

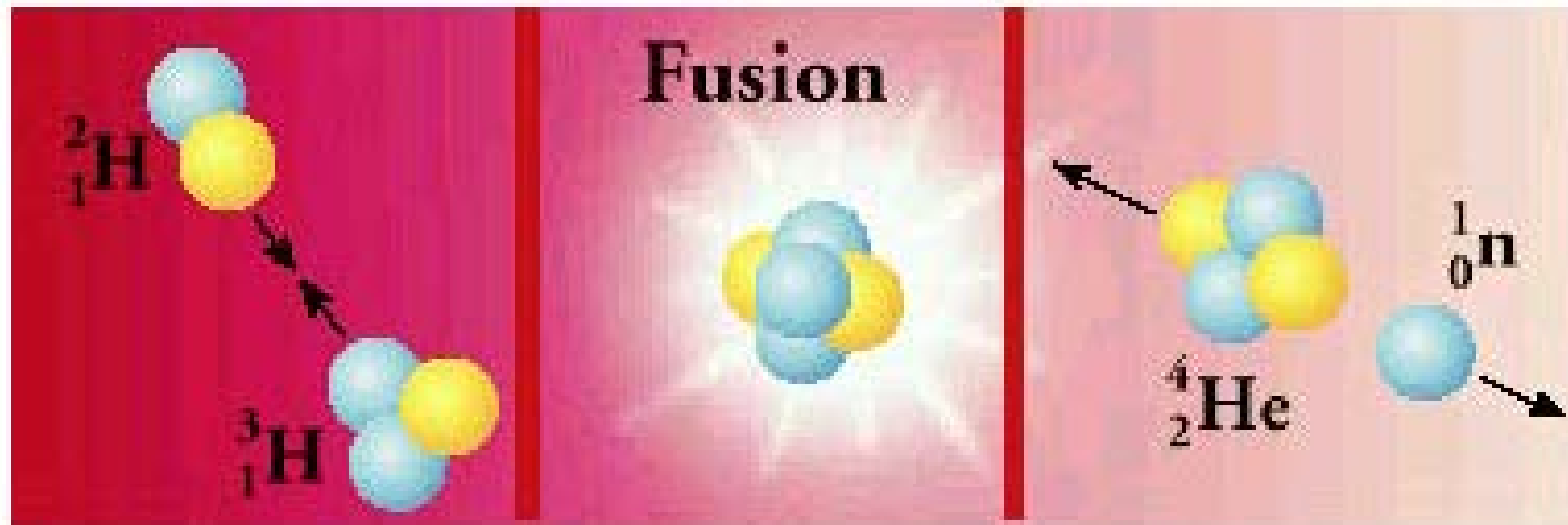
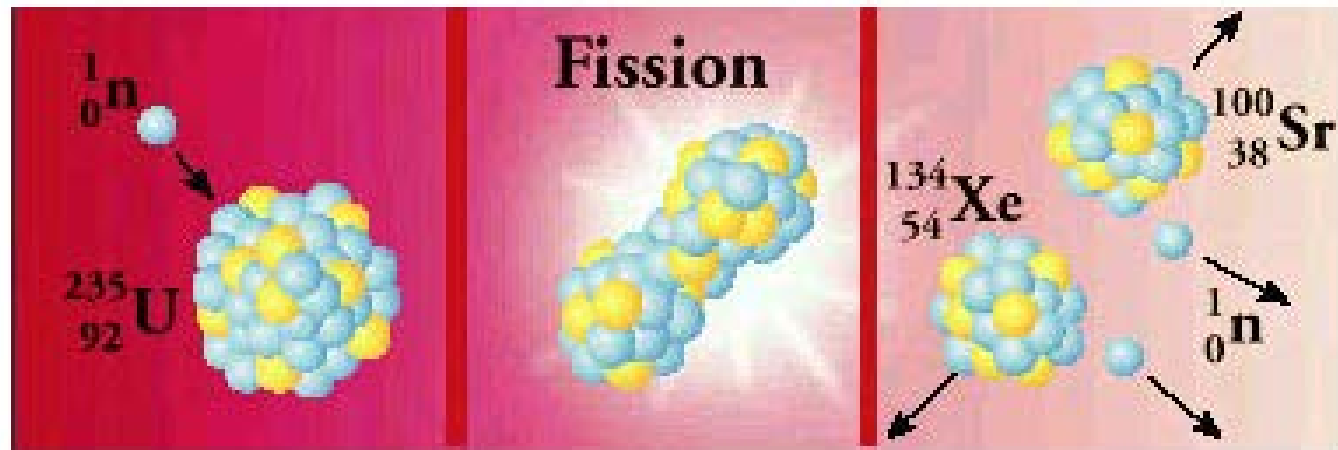
I+D+i en reactores nucleares de fisión y fusión

Carolina Ahnert

**Catedrática Ingeniería Nuclear
Universidad Politécnica de Madrid**

**XXXV Jornada sobre energía y educación
Tecnología nuclear: Aplicaciones e I+D+i
Madrid, 22 septiembre 2018**

ENERGIA NUCLEARE, $E = mc^2$



Requisitos Energía Nuclear

- **Reactor de Fisión** (En operación)

Masa crítica de Uranio fisible + flujo de neutrones libres

444 CCNN en operación en el mundo + 64 en construcción (2/3 en Asia)

- **Reactor de Fusión** (En desarrollo)

Temperatura = 100×10^6 °C (materia en estado de plasma iónico)

Criterio de *Lawson*: densidad iones D+T \times tiempo $> 10^{15}$ iones.seg/cm³

- Confinamiento Magnético (campos electromagnéticos)

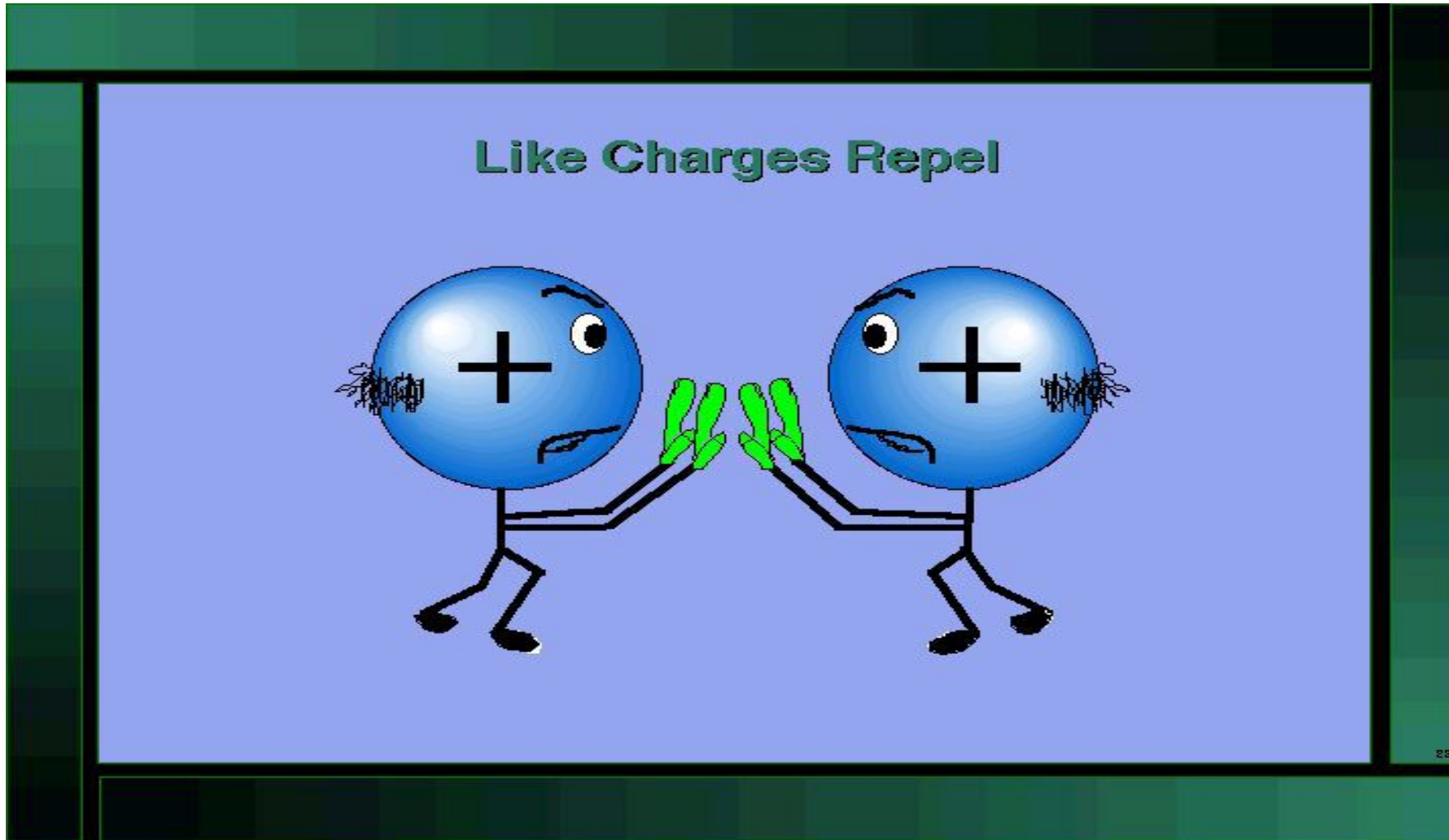
densidad = 10^{14} (iones/cm³), tiempo = 10 seg.

- Confinamiento Inercial (láseres)

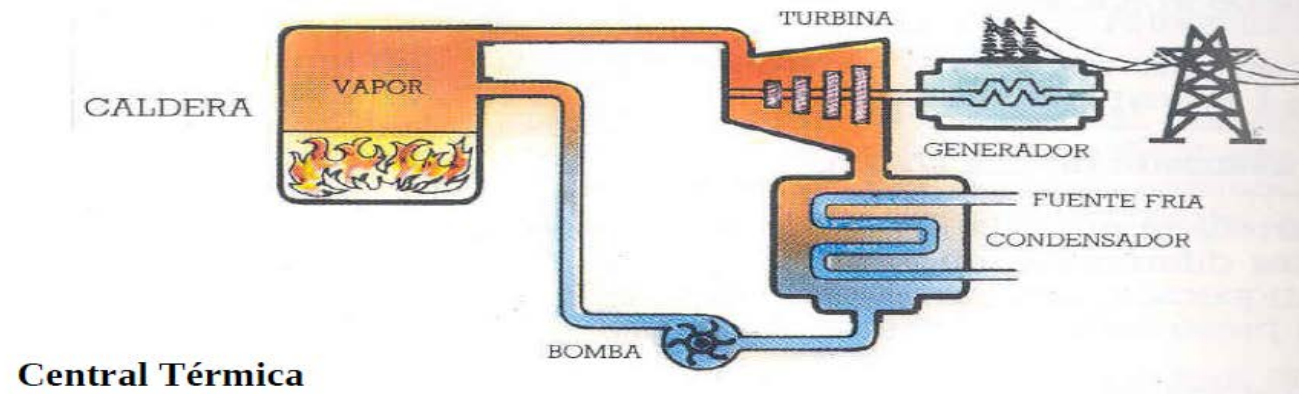
densidad = 10^{25} (iones/cm³), tiempo = 10^{-10} seg. (pulsos)



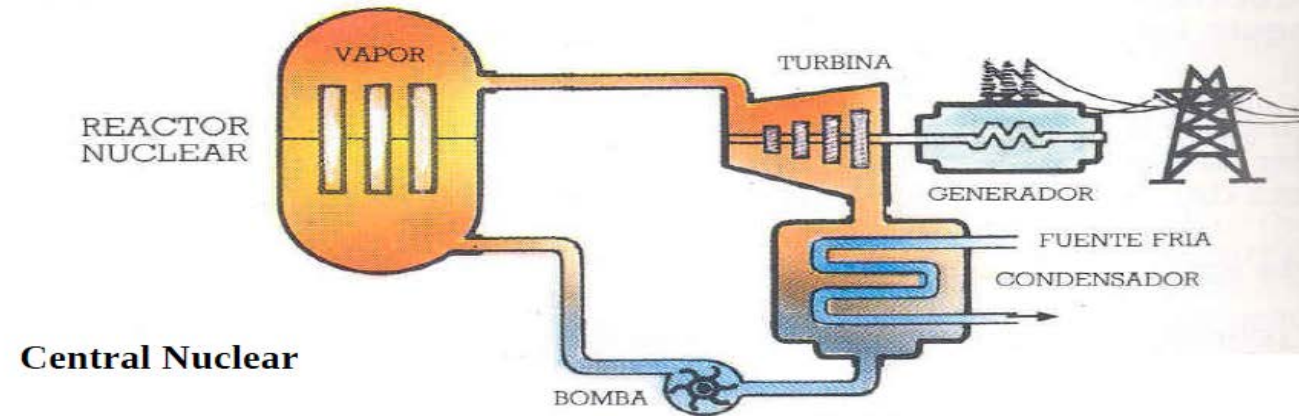
Fusión: Los núcleos se repelen



Central Térmica y Central Nuclear



Central Térmica



Central Nuclear

Reactor de fisión

Sistemas de seguridad

- Parada automática reacción en cadena (barras de control absorbentes)
- Refrigerar el combustible (circuito de emergencia)
- Mantener confinado el material radiactivo (blindaje y contención)



Reactores avanzados de fisión

Requisitos de sostenibilidad

- Simplicidad en equipos y menor coste
- Reducir dosis radiactiva en operación
- Reducir probabilidad fusión del combustible (de 10^{-6} a 10^{-7})
- Diseño con 60 años de vida
- Reducir volumen residuos radiactivos
- Licenciamiento conjunto de construcción y operación
- Reducir riesgo financiero

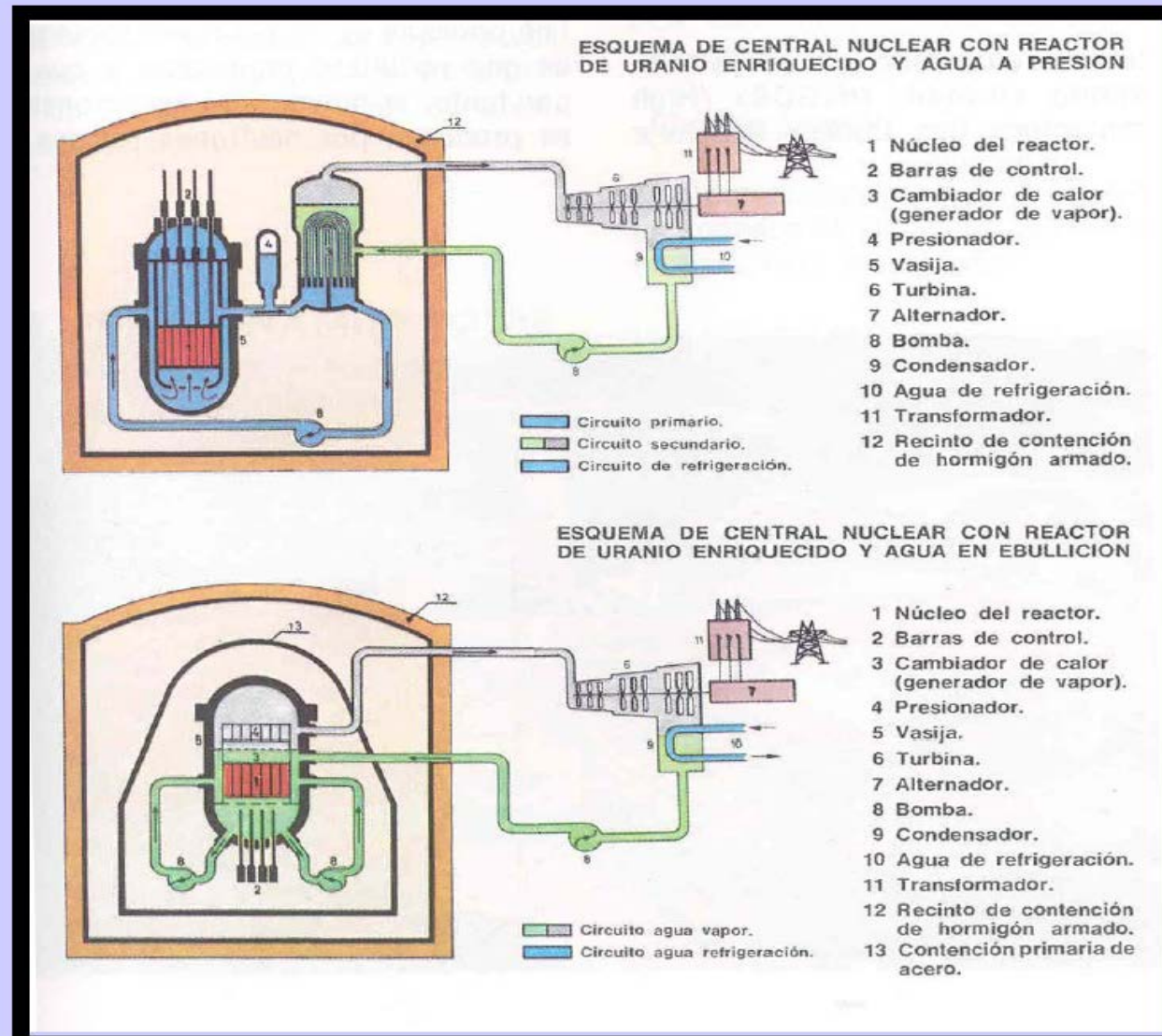


Evolución de la I+D+i en Reactores de fisión

- **Generación-I** Los prototipos iniciales
- **Generación-II** Los actuales en operación
 Sistemas de seguridad redundantes
- **Generación-III** Diseños evolutivos
 Seguridad sobredimensionada, construcción modular, vida 60 años
- **Generación-III+** Diseños Pasivos
 Sistemas de seguridad pasivos, que responden a leyes físicas
- **Generación-III+** Seguros por diseño
 Reactor integrado
- **Generación-IV** Futuros en desarrollo
 Nuevas prestaciones (producir H₂, combustible no proliferante)



Generación II: Reactor PWR (6) y BWR (1)

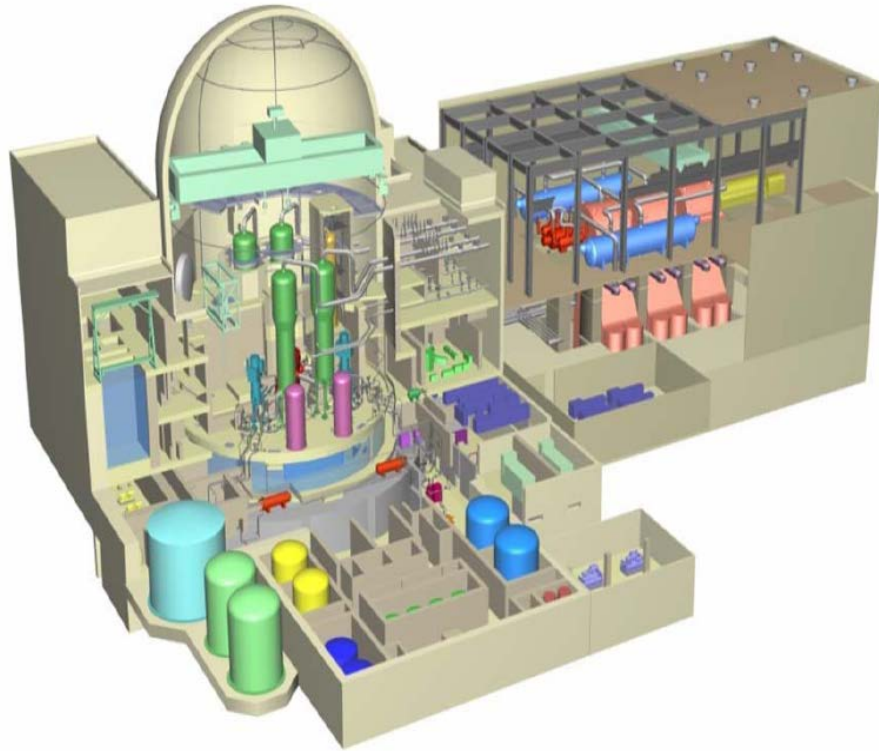


Generación III: Diseños Evolutivos

- Recogen las mejores experiencias previas
- Sistemas de seguridad sobredimensionados y redundantes
- Disponibilidad 87%
- 60 años de vida por diseño
- Construcción en 4 años
- Reducir costes un 20%



APWR



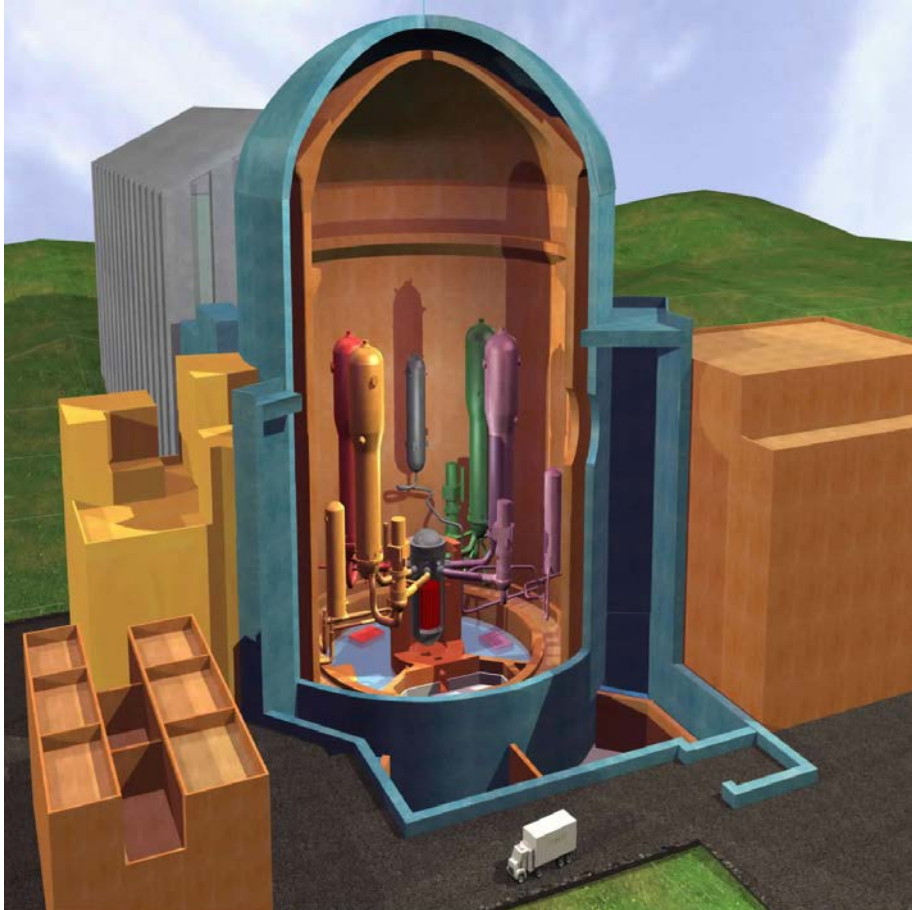
PWR avanzado (Westinghouse/ Mitsubishi)

- 1500 MWe
- Sistemas de seguridad avanzados
- Dentro de contención
- Combustible avanzado
- Mitigar accidentes severos

APR1400 (Corea)

- 4 en Barakah (Emiratos Árabes) en 2020

European Pressurized Reactor EPR (Framatome)



- 1600 MWe
- Doble contención
- Área expansión del *corium*

En construcción en:

Taishan-1 (China) **Ha arrancado en junio 2018**

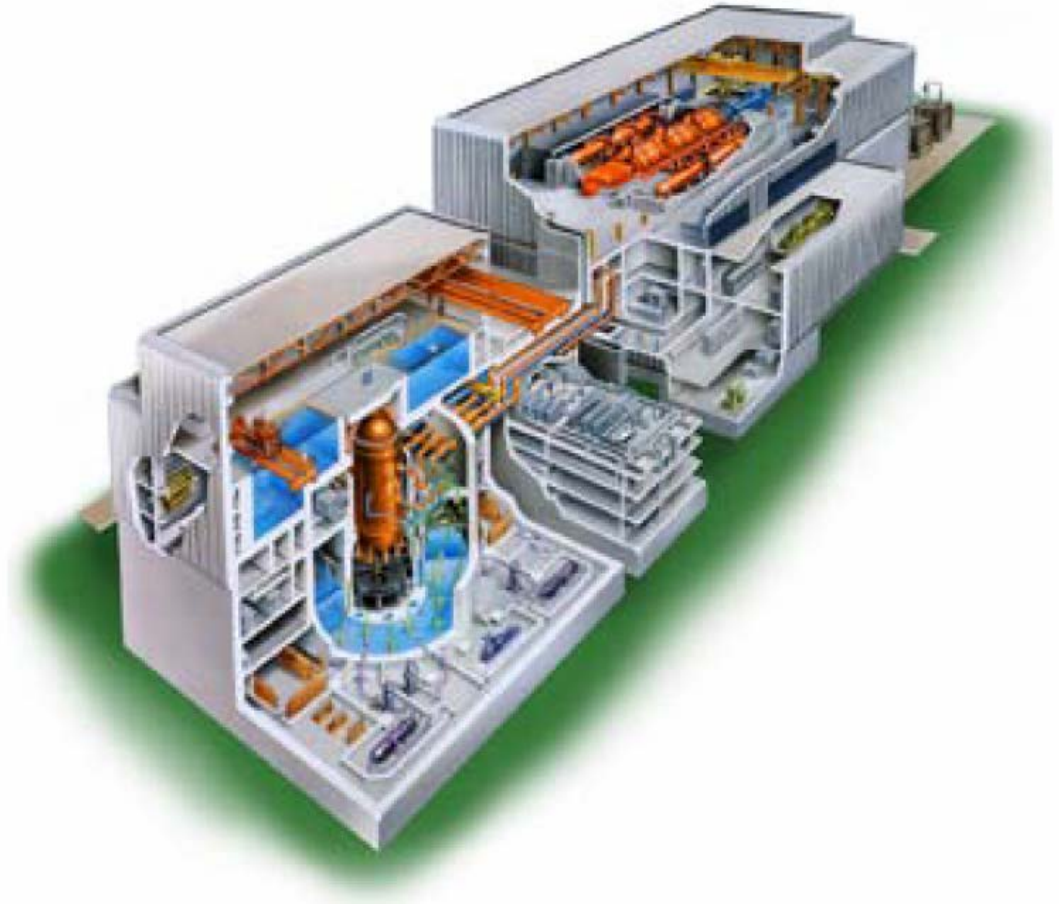
Taishan-2 (China) arranca en 2019

Okliluoto (Finlandia) arranca 2019

Flamanville (Francia) arranca 2020

2 en Hinkley Point (UK) arrancan 2025

ABWR (General Electric)



- 1350 MWe
- Bombas de recirculación internas
- Movimiento fino barras control
- I&C Digital
- 3 trenes refrigeración emergencia
- 4 CCNN Operando en Japón en 1996

Generación III+: Diseños Pasivos

- Sistemas de seguridad pasivos
- Responden a leyes naturales de la física (gravedad, condensación, convección natural, diferencias de presión ...)
- Disponibilidad 95 %
- Construcción en 3 años



AP-1000 (Westinghouse)



- 1117 MWe
- Refrigeración pasiva de contención y circulación natural de aire interno
- Tanques de agua descargan por gravedad para refrigerar el combustible en emergencia
- Intercambiadores de calor con circulación natural

En construcción:

Sanmen-1 (China) **Ha arrancado en junio 2018**

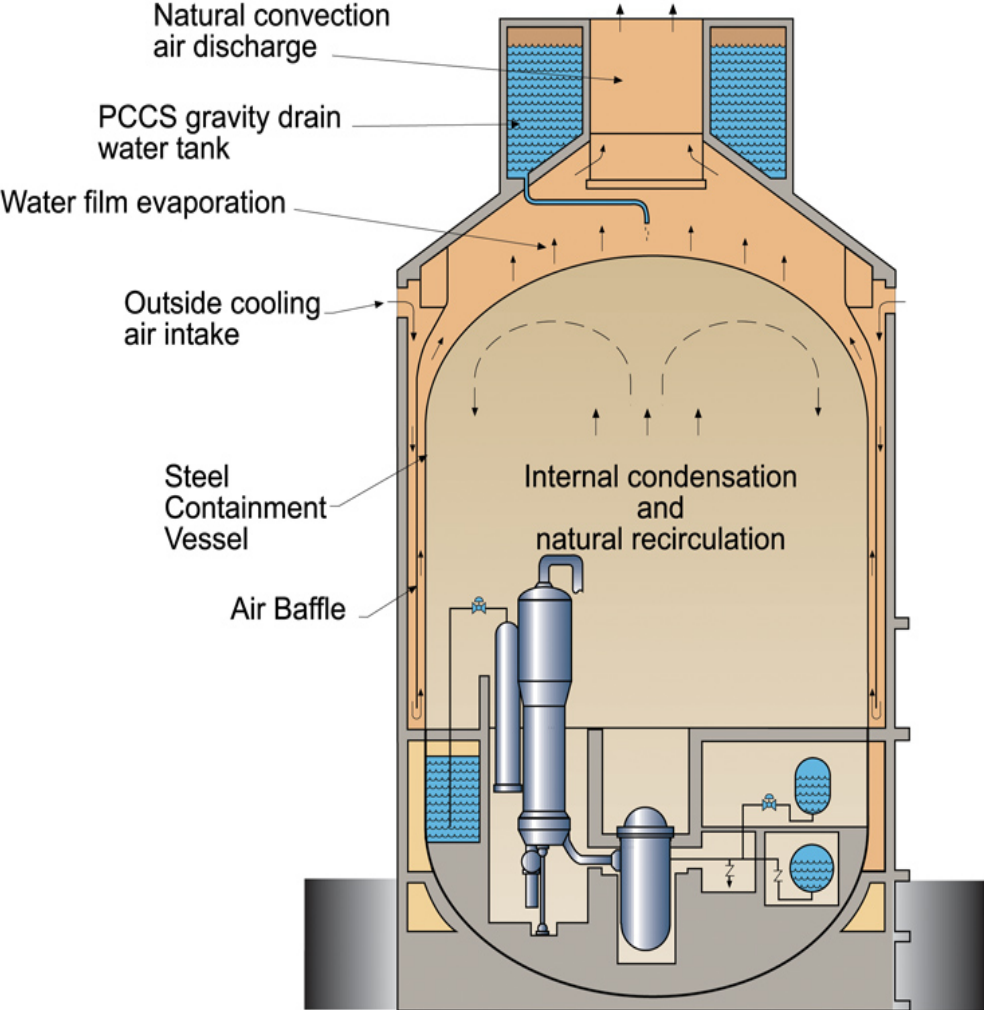
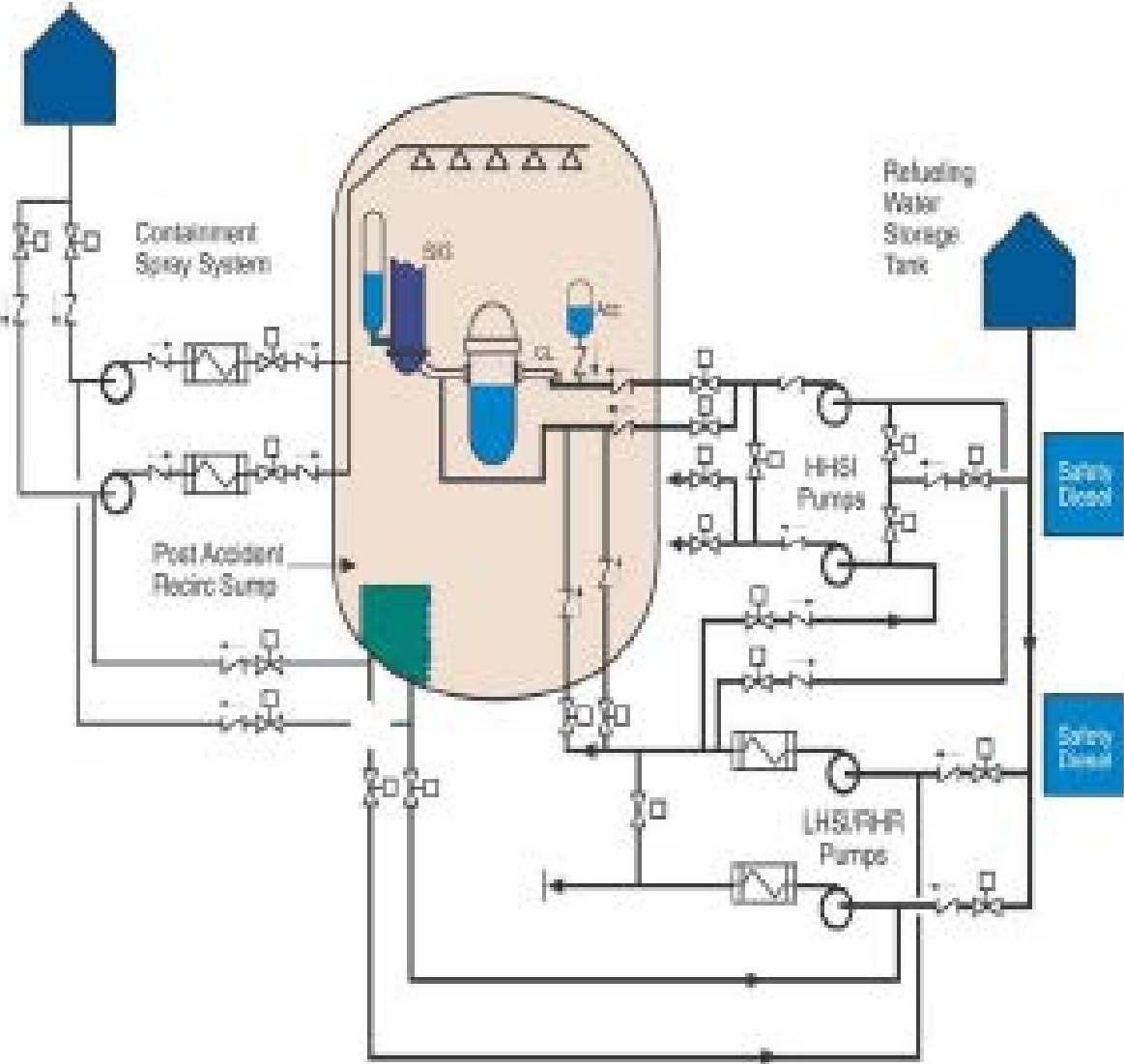
Sanmen-2 (China)

2 en Haiyang (China) arranca 2025

2 en Vogtle (EEUU) arrancan 2021 y 2022

2 en Summer (EEUU)

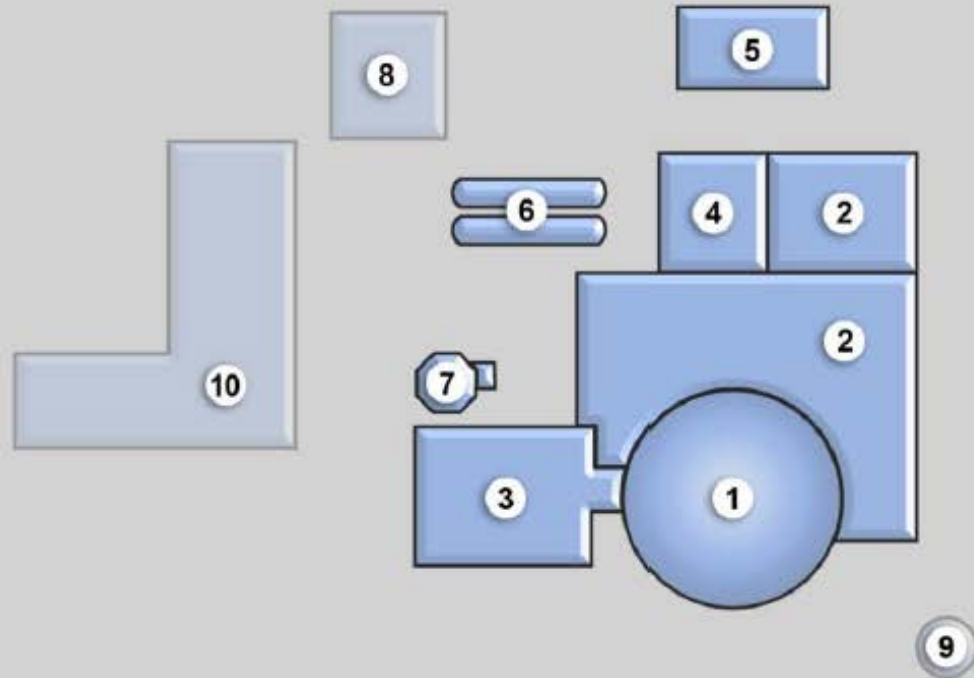
Comparación sistemas PWR y AP-1000



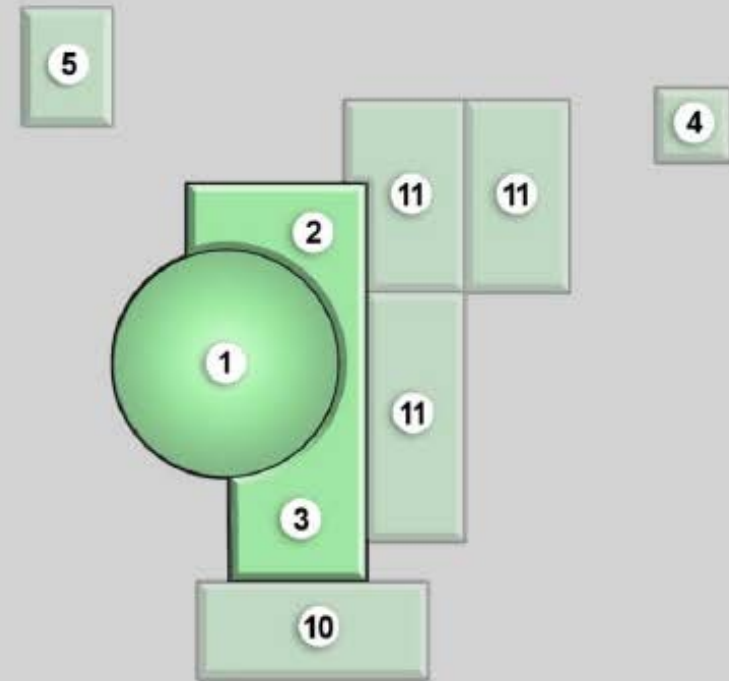
AP1000 Passive Containment Cooling System

Comparación planta PWR y AP-1000

WESTINGHOUSE GENERATION II PWR

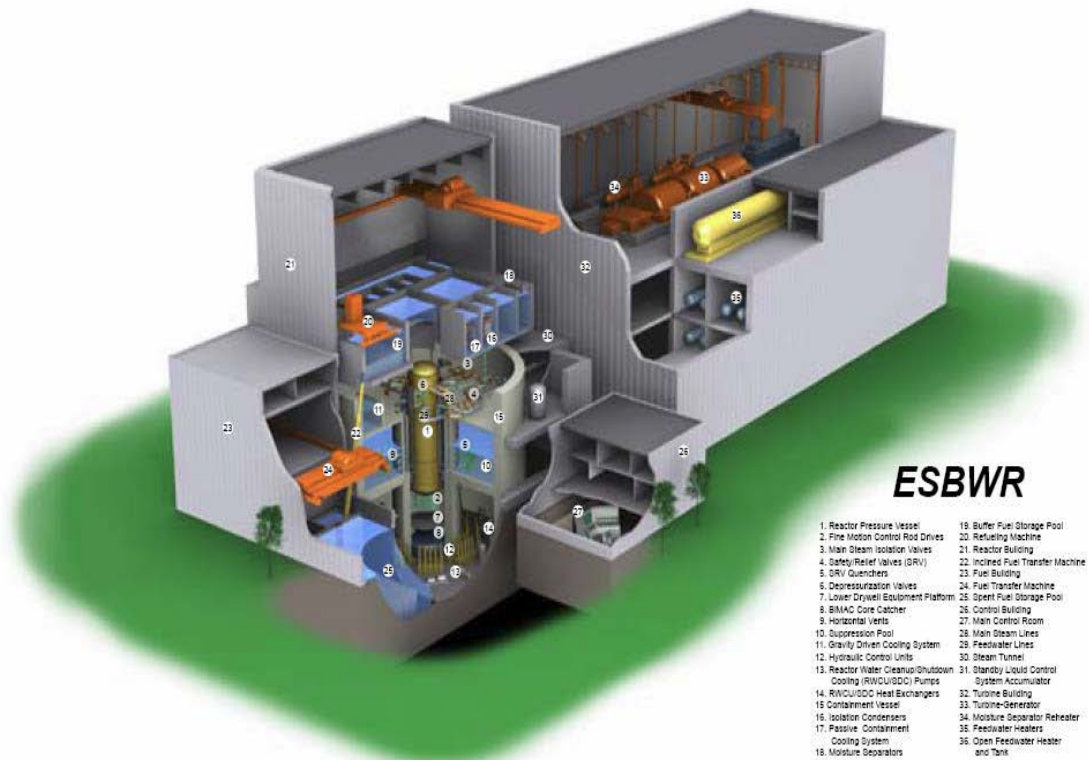


AP1000



ESBWR (General Electric)

- 1390 MWe
- Diseño simplificado
- Refrigeración por circulación natural
- Sistemas de seguridad pasivos durante 72 horas



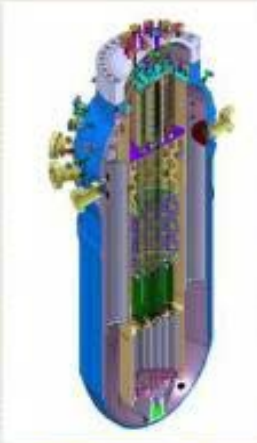
Licenciamiento para:
North Anna (EEUU)
Fermi (EEUU)

Generación III+: Seguros por diseño

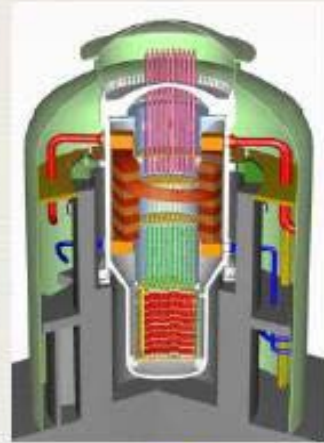
- Imposible pérdida de refrigeración del núcleo
- Simplicidad del sistema
- Baja potencia (< 300 MWe)
- Construcción modular (*Small Modular Reactor*)
- Reactor integrado y compacto (Generador de vapor dentro de la vasija)
- Experiencia en reactores para propulsión de submarinos
- Arranque en 2019 (KLT-40S), en 2022 (CAREM)
- Como curiosidad Bill Gates: desarrollando el *Traveling Wave Reactor*



SMR: *Small modular reactors*



CAREM-25
Argentina



IMR
Japan



SMART
Korea, Republic of



VBER-300
Russia



WWER-300
Russia



KLT-40s
Russia



mPower
USA



NuScale
USA



**Westinghouse
SMR - USA**



CNP-300
China, People Republic of



ABV-6
Russia

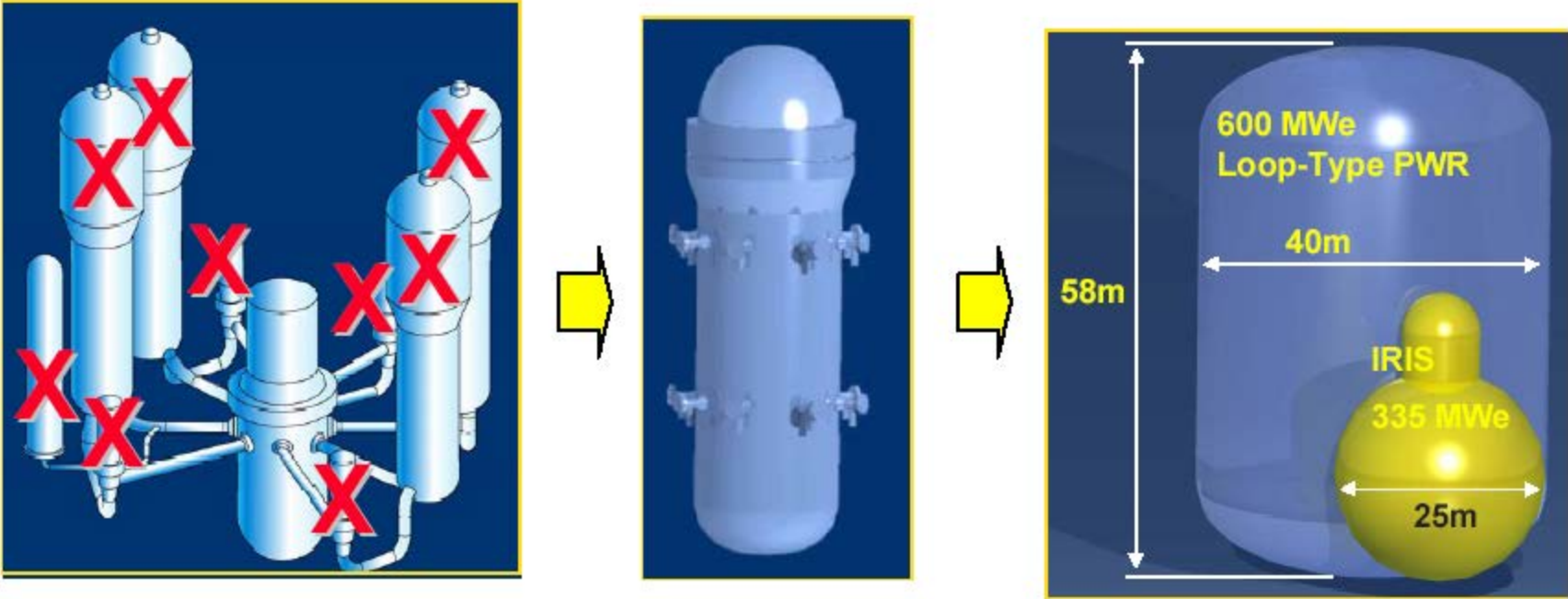


SMR (Westinghouse)



- Reactor modular pequeño
- 225 MWe
- PWR integrado
- Componentes primarias dentro vasija
- Sistemas de seguridad pasivos
- Combustible robusto
- Seguimiento de carga diario
- Barras de control negras y grises

Comparación PWR y SMR (Westinghouse)

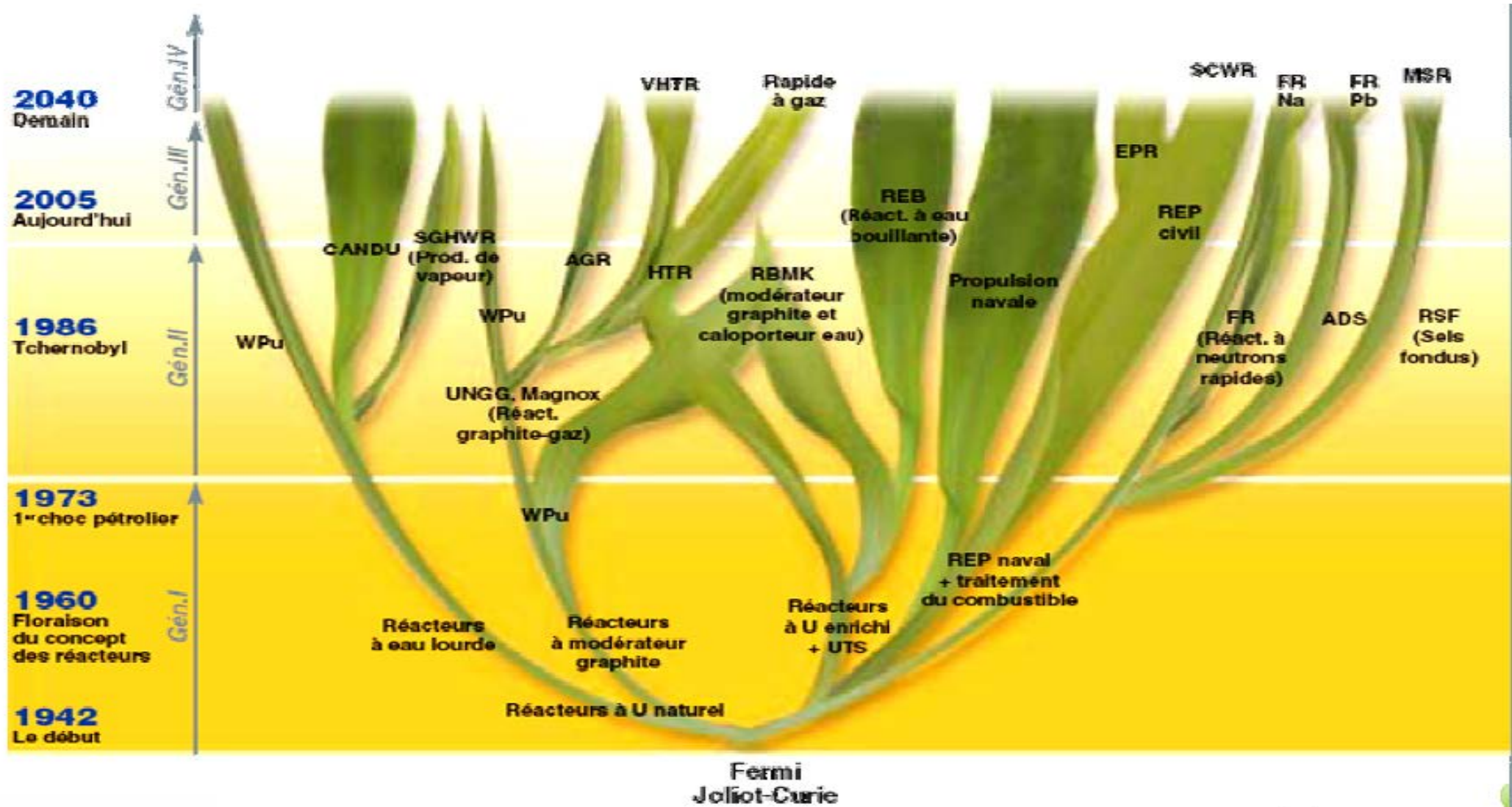


Generación IV (en Desarrollo)

- Varios refrigerantes: metales líquidos, gas alta temperatura, vapor supercrítico, sales fundidas
- Varios combustibles: metales, carburos, bolas
- Varios convertidores de energía: ciclos de gas, de vapor o ciclos combinados
- Producción de H₂, y agua desalada
- Combustible no-proliferante
- Disponibles en 2040



Generación IV: Evolución cronológica de la I+D



Reactores de Fusión

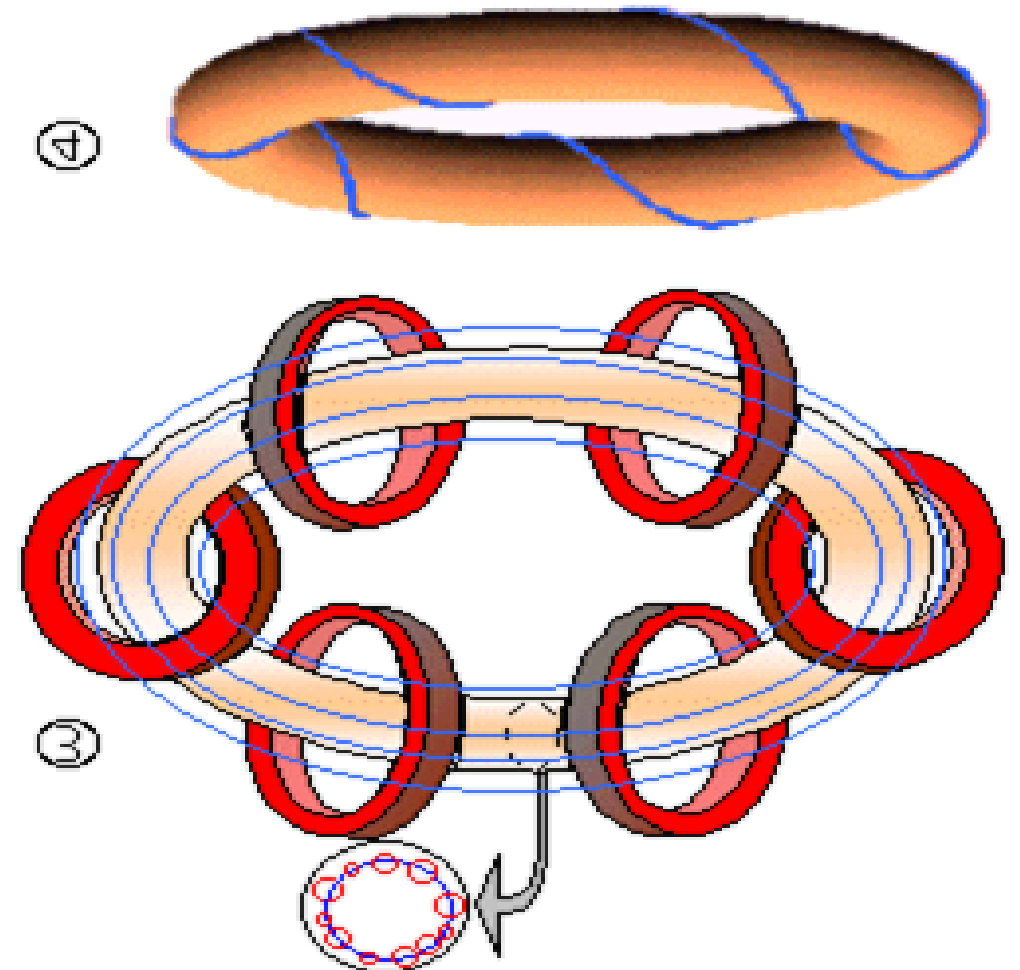
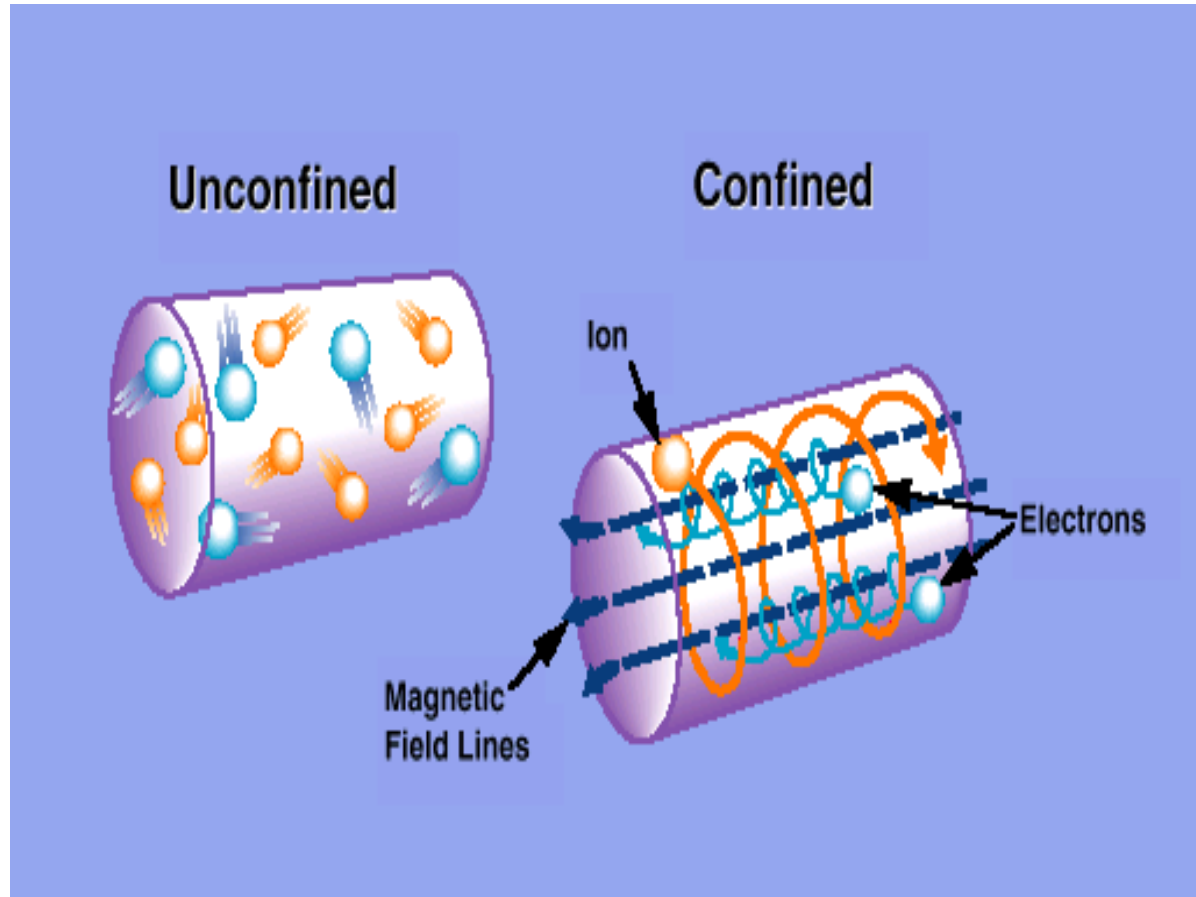
Fases del I+D: Científica (superada)
 Tecnológica (actualmente)
 Económica (futuro)

Breakeven $Q=1$: Energía consumida = Energía producida

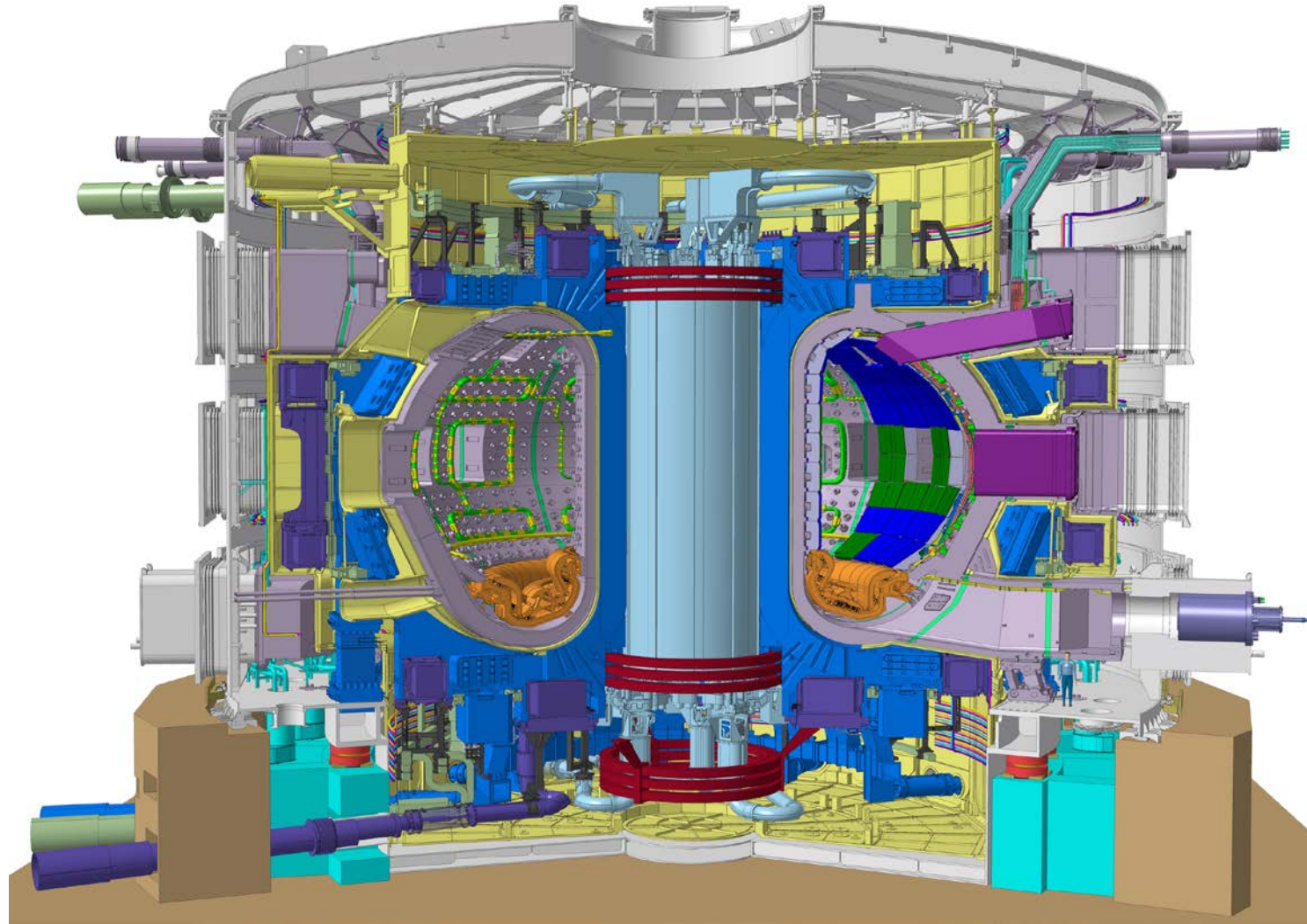
- Confinamiento por campos Magnéticos (JET, ITER)
JET Consiguió en 1991: $Q=0,67$ (Inglaterra)
ITER Previsto en 2025: $Q=10$ (Europa en Francia)
- Confinamiento inercial por laser (NIF, LMJ)
NIF Consiguió en 2015: $Q=1$ (EEUU)
LMJ arrancó en 2014 para pruebas de materiales



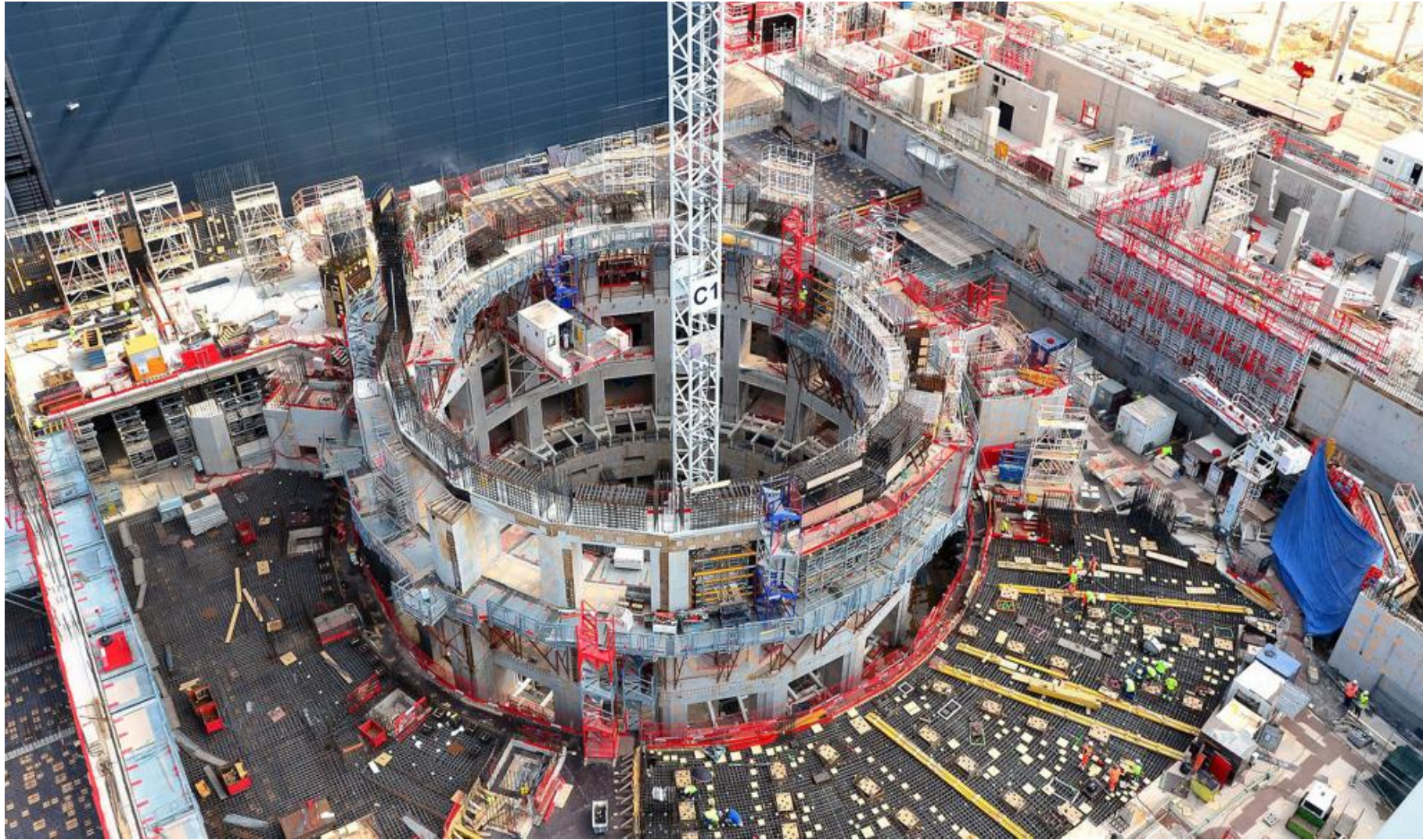
Planta de Fusión por Confinamiento magnético



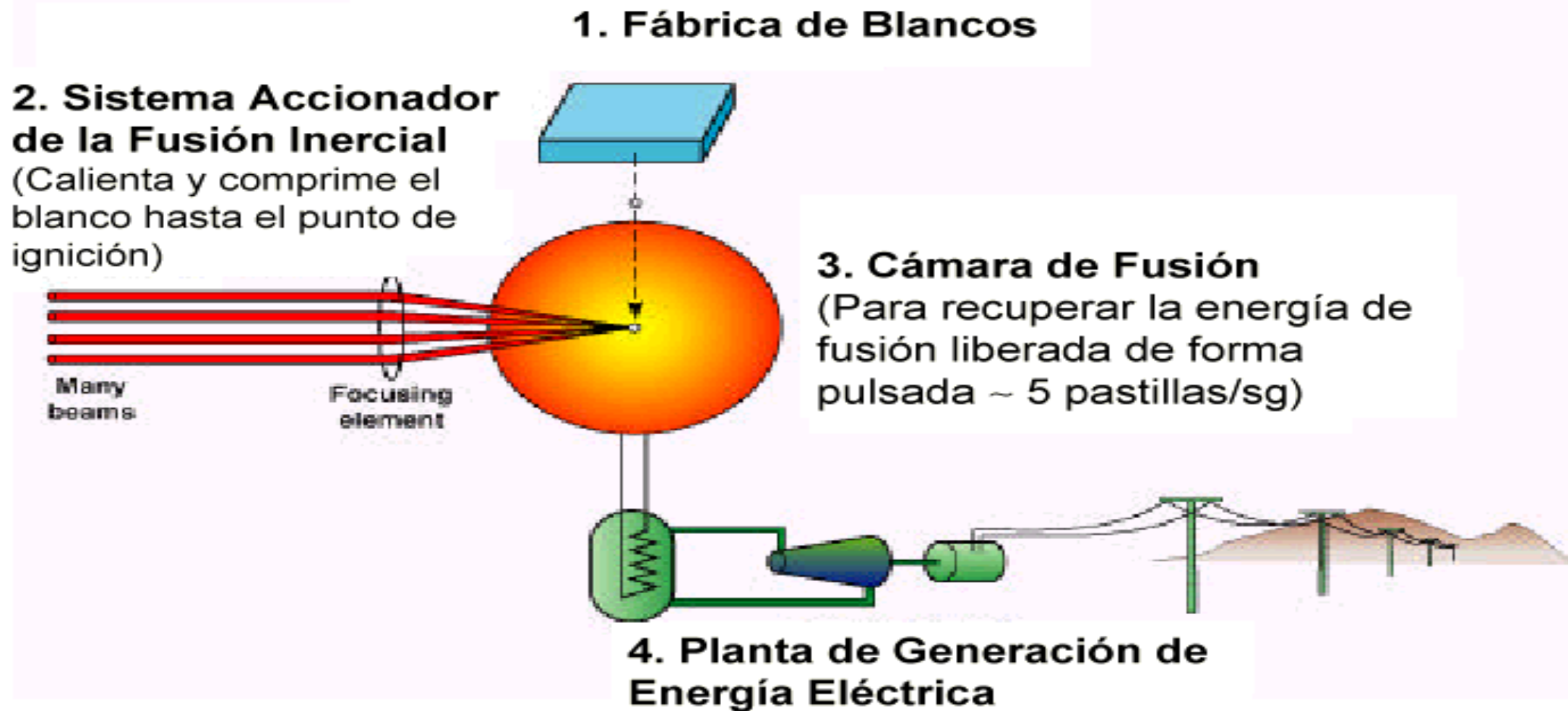
ITER: International Tokamak European Reactor



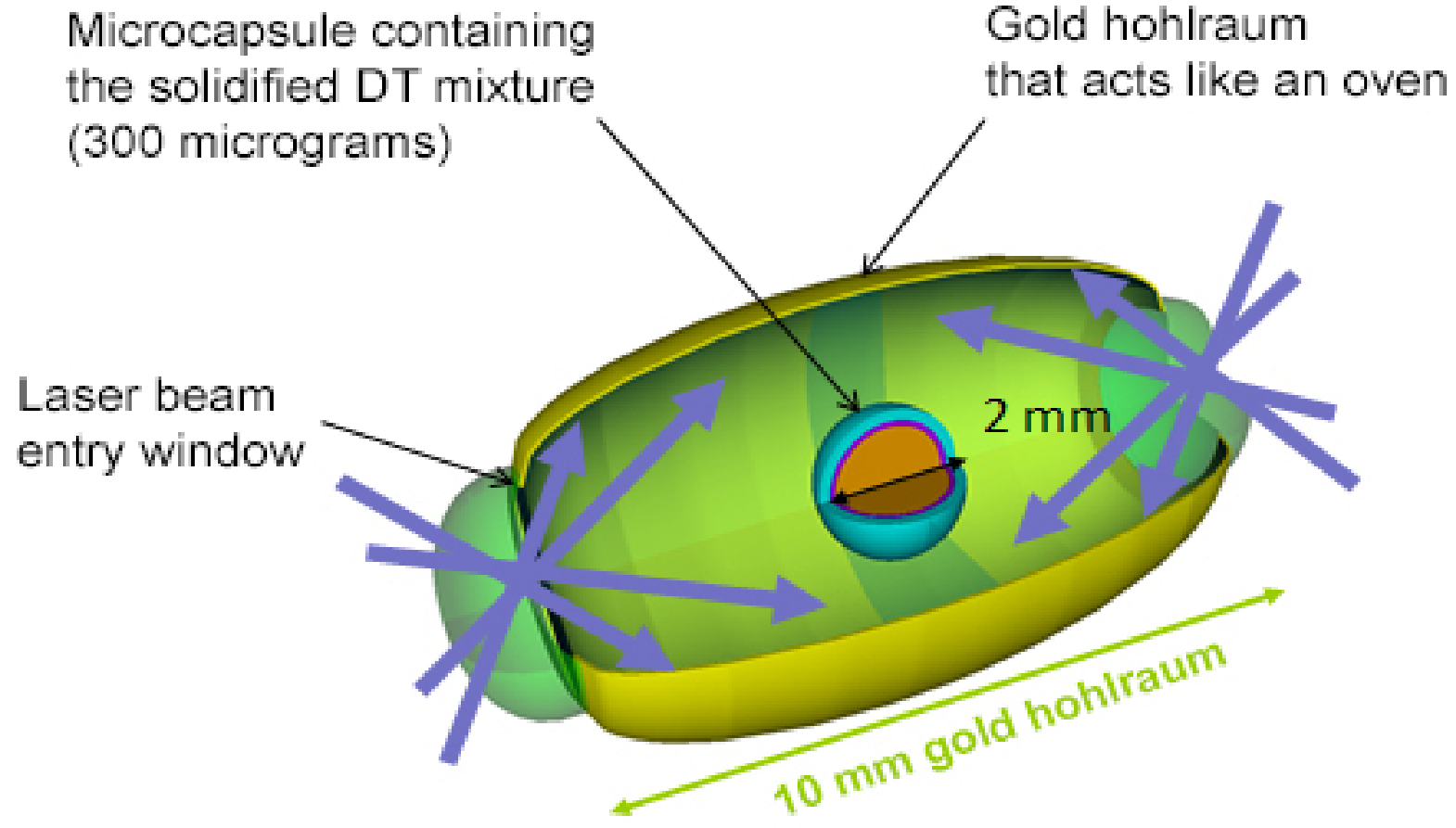
ITER Construcción (Francia)



Planta de Fusión por Confinamiento Inercial



Blanco de DT



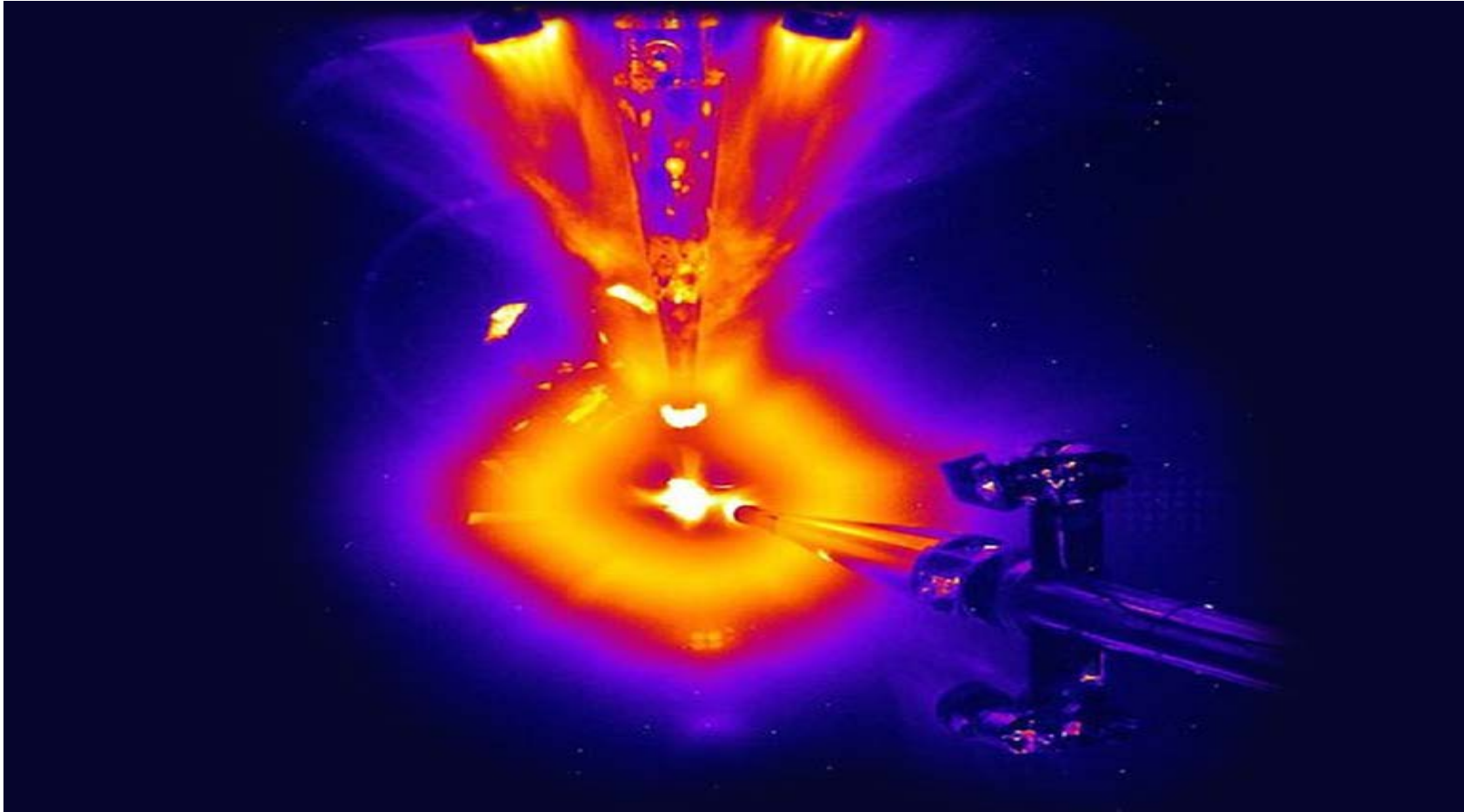
NIF: National Ignition Facility (EEUU)

192 Haces de laser en blancos de 1mm^3

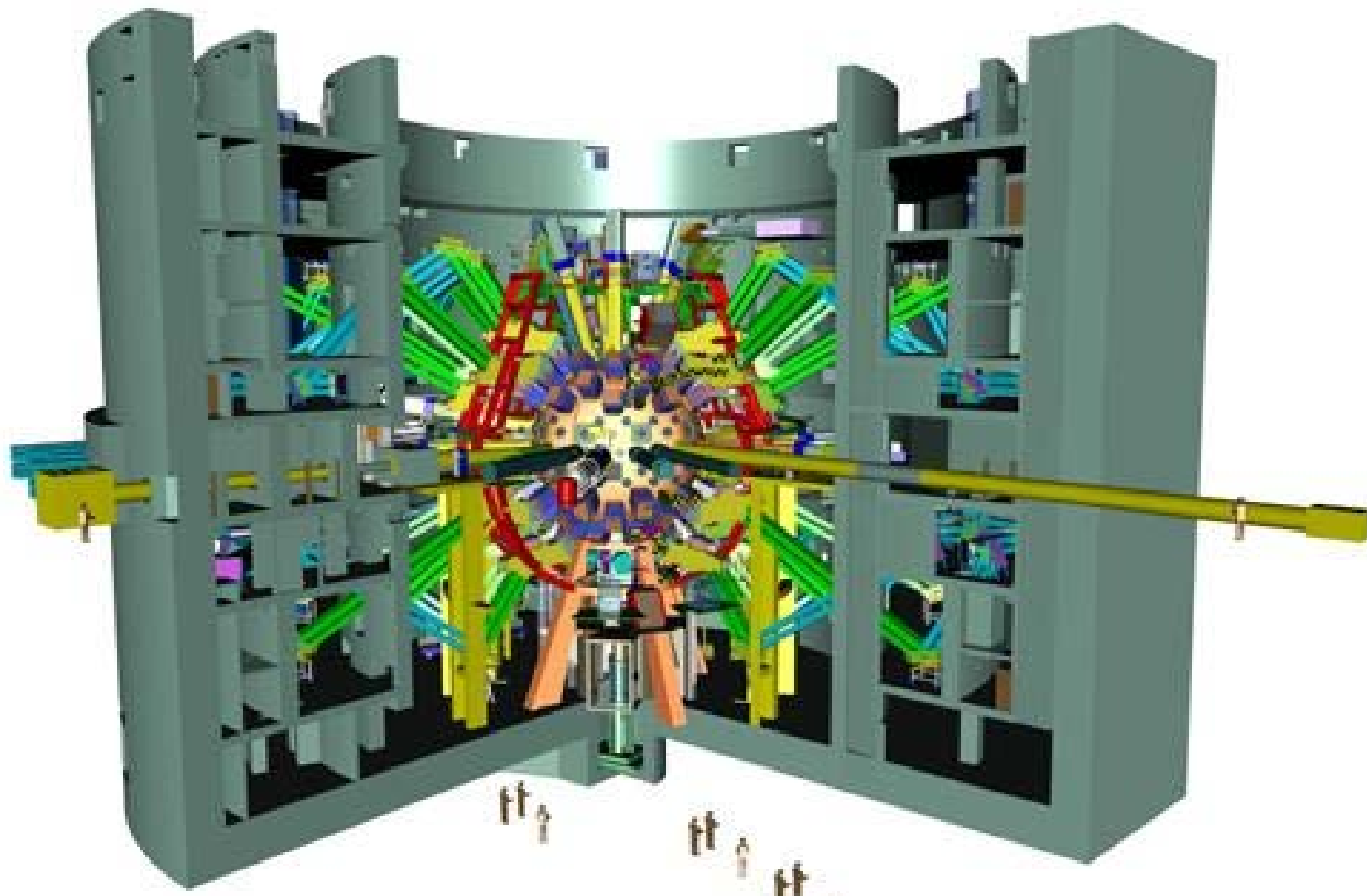


NIF has exceeded its design specification (1.8 MJ, 500 TW)

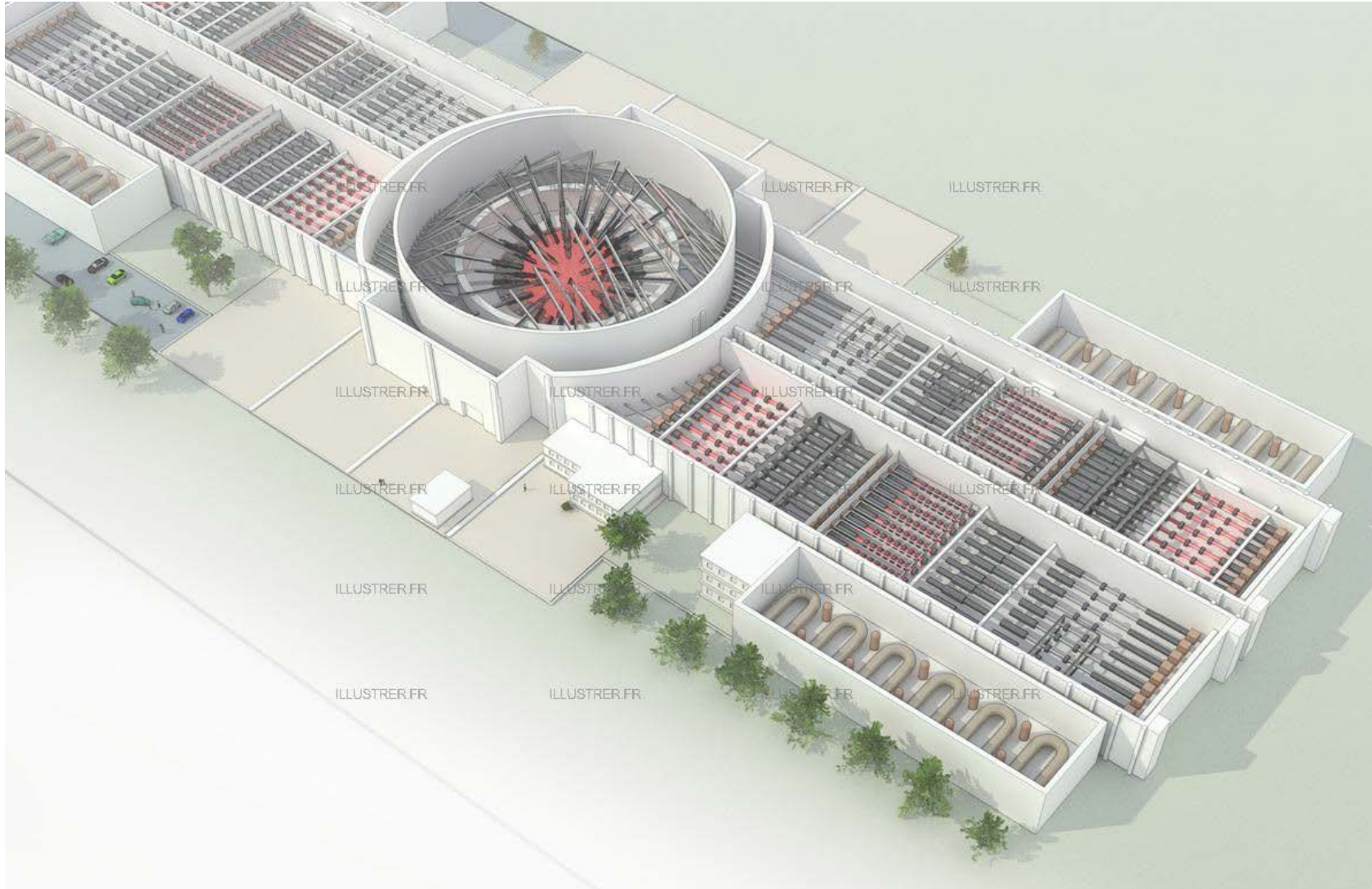
NIF: disparo en pastilla Ignición en 2012



Laser Mega Joule (Francia)



Laser Mega Joule (Francia)



Perspectivas

- La energía nuclear seguirá teniendo un peso importante en la producción de energía eléctrica, con la extensión de la vida de las centrales de Generación-II a 60 años.
- Las empresas diseñadoras siguen trabajando en el I+D+i de conceptos avanzados de reactores de fisión. **Las empresas españolas participan en el desarrollo de algunos de estos conceptos.**
- Los nuevos también producirán H₂, agua desalada.
- En 2018 hitos relevantes: arranca operación primeros EPR, y AP-1000
- Los reactores de fusión serán una realidad en el futuro, como fuente inagotable de energía y sin generar residuos radiactivos.

