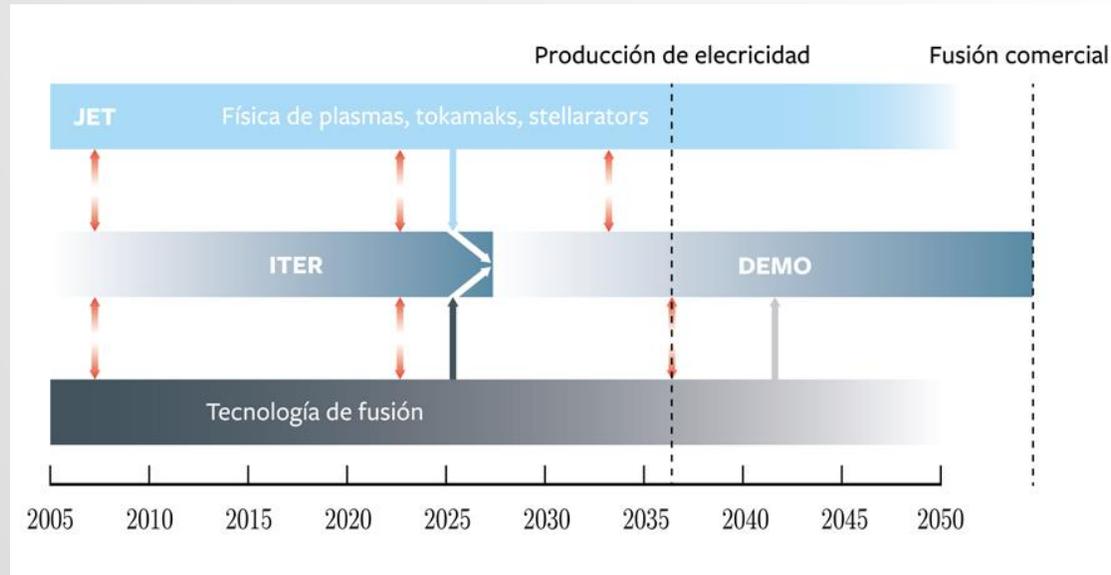
## Conseguir ultra alto vacío (entre $10^{-5}$ y $10^{-7}$ Pa)

Desde el punto de vista ingenieril, trabajar en condiciones de UHV (Ultra Alto Vacío, por sus siglas en inglés) implica olvidarse de todas las prácticas y los materiales comunes: plásticos, pegamentos, soldadura estándar, etc. Todos ellos tienden a expulsar pequeñas partículas de gas al exponerse al UHV. Las uniones son particularmente complicadas debido a las condiciones de tensión mecánica que deben afrontar: la interacción de las bobinas con el campo generado por la corriente eléctrica en el plasma y por otros imanes producirá grandes fuerzas pulsadas, lo que evidentemente implica que la fatiga podría degradar su estructura con el tiempo. Para resistir mejor estas fuerzas, se colocarán anillos de fibra de vidrio alrededor de cada electroimán, pretensados con una tensión equivalente a 6.000 toneladas.

# EL FUTURO DEMO

El proyecto DEMO (*DEMONstration Power Plant*), tiene como objetivo la producción en modo continuo de energía. Se espera que se produzcan 1,5 GW de energía eléctrica de forma continua. Su construcción se debería iniciar alrededor de 2030, estar en operación sobre 2040 y debería cumplir sus objetivos antes de 2050, aunque son esperables retrasos en el cronograma. En cambio ITER, busca la demostración de la producción de plasma autosostenido, no tendrá un ciclo de combustible “autosuficiente”. La figura muestra un cronograma de ITER y DEMO.

El diseño de DEMO no ha sido formalmente seleccionado y los requisitos de operación aún no están disponibles. Los códigos y modelos a utilizar tienen que ser aún desarrollados. El diseño se basará en gran medida en la física y tecnología validada previamente en ITER.



Los objetivos de DEMO son los siguientes:

- Producir energía con conexión a la red eléctrica.
- Obtener la cantidad de tritio necesaria para cerrar el ciclo del combustible.
- Demostrar que toda la tecnología para la construcción de una futura planta comercial es viable.

# VENTAJAS DE LA FUSIÓN

1. En la tierra, el combustible de los reactores de fusión estará compuesto por dos formas (isótopos) del gas hidrógeno: el deuterio y el tritio. Hay en torno a 33 miligramos de deuterio en cada litro de agua, y si todo él se fusionara con tritio podría generar una energía equivalente a 340 litros de petróleo.
2. La presencia natural de tritio en la tierra es sumamente baja, por lo que en el interior del reactor de fusión se producirá a partir del litio, un metal ligero y abundante.
3. Además de utilizar un suministro de combustible prácticamente ilimitado, no será necesario transportar materiales radiactivos para el funcionamiento cotidiano de las plantas de fusión, que serán intrínsecamente seguras, sin posibilidad de accidentes de reacción en cadena ni de colapso del reactor.
4. El proceso de fusión no producirá gases de efecto invernadero ni residuos radiactivos de larga duración, y puede ofrecer una fuente básica de energía sostenible continua a gran escala.

# CONCLUSIONES

La energía de fusión nuclear no será la única energía del futuro, las renovables sin duda estarán en primera fila, pero supondrá la alternativa energética única y capaz de suministrar la mayor energía por unidad de masa de la que el ser humano podrá disponer por varios ordenes de magnitud superior a cualquier otra, con propiedades de abundancia y seguridad.



Nov. 2018