

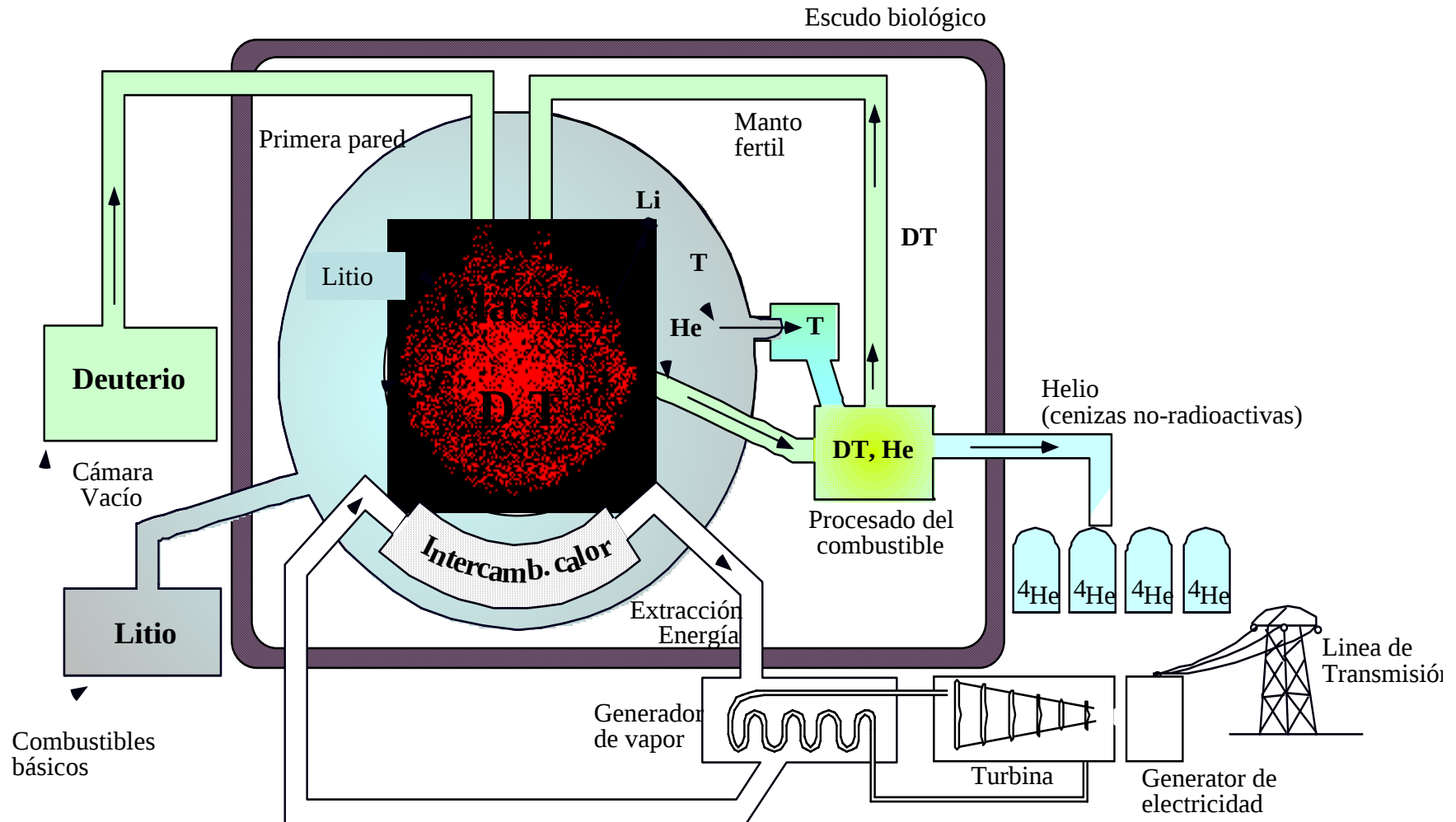
Perspectivas Actuales de la Fusión



Joaquín Sánchez

Laboratorio Nacional de Fusión (CIEMAT)

Planta de Fusión



Planta de Fusión

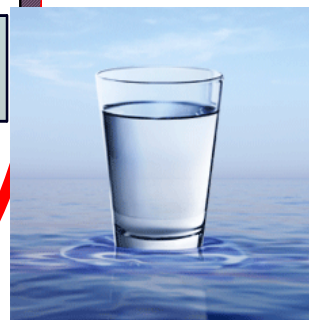
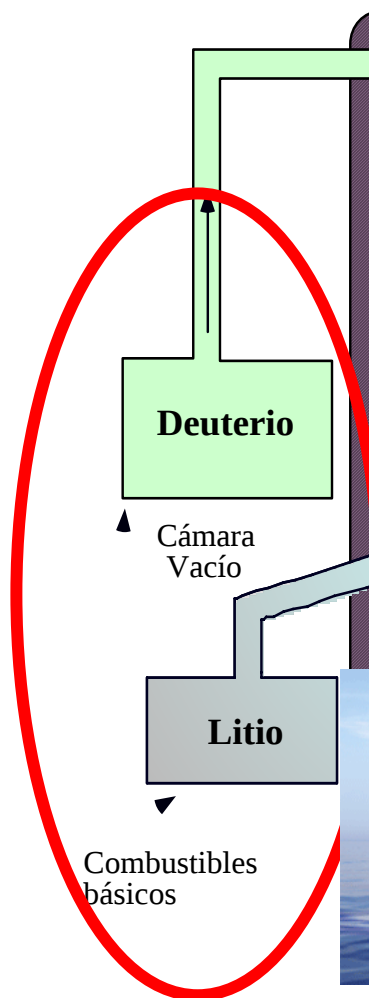
Deuterio: del agua del mar: 0.33 mg/litro

(Tritio) : se obtiene in-situ a partir del Litio mediante la reacción:



• **Litio:** de sales marinas o minas de sal

Abundante y distribuido por todo el planeta



+



30 gr. Li

=

**Consumo de
energía de un
europeo
promedio durante
30 años**

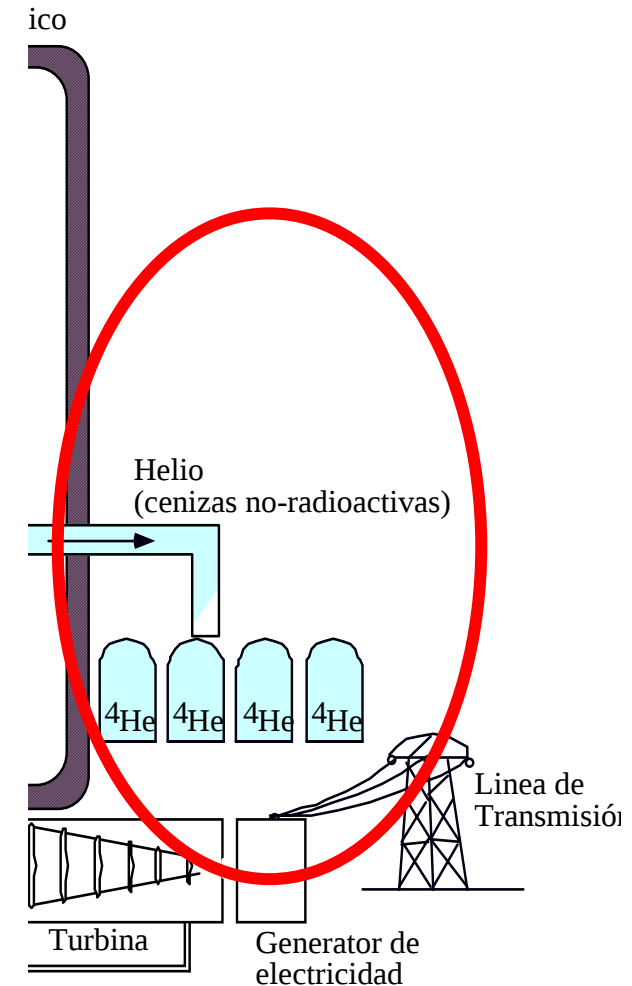
- Reservas estimadas para >10.000.000 años a 15 TW

Planta de Fusión

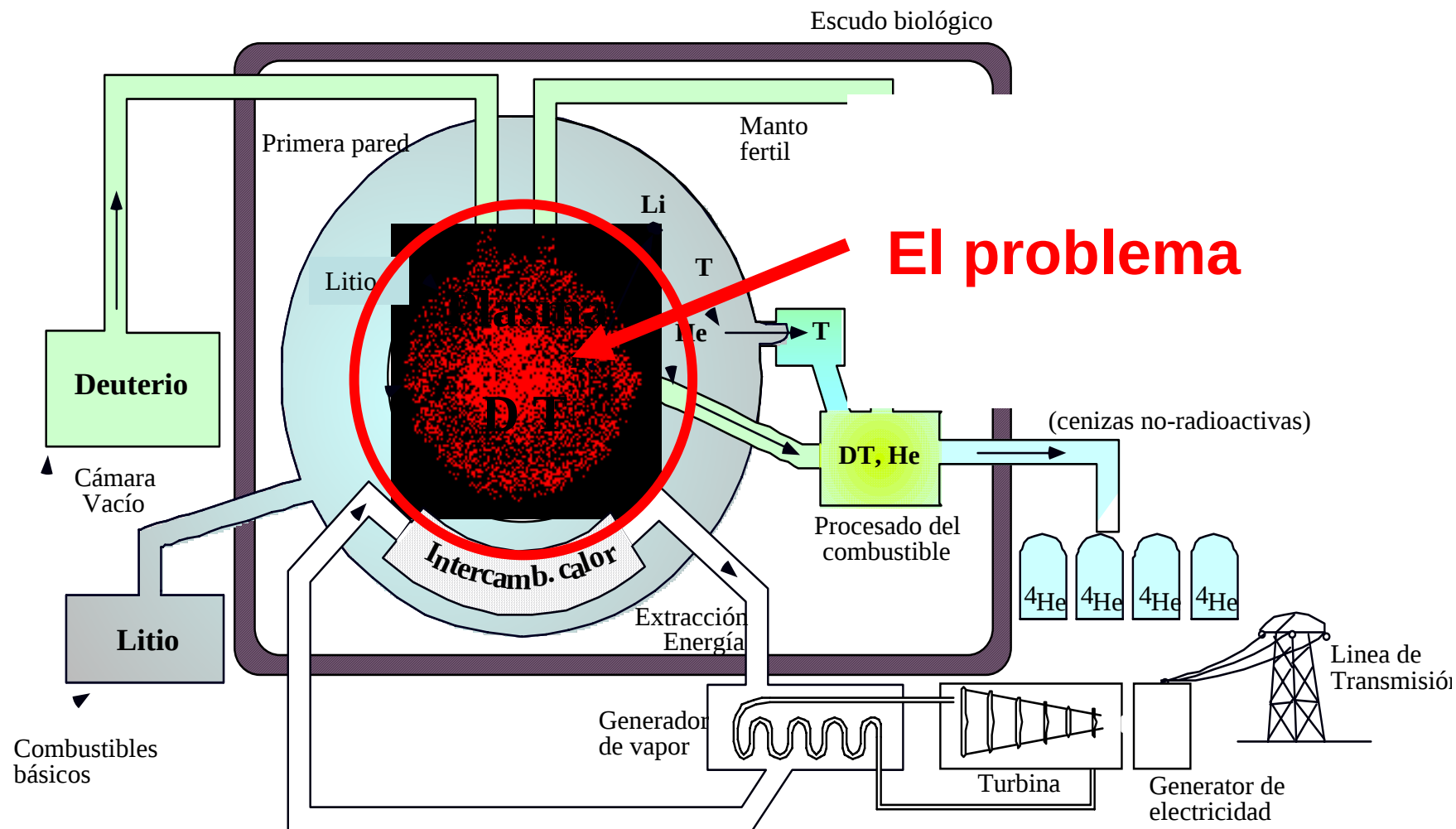
Helio: Inocuo para las personas y el medio ambiente.

- **Cantidades mínimas** (6000 T/año para 15 TW vs / 10^{10} T CO₂)
- **No se acumula**
- **Valioso para la industria**

Necesitamos materiales que no se activen bajo bombardeo por los neutrones de 14 MeV



Planta de Fusión



Combustible a altas temperaturas

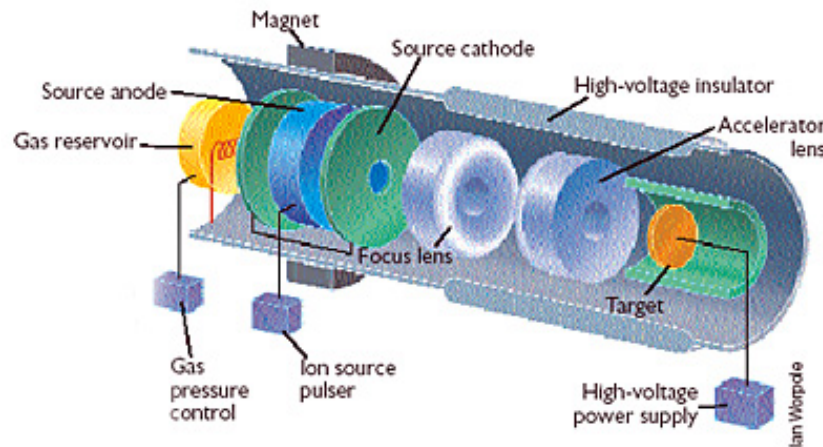
Nucleos D – T han de colisionar a alta velocidad



$E = 15\text{--}20\text{keV}$

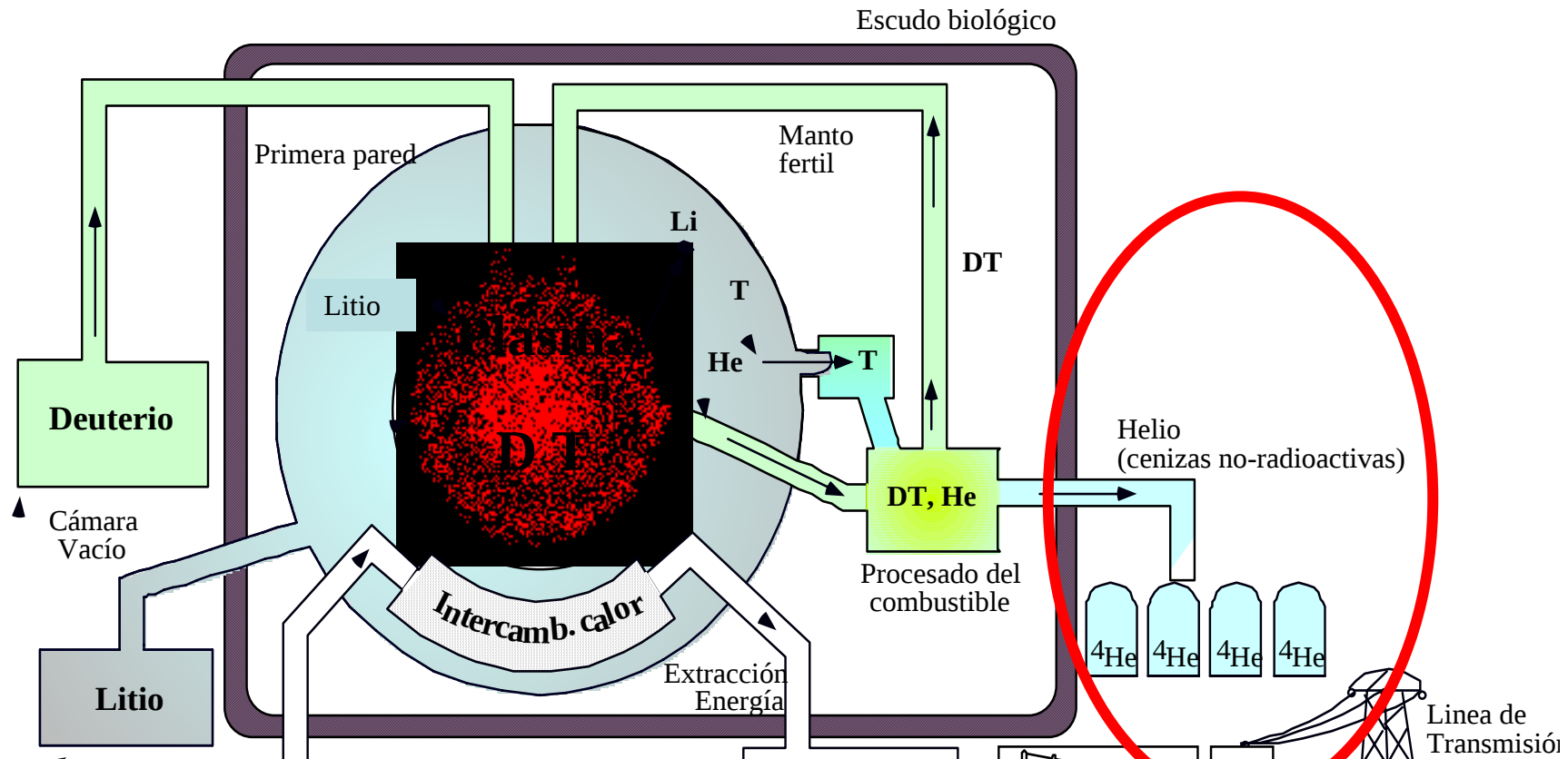
Accesible mediante aceleradores, pero no energéticamente rentable.

Solución:
Plasma con partículas a 15 keV:



Temperatura del plasma:
170.000.000 °C

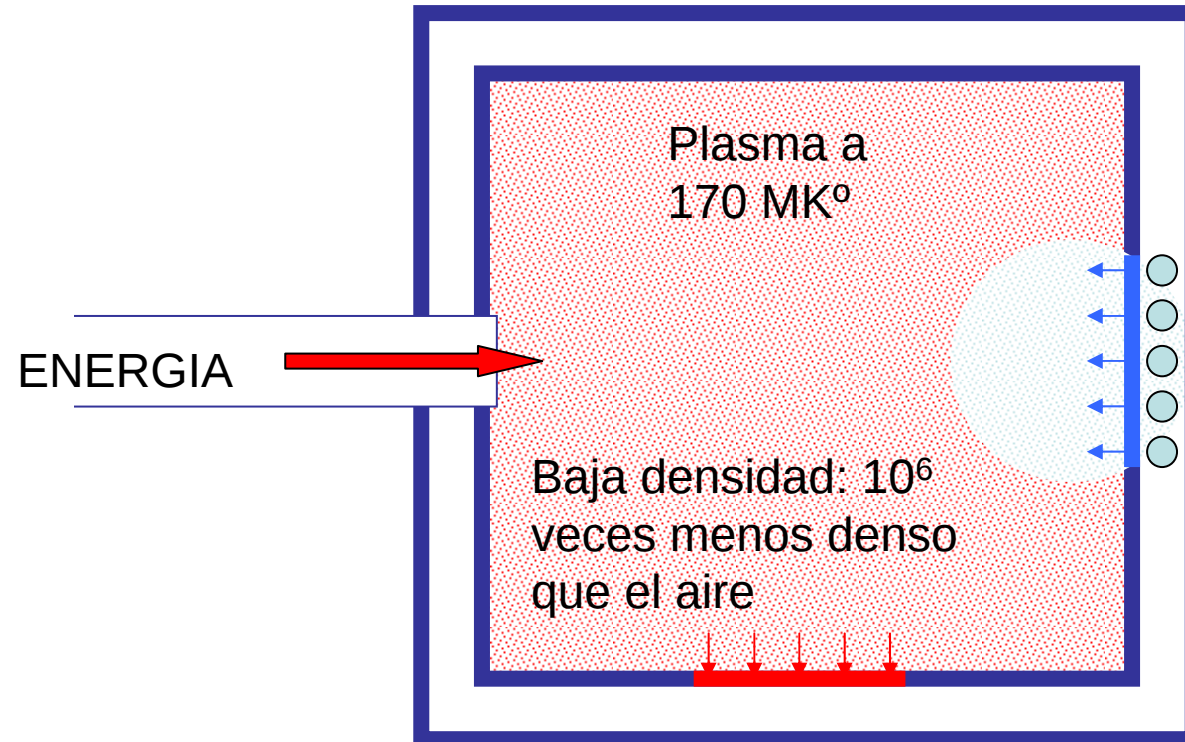
Planta de Fusión



Seguridad intrínseca

- La reacción se extingue tan pronto como el sistema se sale del “punto óptimo”
- No hay almacenamiento de Tritio

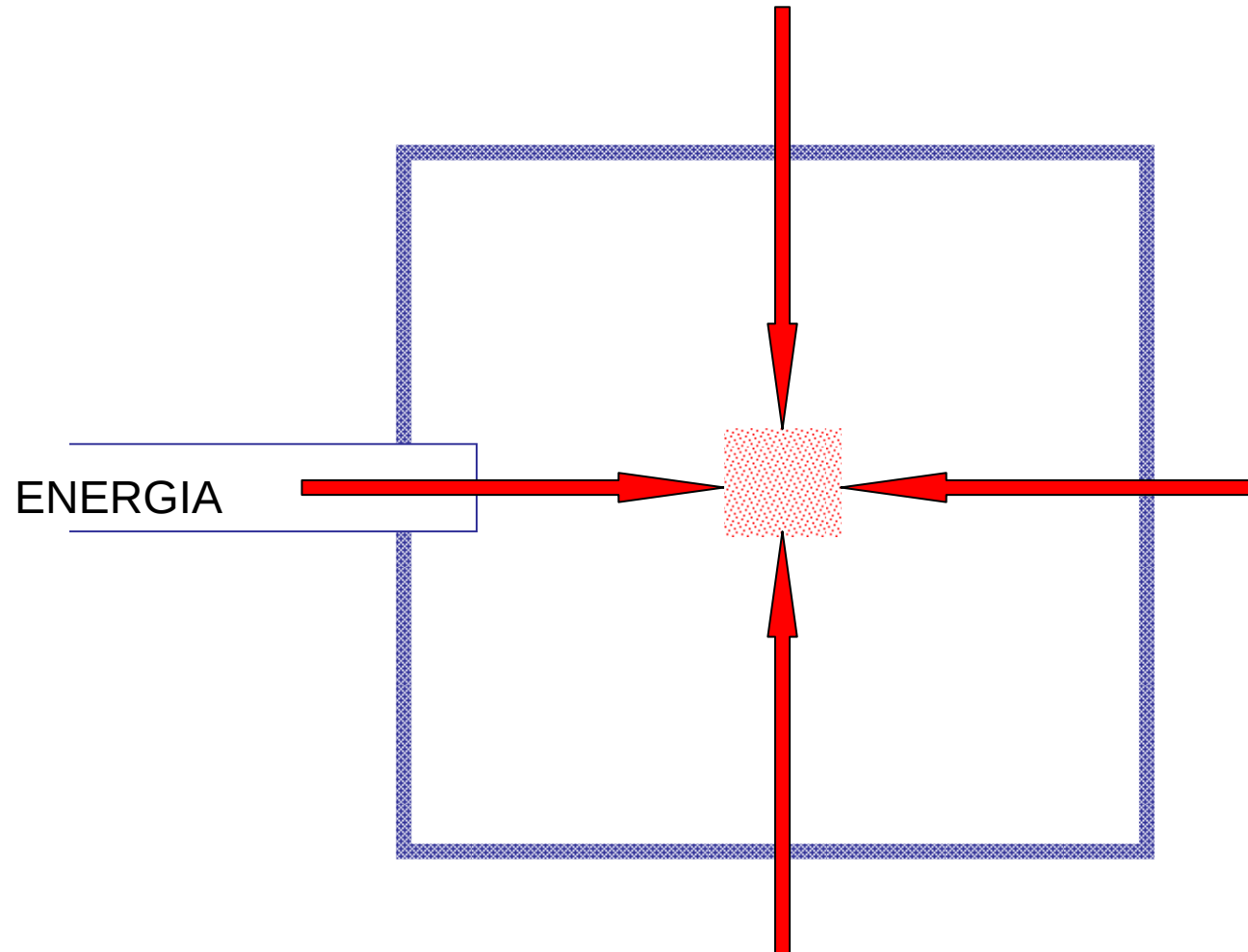
El problema del recipiente



Con refrigeración: pared podría resistir (?) pero el plasma se enfría

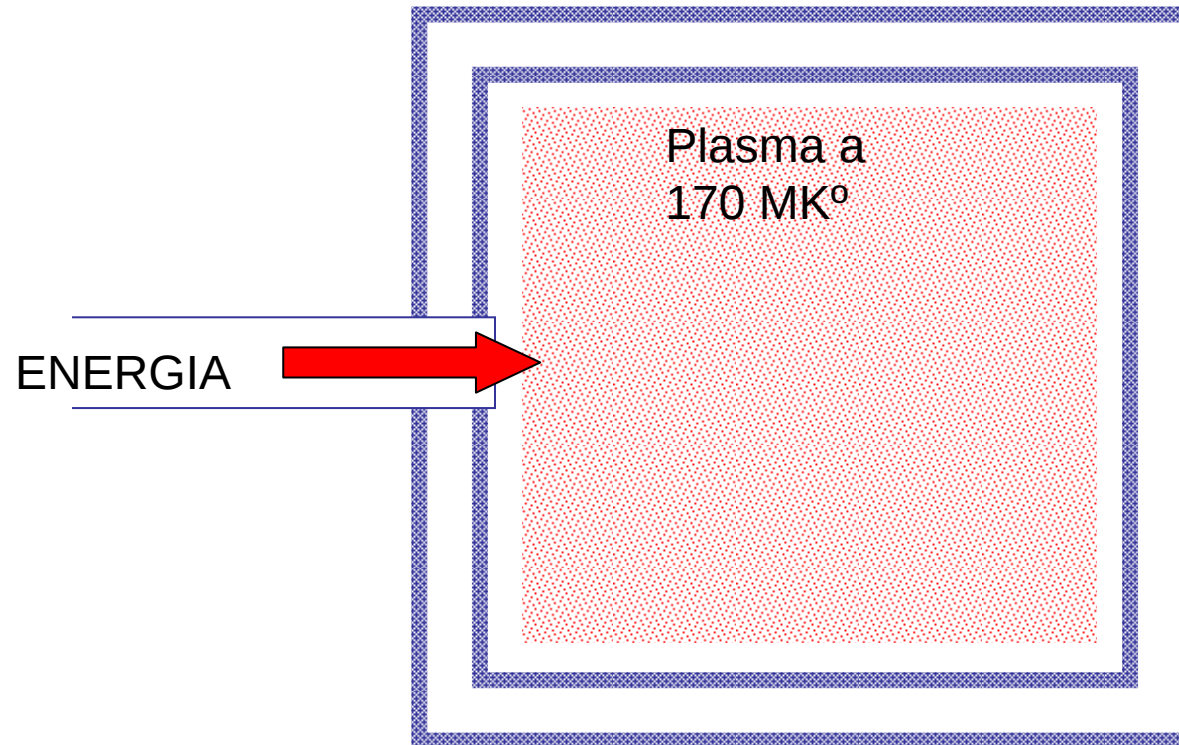
Sin refrigerar: pared se vaporiza

El problema del recipiente



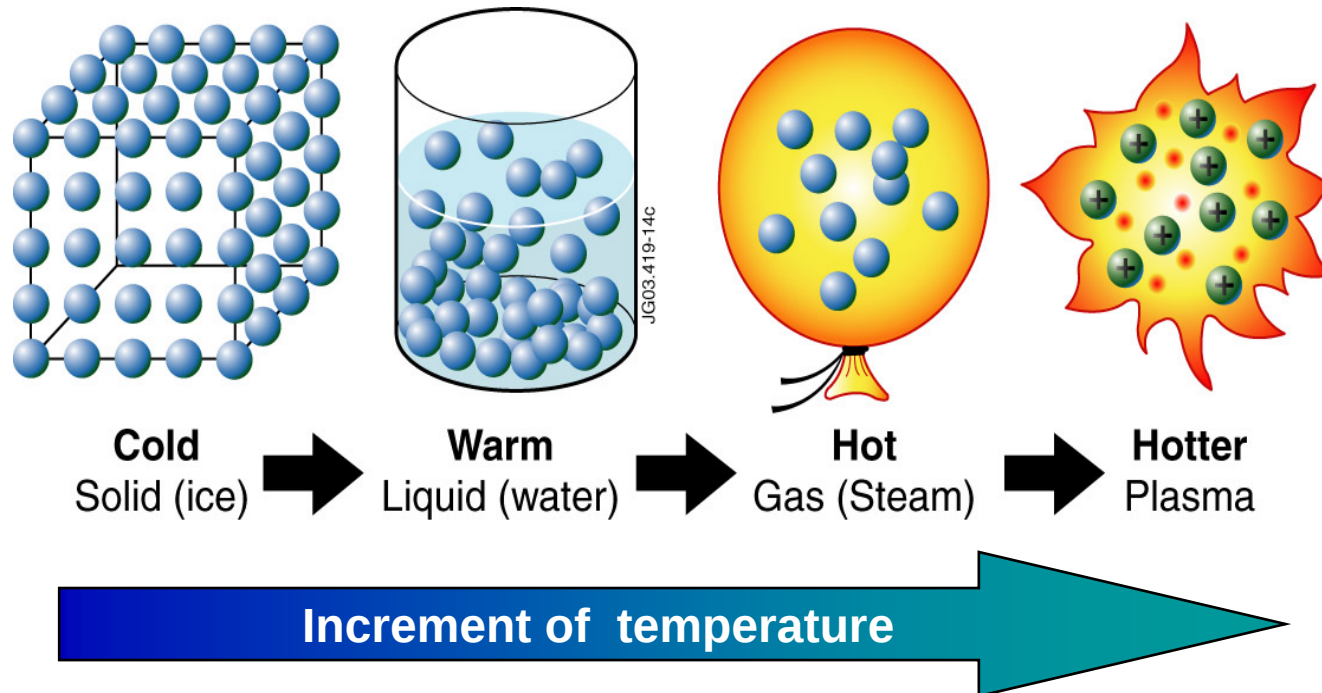
Confinamiento inercial

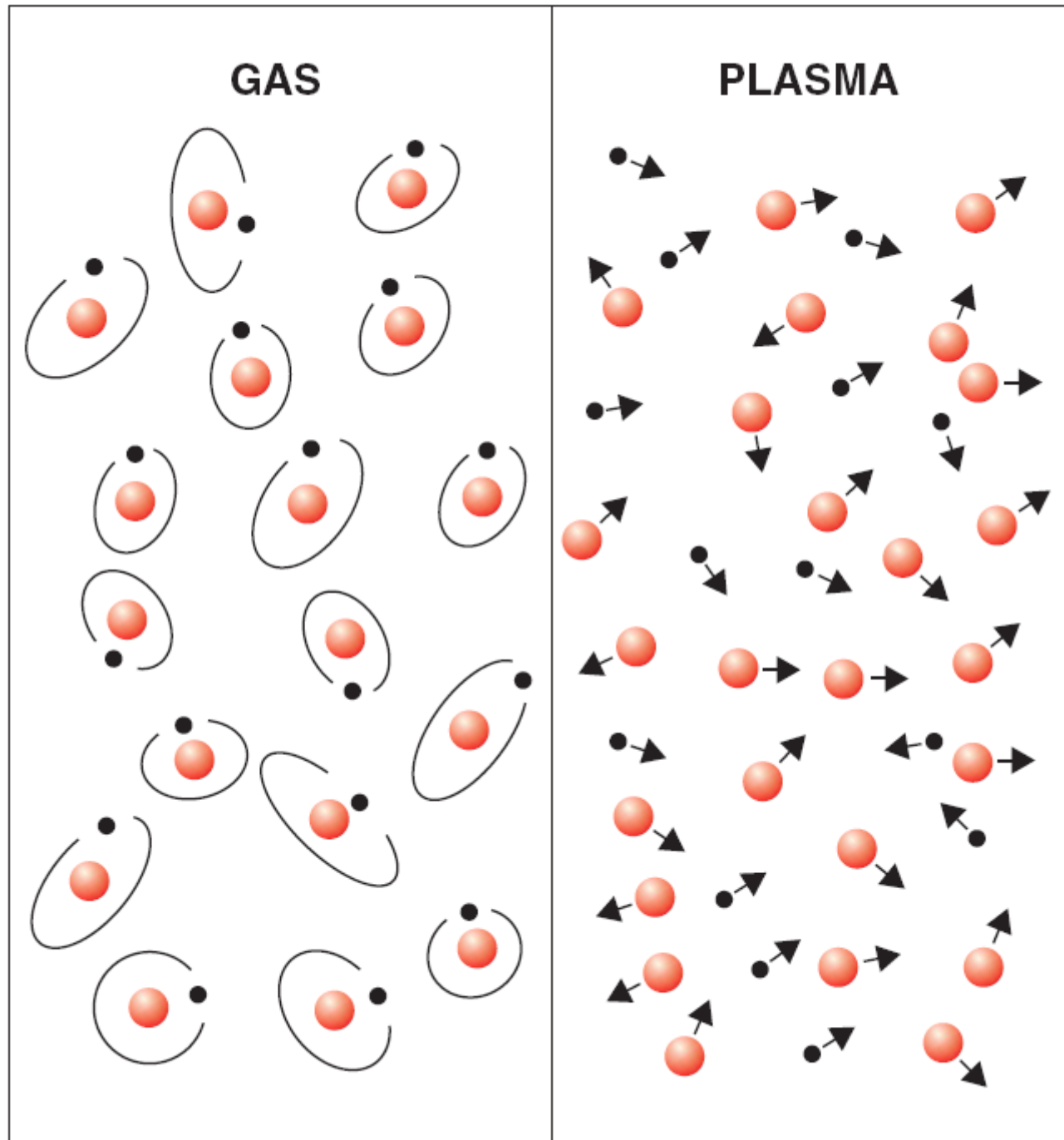
El problema del recipiente



Aislamiento (confinamiento) magnético

Plasma de Fusión



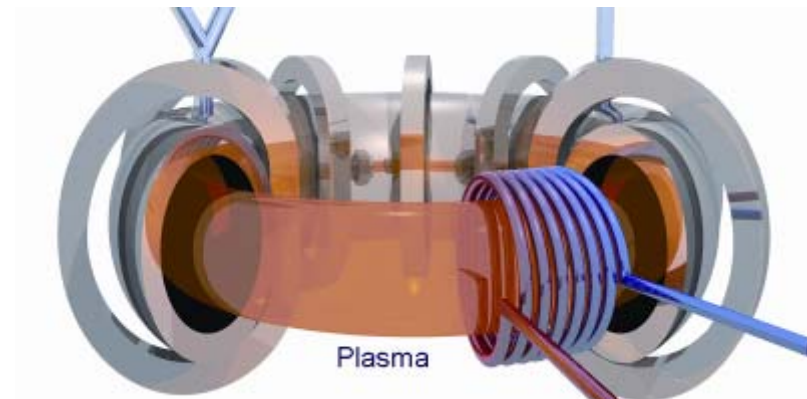
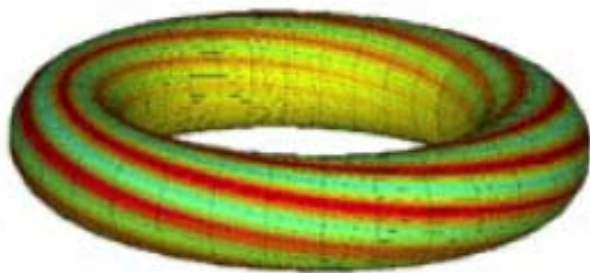
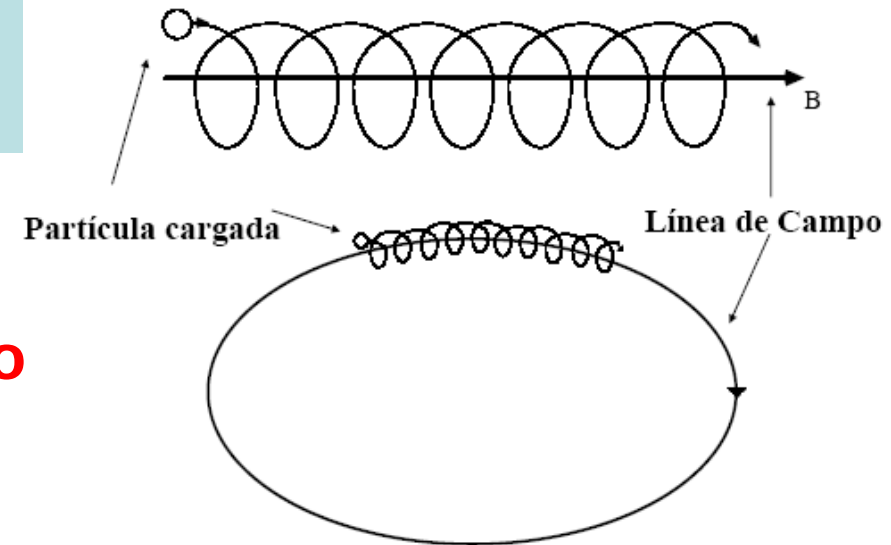


Confinamiento de plasmas

Temperatura del plasma:
170.000.000 °C

“Recipiente inmaterial”

Confinamiento magnético



Tokamak

¿Cuarenta años para la Fusión?

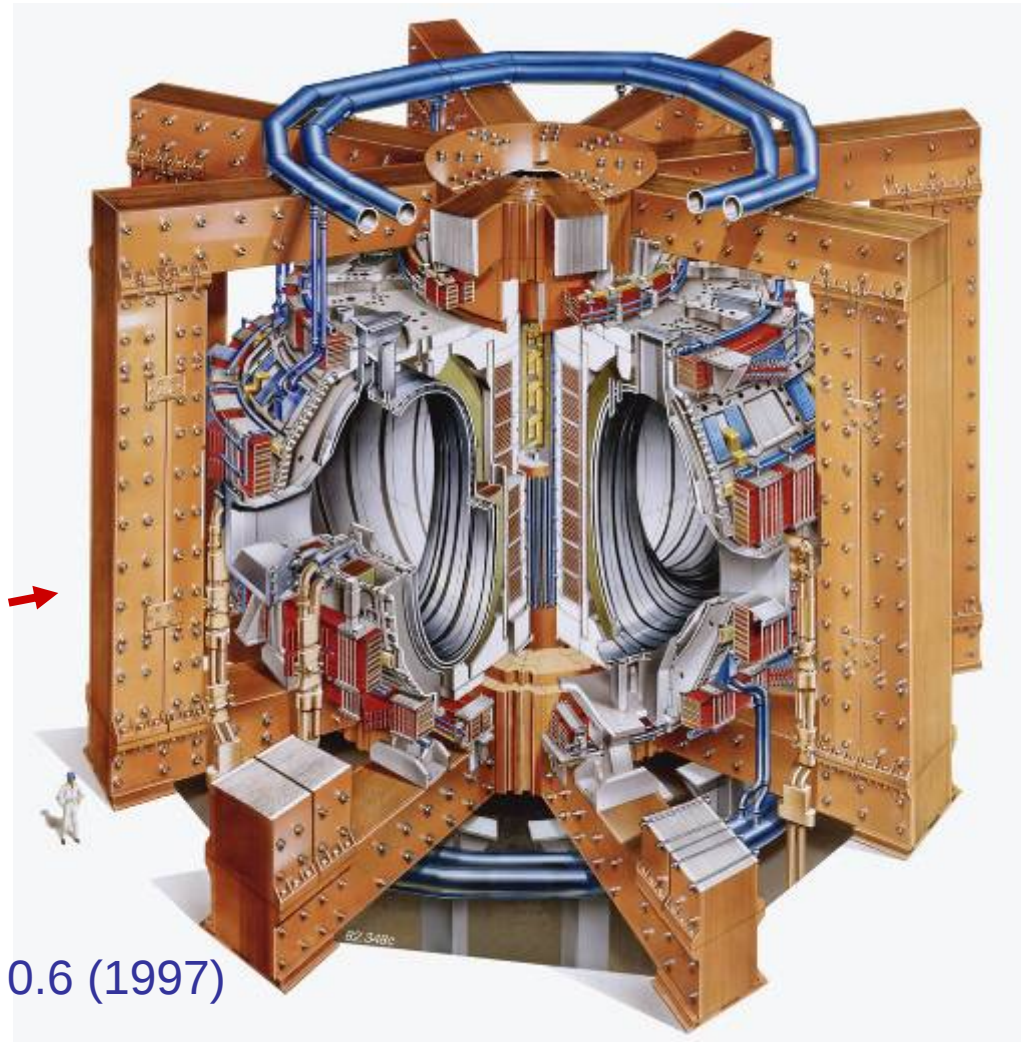
Para confinar un gas a 20keV se necesita:

- Campo magnético ($<10T$)
- **Tamaño** (1000 m^3 para alcanzar ignición)

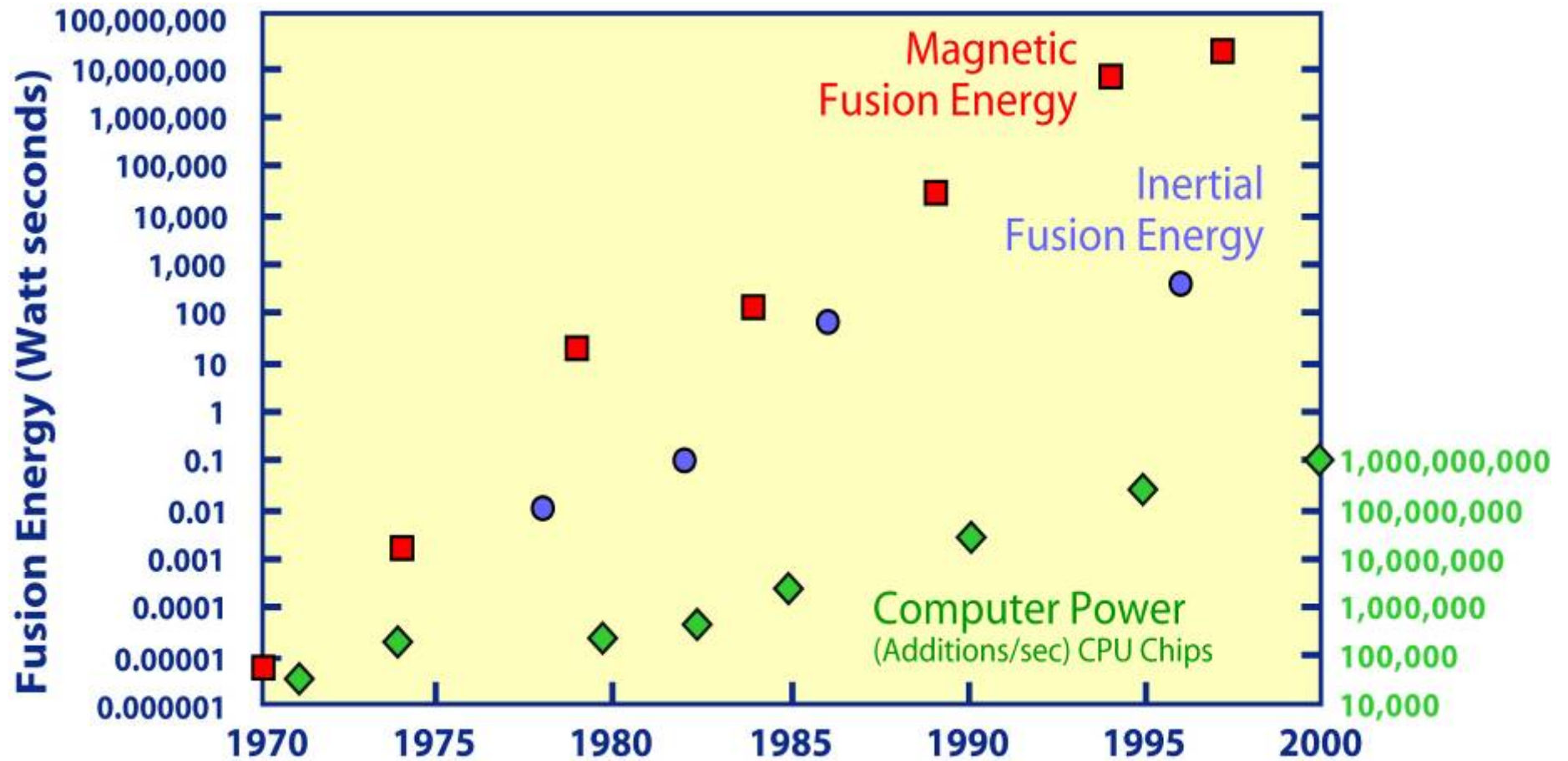
T3: $\sim 1\text{ m}^3$, $\sim 0,3\text{ keV}$
Primer “tokamak” (1969)



JET: $\sim 100\text{ m}^3$, $\sim 30\text{ keV}$
16 MW de fusión, ganancia 0.6 (1997)

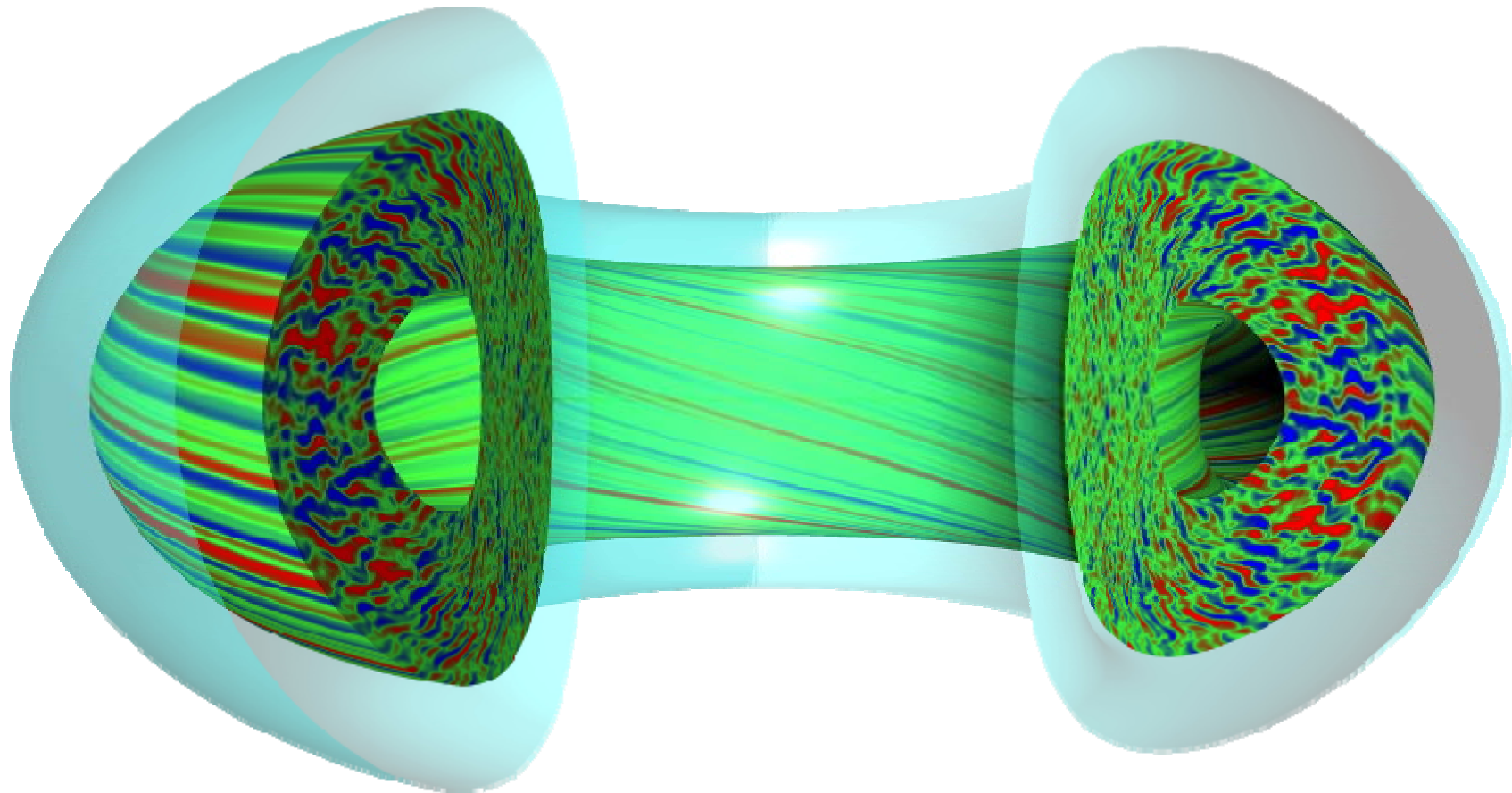


Progreso



Es posible sustituir el experimento por un simulador?

problema: 10^{20} partículas/m³



ITER: el próximo paso

Objetivos:

Demostrar la viabilidad científica de la fusión

Ganancia energética Q
del plasma

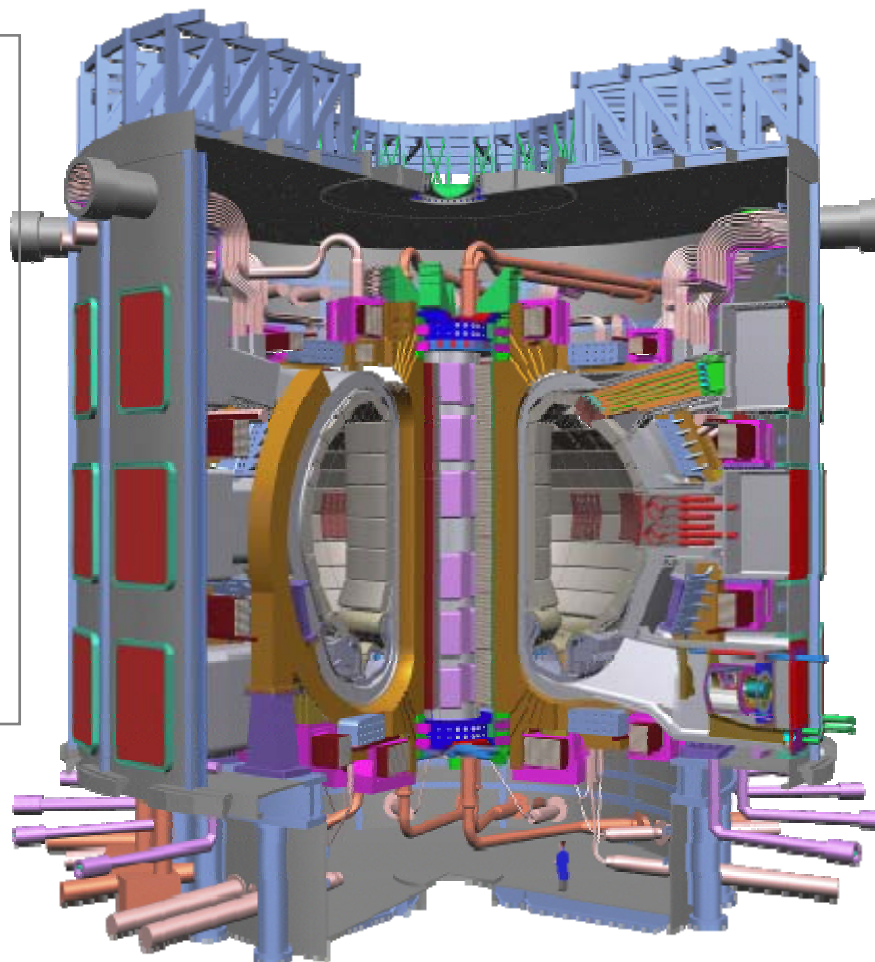
$Q > 10$ durante 500 s

$Q > 5$ durante 1500 s

Tests tecnológicos
(materiales, módulo
generador de tritio...)

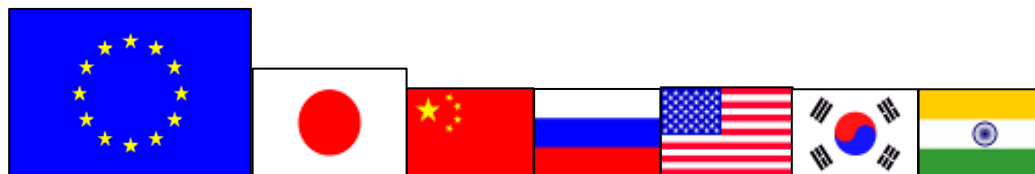
Coste ~ 20.000 M€

Construcción: 2009-25

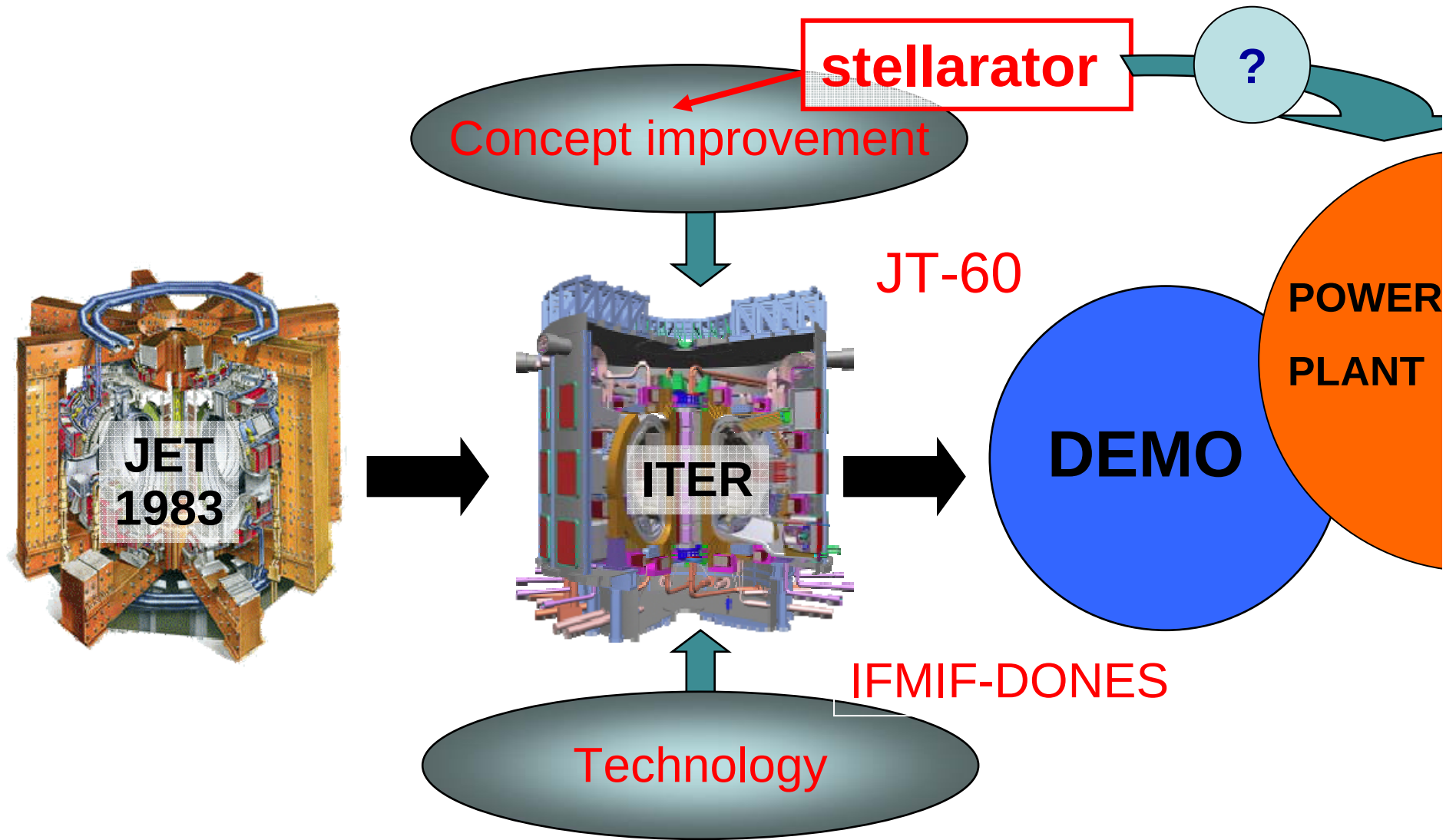


Socios:

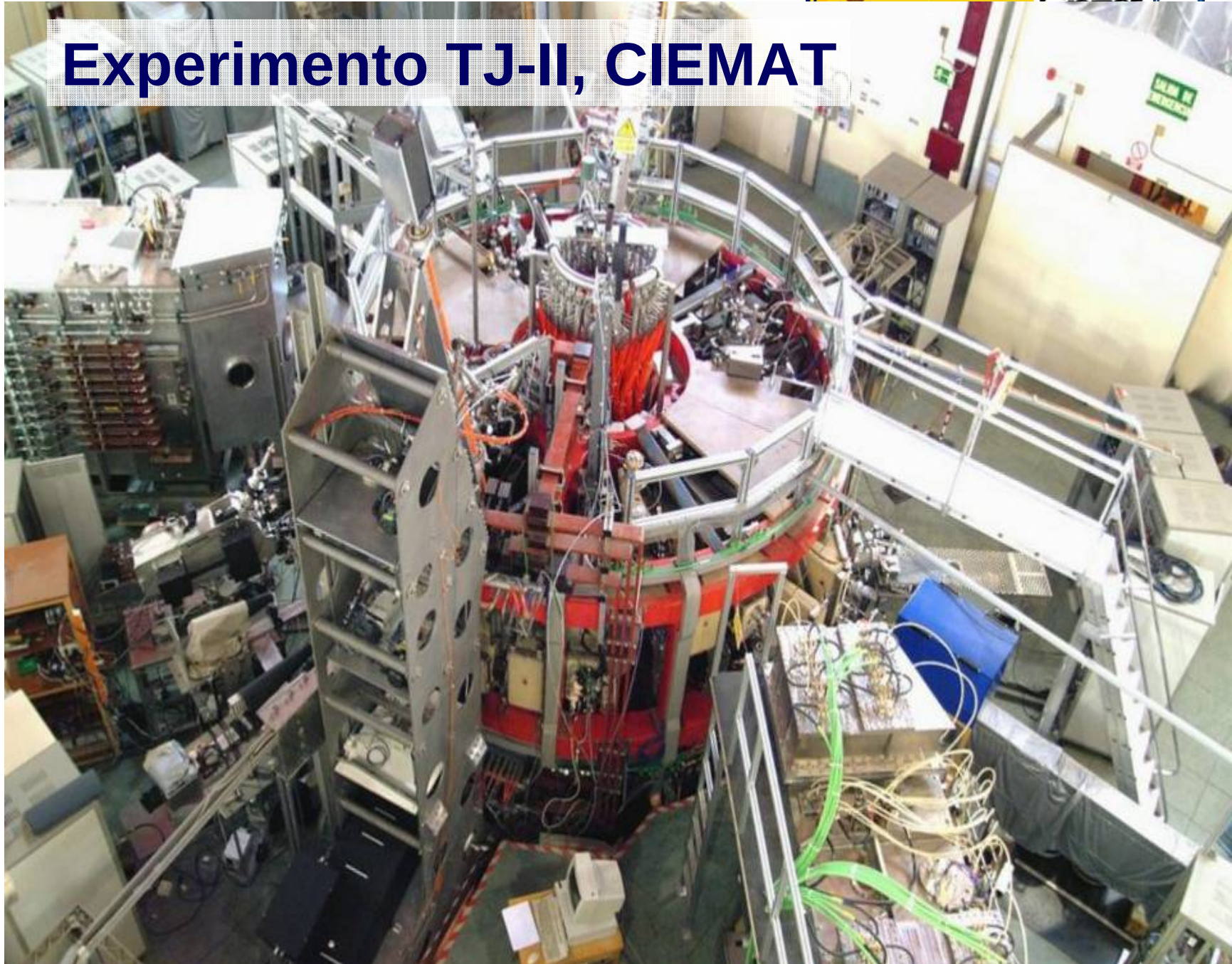
Europa
Japón
China
Rusia
EEUU
Corea S
India



EU strategy towards Fusion Energy

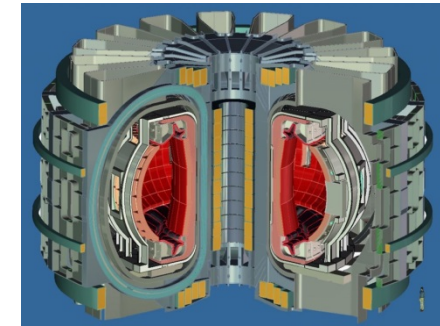


Experimento TJ-II, CIEMAT

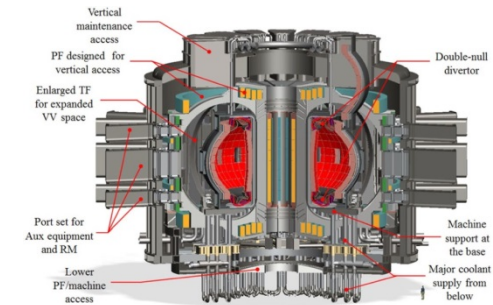


DEMONstration power reactor

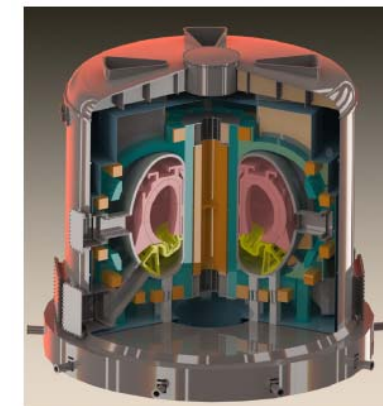
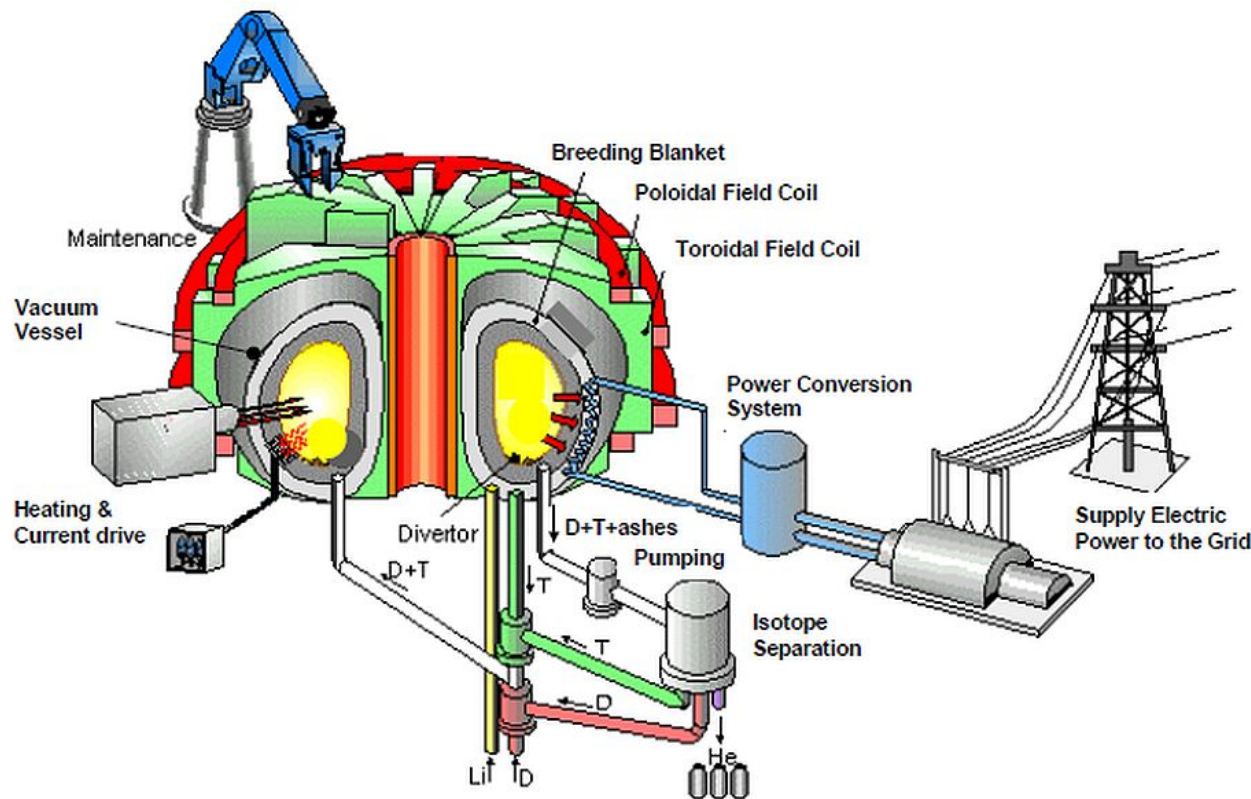
- Electricidad neta en la red 100-500 MW
- Autosuficiente en tritio: breeding blanket
- Materiales de baja activación
- Operación 24x7 durante semanas



DEMO (EU)



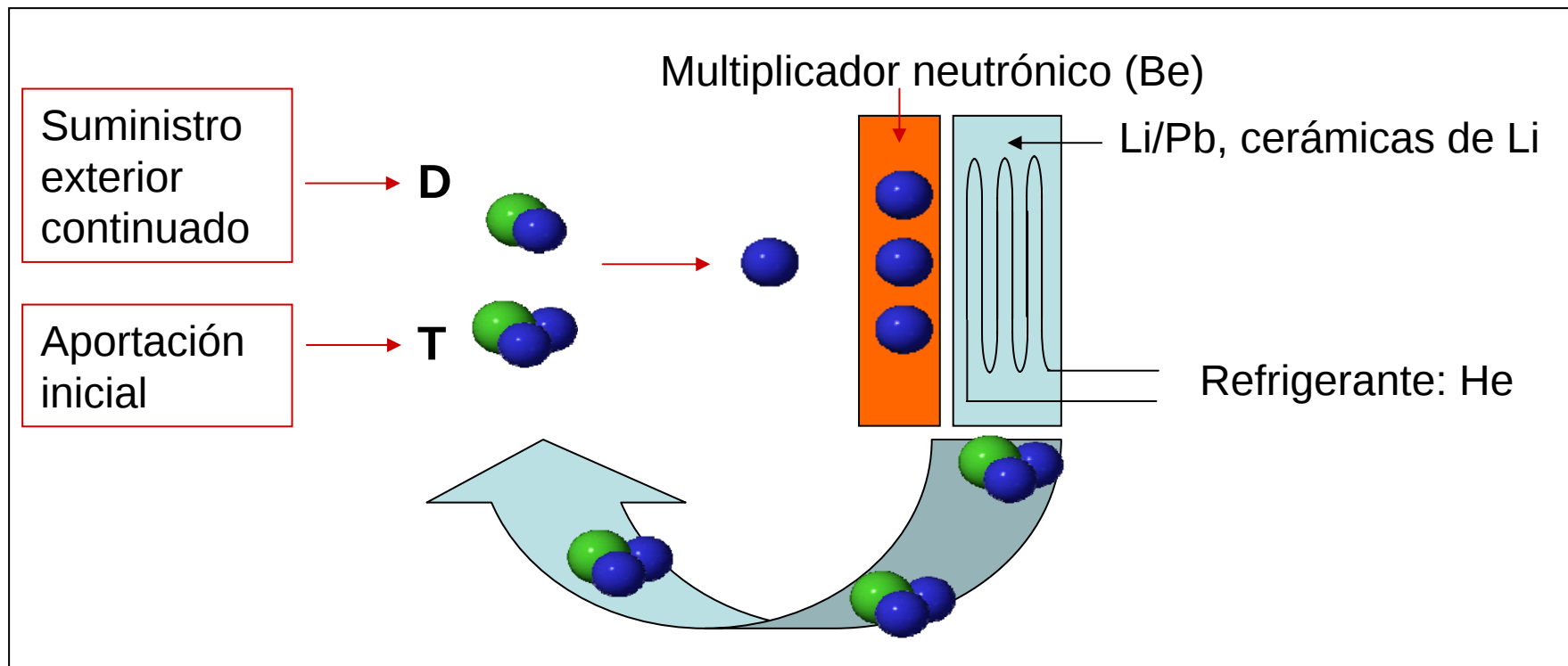
K-DEMO (Corea)



CFETR (China)

Autosuficiencia en tritio

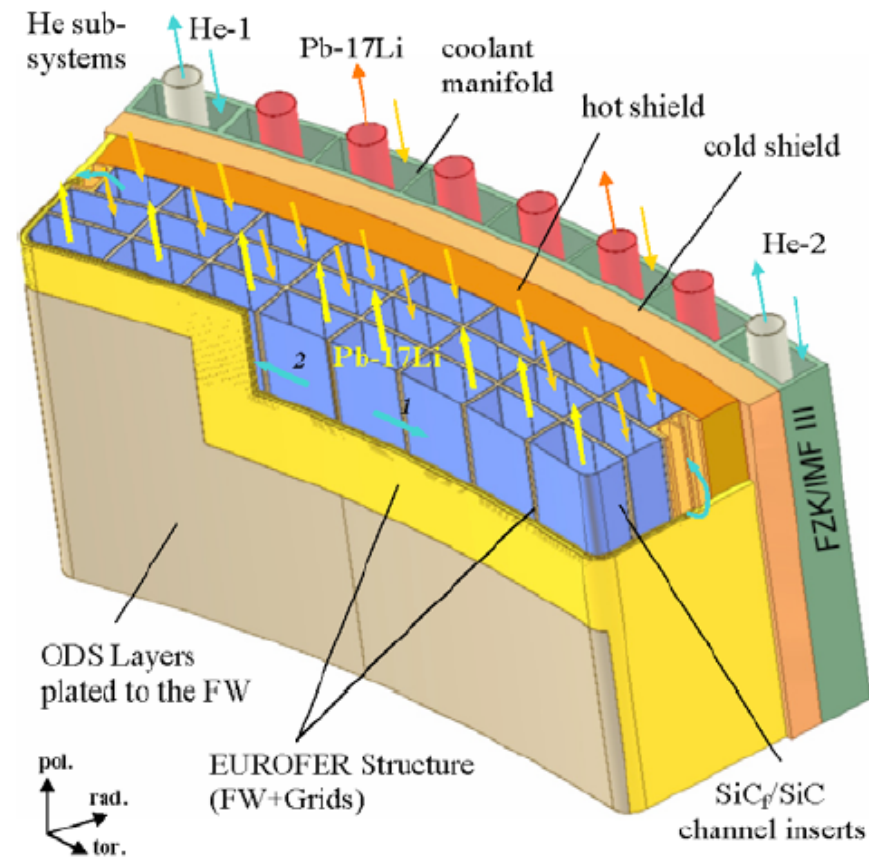
Manto reproductor (“breeding blanket”)



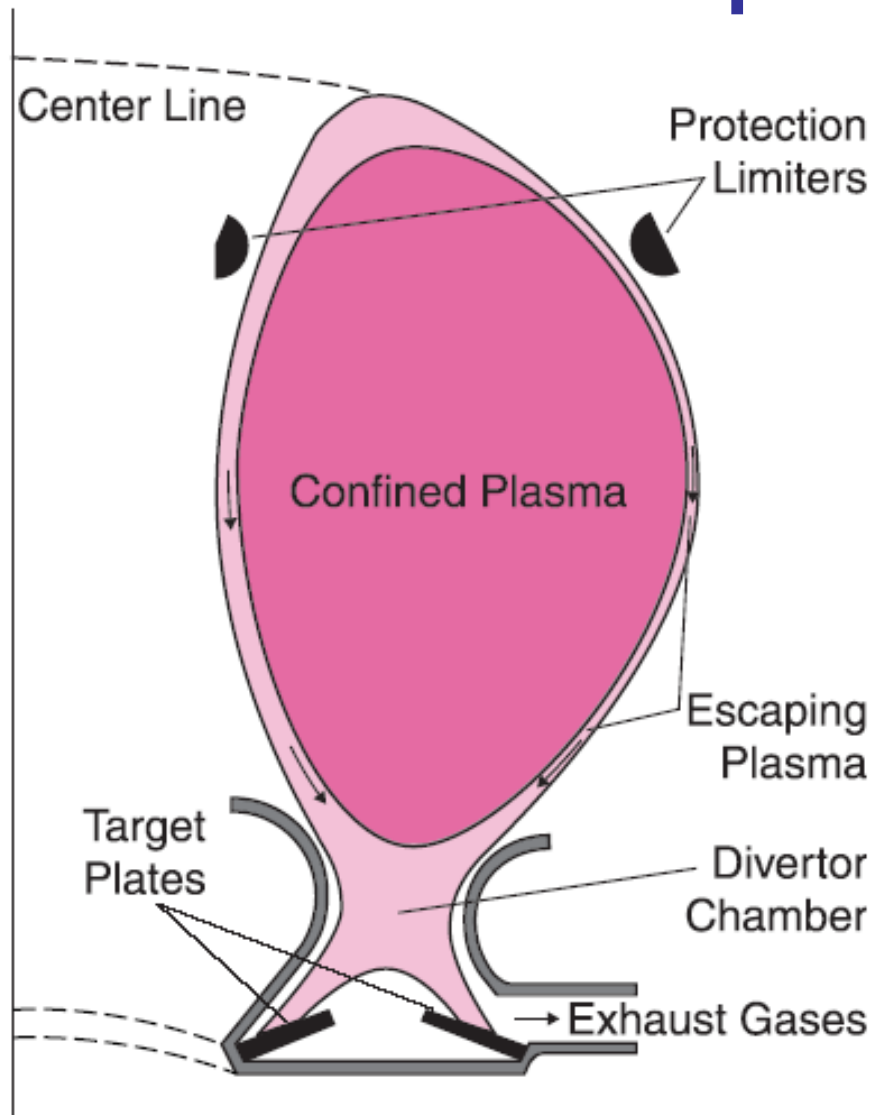
Es necesario cerrar el ciclo: ganancia ~ 1.2

Tareas del “Blanket”

- Reproducir Tritio
- Evitar flujo neutrónico en componentes
- Extraer energía (5 MW/m^2)
- Evitar permeación de T



Materiales de Primera pared



80% de la potencia: neutrones de 14 MeV

Los neutrones escapan isotrópicamente y se absorben en volumen en el "blanket": energía a los intercambiadores de calor y a las turbinas..

20% alfas de 4.3 MeV (He)

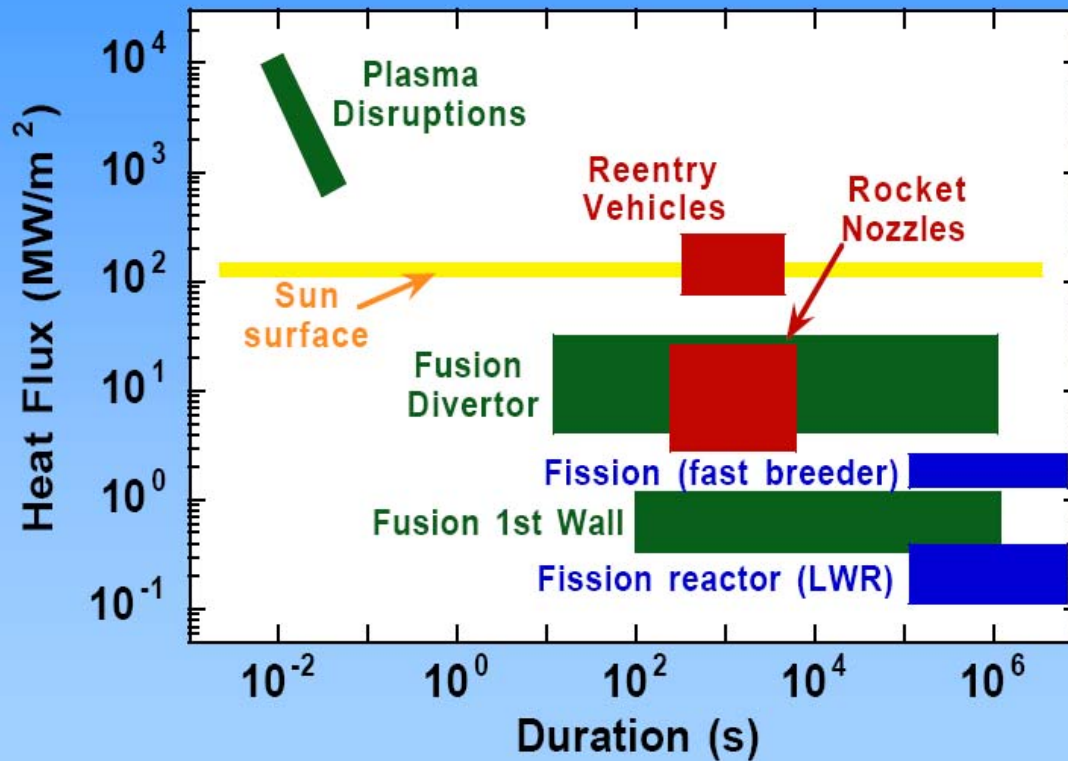
Las partículas alfa calientan el plasma y mantienen la ignición, lentamente se van difundiendo hacia la pared.

En un reactor de 1000 MW:

800 MW neutrones

200 MW alfas

Materiales



Alternativas:

CFCs, Tungsteno, Berilio “mechas” de Litio líquido

Materiales: Daño por irradiación

Irradiation parameter		ITER*	DEMO*
Total neutron flux	[n/(s cm ²)]	4×10^{14}	7.1×10^{14}
Hydrogen production	[appm/FPY]	445	780
Helium production	[appm/FPY]	114	198
Damage production	[dpa/FPY]	10	19
H/dpa ratio	[appm/dpa]	44.5	41
He/dpa ratio	[appm/dpa]	11.4	10.4
Nuclear heating	[W/cm ³]	10	22

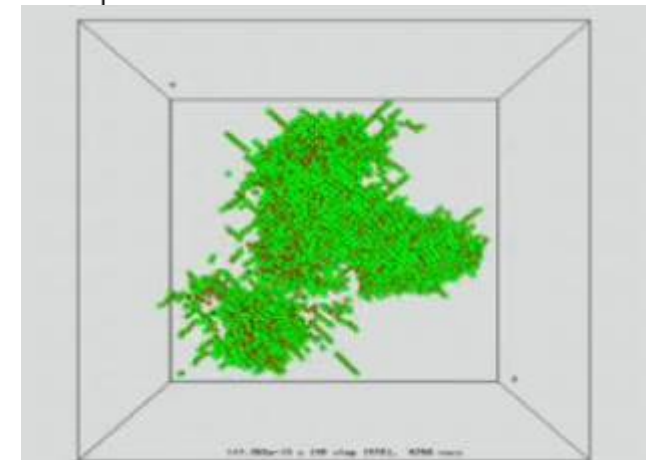
Activación

Daño estructural (dpa's)

Burbujas de He /H

Candidatos (material estructural):

- Aceros martensíticos “EUROFER”
- Vanadio
- SiC/SiC

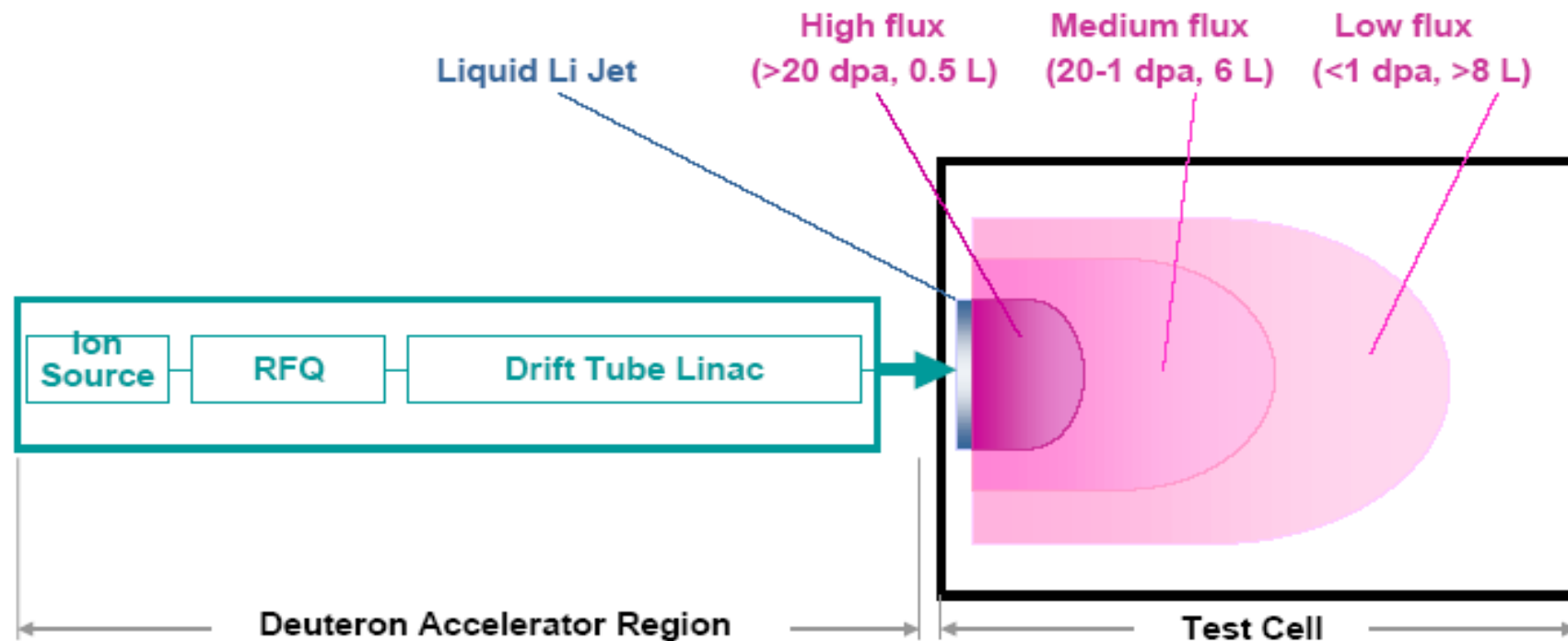


Molecular dynamics calculation of displacement damage due to neutron impact.

Donde probar los materiales?: Fuente de neutrones de 14 MeV: IFMIF

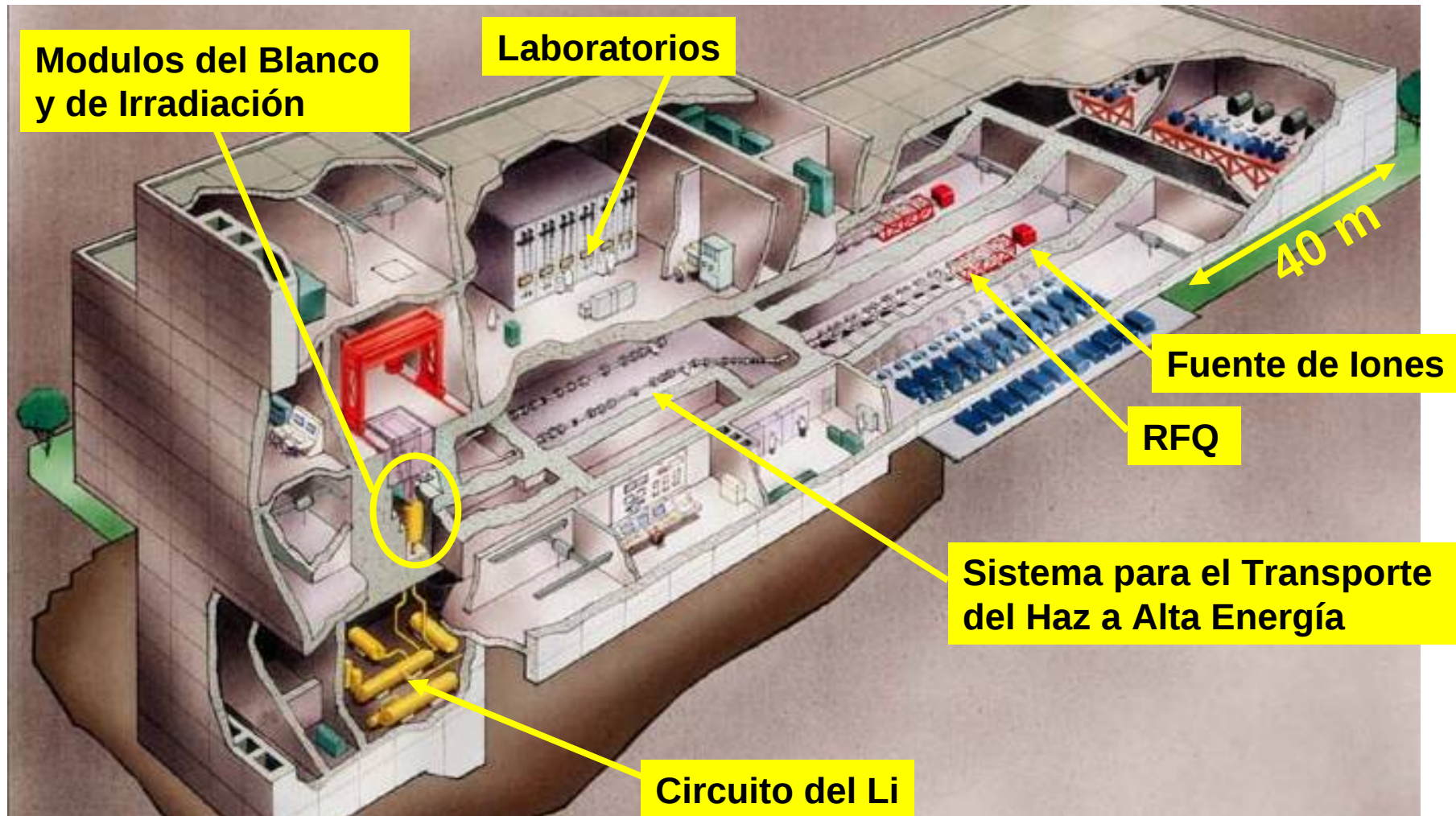
D-Li Stripping Neutron Source

Typical Reactions: ${}^7\text{Li}(d,2n){}^7\text{Be}$ ${}^6\text{Li}(d,n){}^7\text{Be}$ ${}^6\text{Li}(n,T){}^4\text{He}$
 Deuterons: 32, 36, 40 MeV 2x 125 mA Beam footprint 5x20 cm²



La fuente de neutrones de 14 MeV:

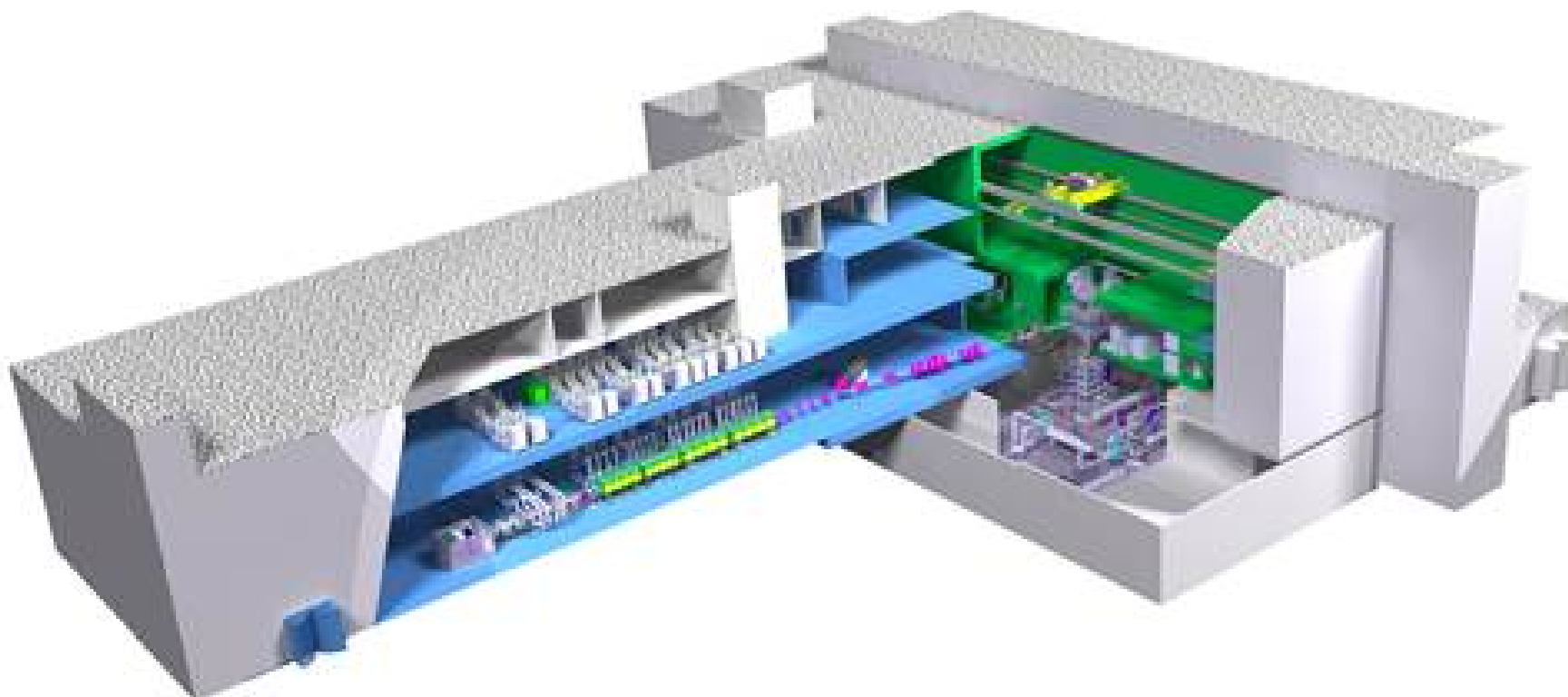
IFMIF



presupuesto 1500 M€

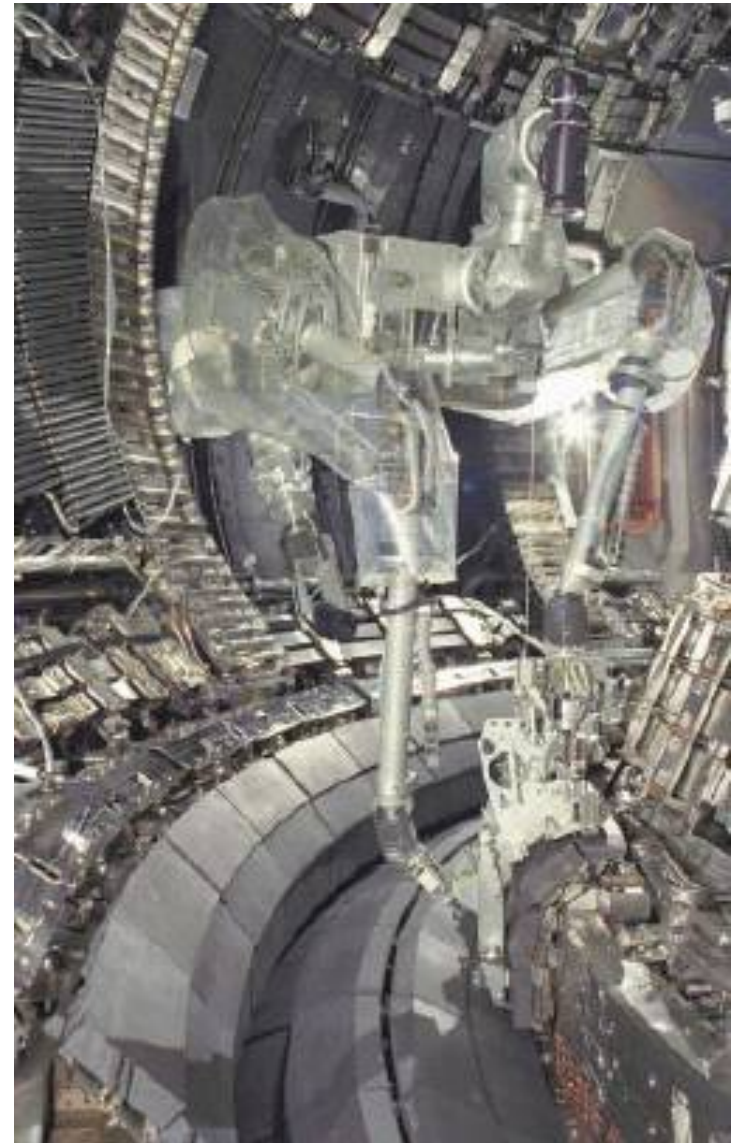
IFMIF-DONES

- **Versión reducida de IFMIF** (40 MeV 125 mA, en vez de 250)
- **Inicio proyecto 2020**
- **Inversión 400 M€**
- **Posible emplazamiento en Granada**



Tecnología

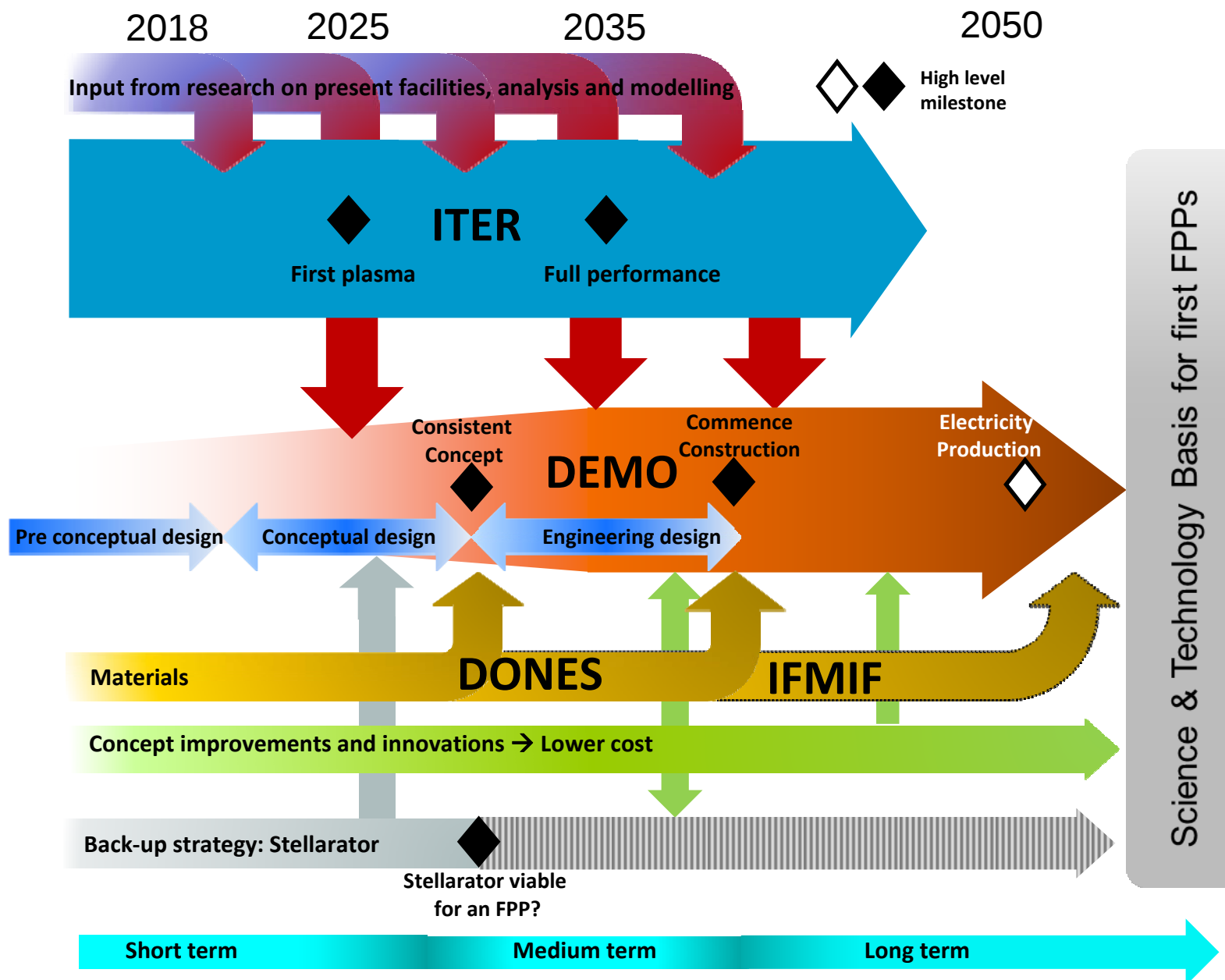
- **RAM**
 - Mantenimiento remoto
 - Fiabilidad de un sistema muy complejo
- **Tecnologías “convencionales”**
 - Intercambiadores He/agua
 - Conservación del He
- **Superconductores de alta temp.**
- **Optimización del precio kW.h**



Mantenimiento remoto: JET

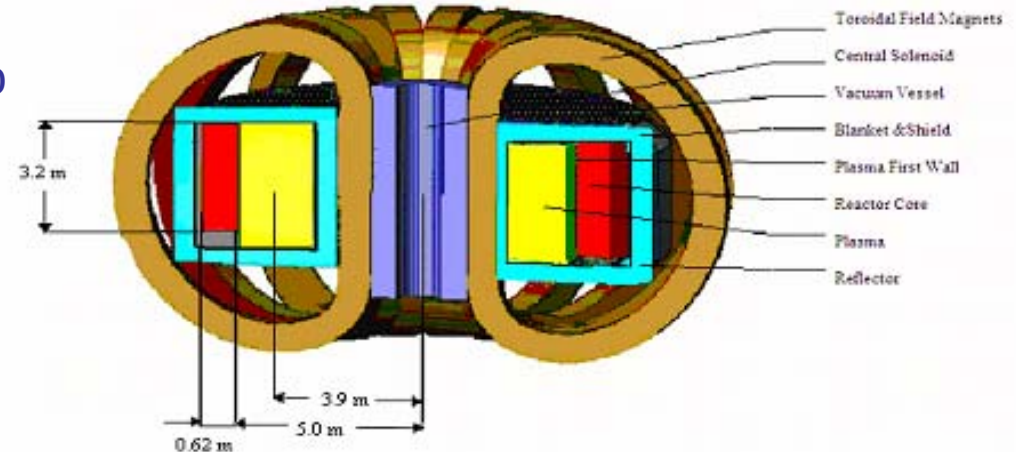


European “Fusion Roadmap”



Un atajo? Reactores híbridos fisión-fusión

- Núcleo de fusión DT
- Los neutrones de 14 MeV se reciben en un blanket de material fisible (Torio 232, Uranio 238)
- Ganancia:
 - $Q_{\text{fusión}} = 5$
 - $Q_{\text{fisión}} = 10$
 - $Q_{\text{total}} = 50$



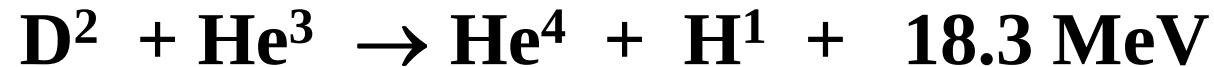
Ventajas:

- Núcleo de fusión mas sencillo (accesible con la tecnología actual)
- Util para quemado de residuos
- Evita el problema de escasez de Uranio (regenerador)
- Seguridad: subcrítico
- mas baratos y llegarían antes que los de fusión pura

Inconvenientes:

- Gran cantidad de material radiactivo en el Tokamak: seguridad más compleja.
- Proliferación (generan Pu)
- Complejidad tecnológica en el blanket

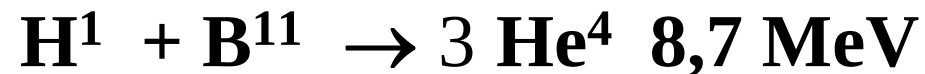
Combustibles alternativos



- **No genera neutrones** (salvo D-D pero esta reacción trabaja a mayor T)
- No necesita Blanket (si se dispone de He3)
- Toda la energía de fusión contribuye a la ignición

Pero:

- He3 no disponible en la Tierra, se obtendría de minería lunar
- Necesita muy altas temperaturas: grandes pérdidas por emisión de “luz”



Mismas ventajas pero requiere temperaturas aún mas altas: $nT\tau$ 500 veces mayor que en D-T, para $T > 200 \text{ keV}$

¿ se puede acelerar ?

Aunque las inversiones en Fusión son modestas en términos del gasto mundial en energía (ITER ~ un par de días de consumo de petróleo), son muy elevadas para los presupuestos públicos de investigación.

La investigación progresa reduciendo al máximo la posibilidad de fracasos en cada paso.

