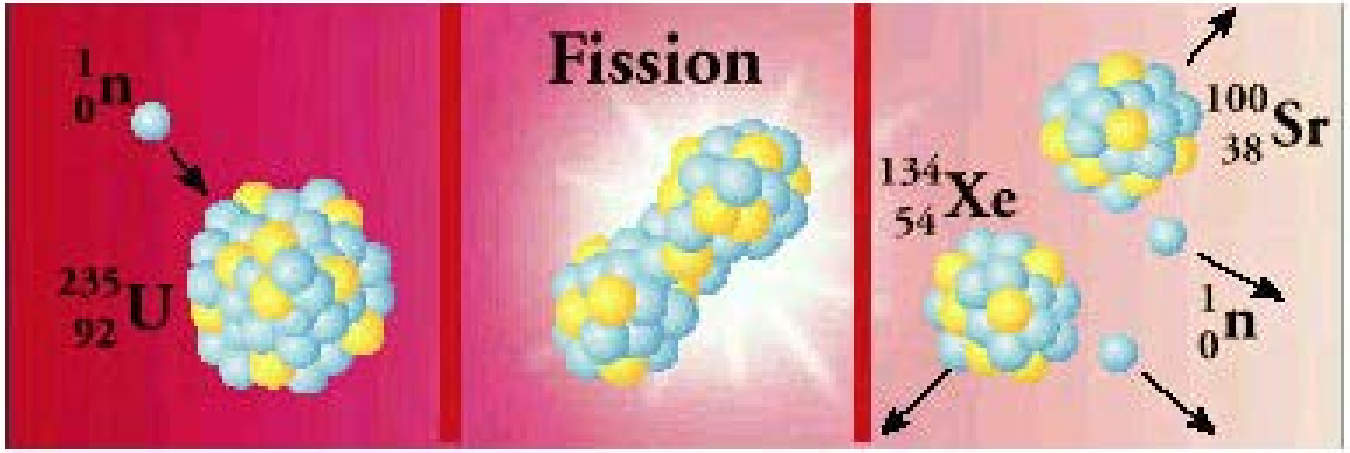
Reactores nucleares avanzados de fisión y fusión

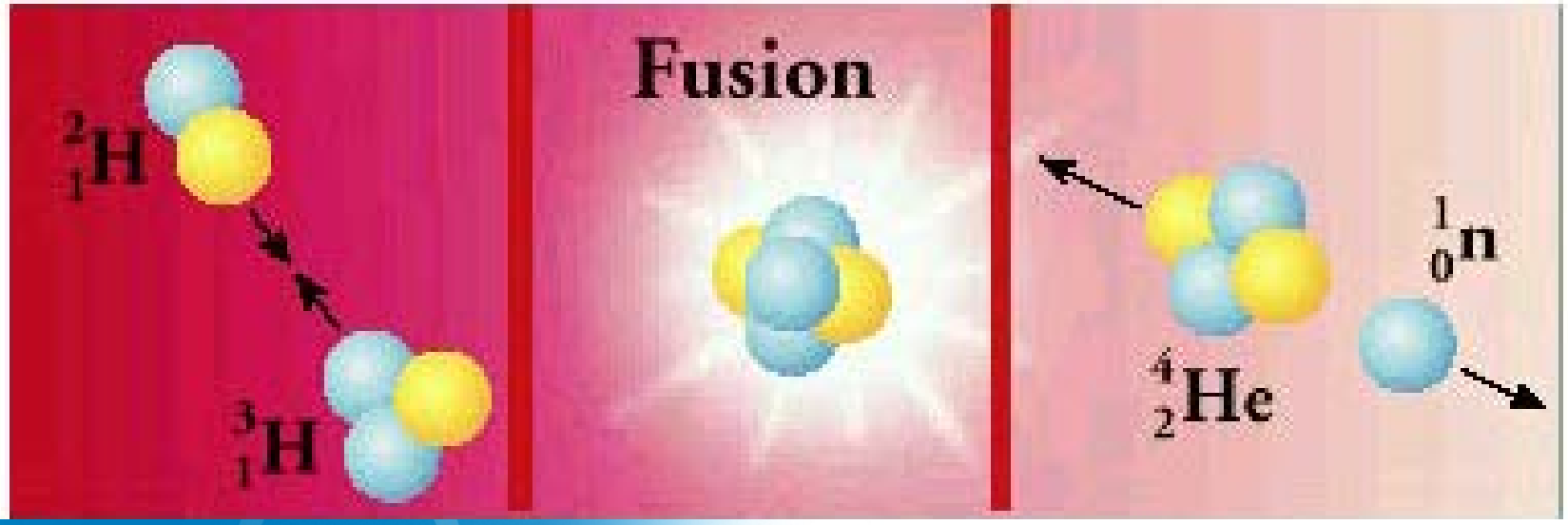
Carolina Ahnert
Catedrática Ingeniería Nuclear
Universidad Politécnica de Madrid

II Jornadas sobre energía y educación
Barcelona, 12 julio 2018

Foro Nuclear
Foro de la Industria Nuclear Española

ENERGIA NUCLEAR, $E = mc^2$



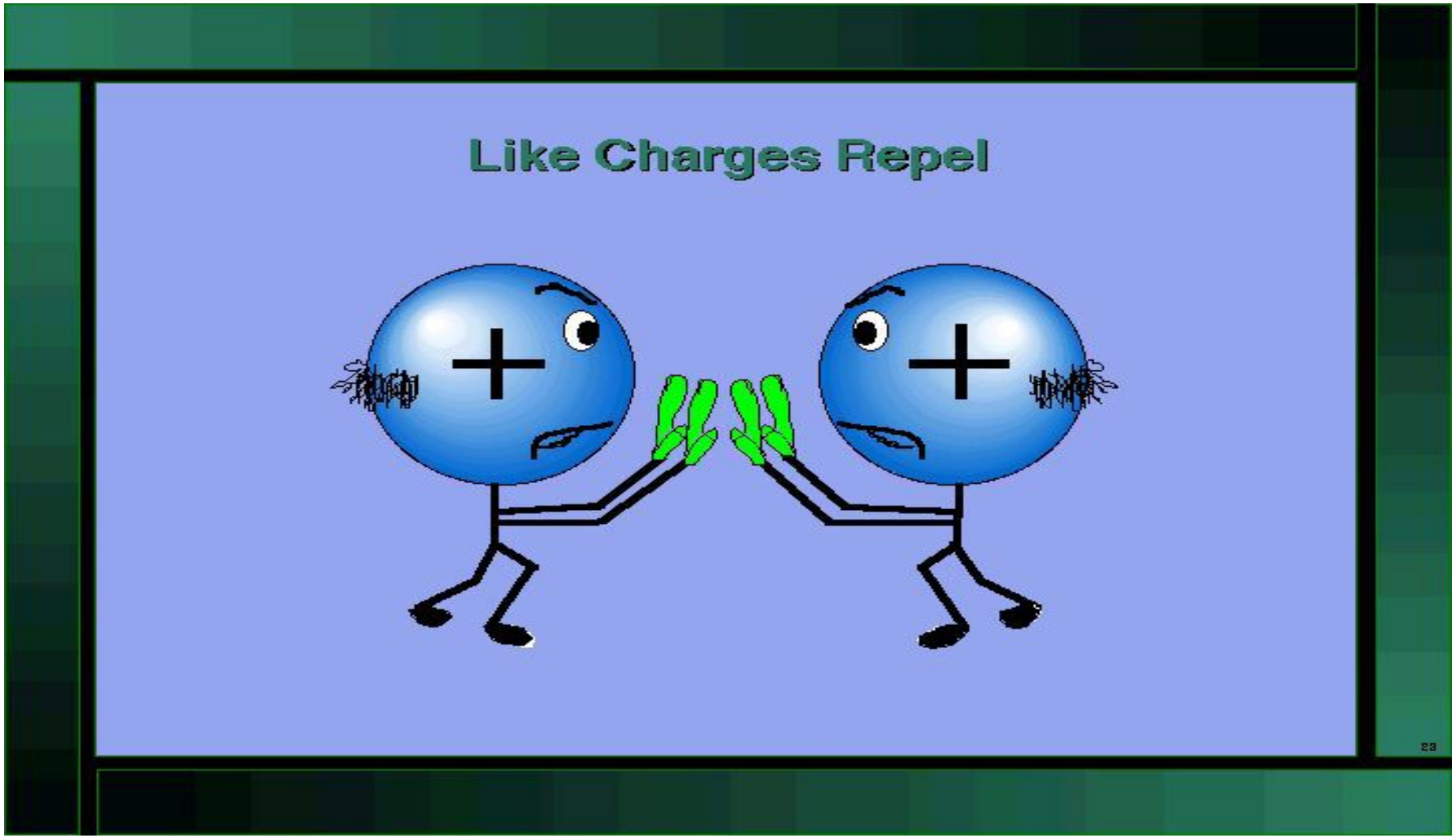


Requisitos Energía Nuclear

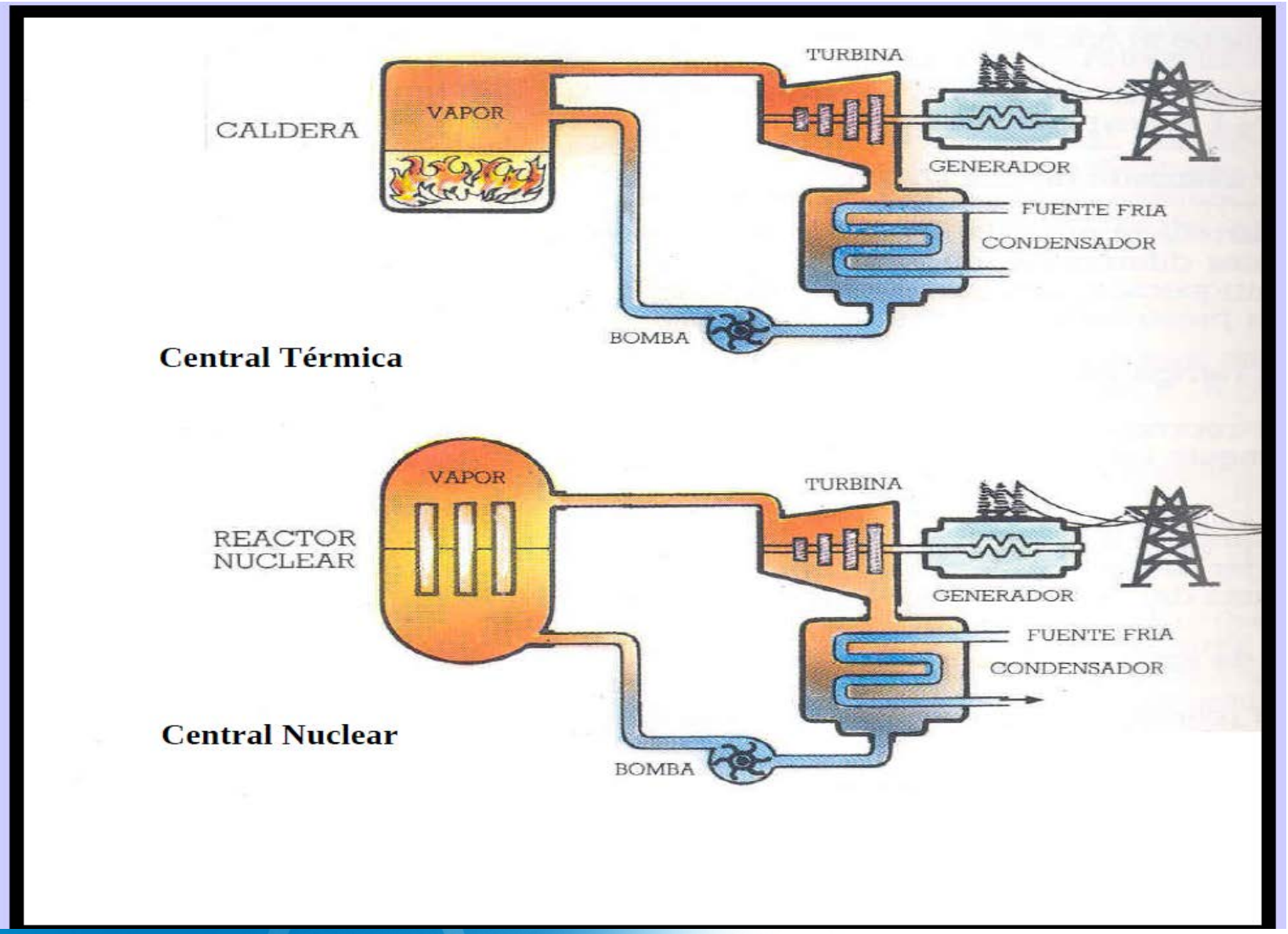
- **Reactor de Fisión** (En operación)
  Masa crítica de Uranio físil + flujo de neutrones libres
  444 CCNN en operación en el mundo + 64 en construcción (2/3 en Asia)

- **Reactor de Fusión** (En desarrollo)
  Temperatura = 100 x 10^6 ºC (materia en estado de plasma iónico)
  Criterio de *Lawson*: densidad iones D+T × tiempo > 10^{15} iones.seg/cm^3
  - Confinamiento Magnético (campos electromagnéticos)
    densidad = 10^{14} (iones/cm^3), tiempo = 10 seg.
  - Confinamiento Inercial (láseres)
    densidad = 10^{25} (iones/cm^3), tiempo = 10^{-10} seg. (pulsos)

Fusión: Los núcleos se repelen



Central Térmica y 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

Generaciones de Reactores de fisión

- **Generación-I** Los prototipos iniciales
- **Generación-II** Los actuales en operación

  Sistemas de seguridad redundantes
- **Generación-III** Diseños evolutivos

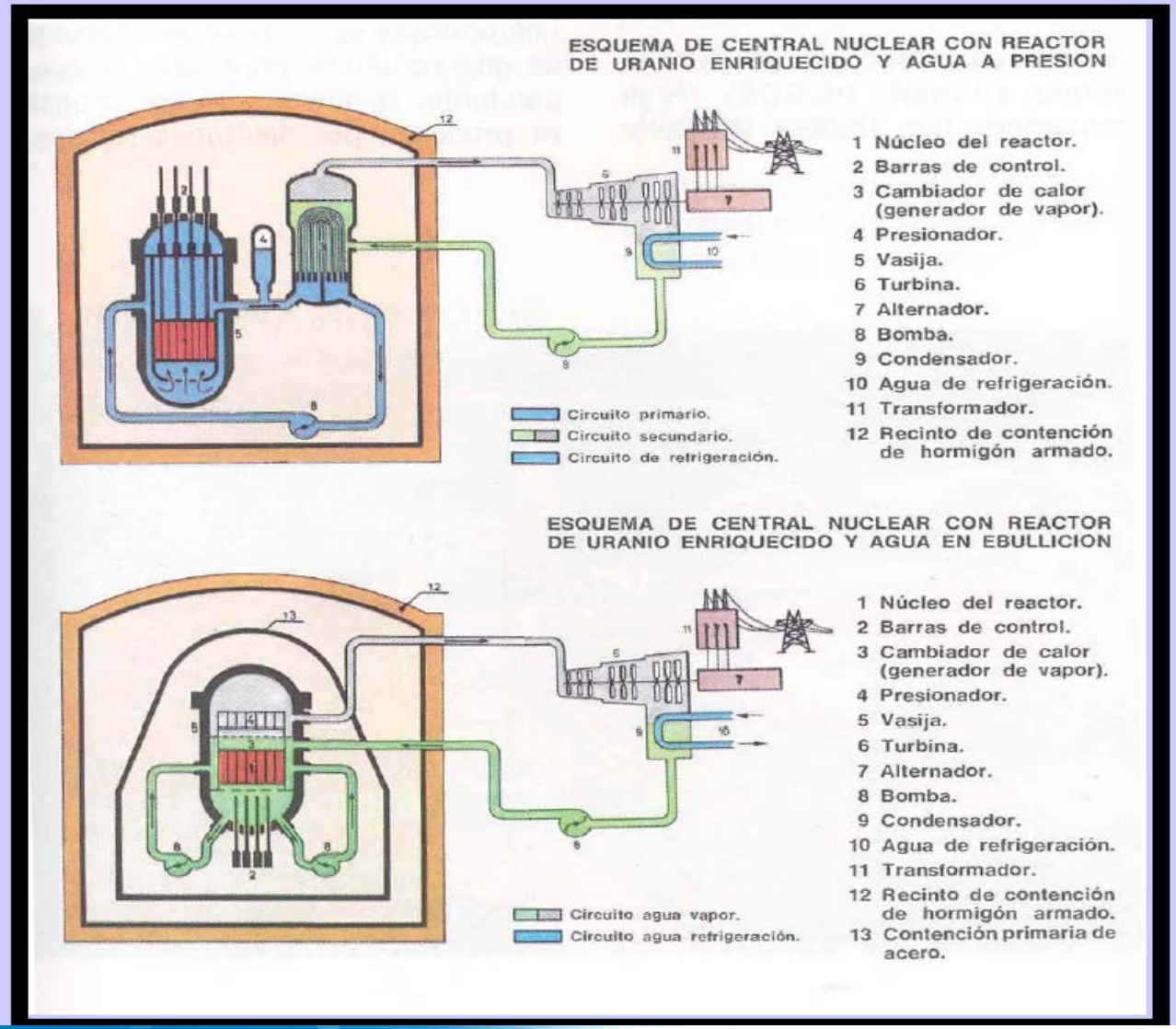
  Seguridad sobredimensionada, construcción modular, vida 60 años
- **Generación-III+** Diseños Pasivos

  Sistemas de seguridad pasivos, que responden a leyes físicas
- **Generación-III+** Seguros por diseño

  Reactor integrado
- **Generación-IV** Futuros en desarrollo

  Nuevas prestaciones (producir H_2, combustible no proliferante)

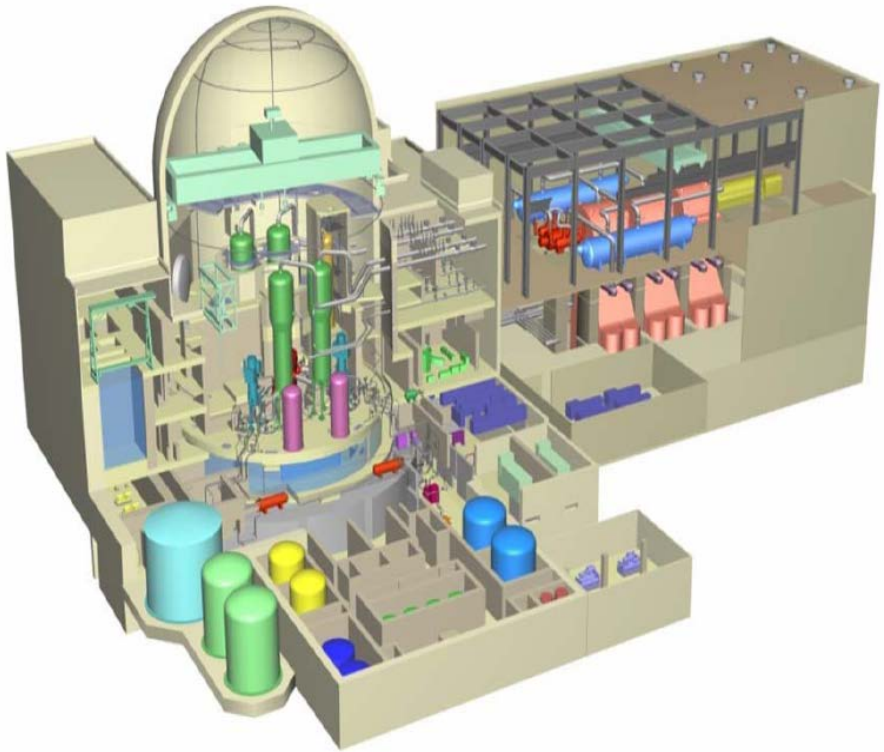
Generación II: Reactor PWR (6) y BWR (1)



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



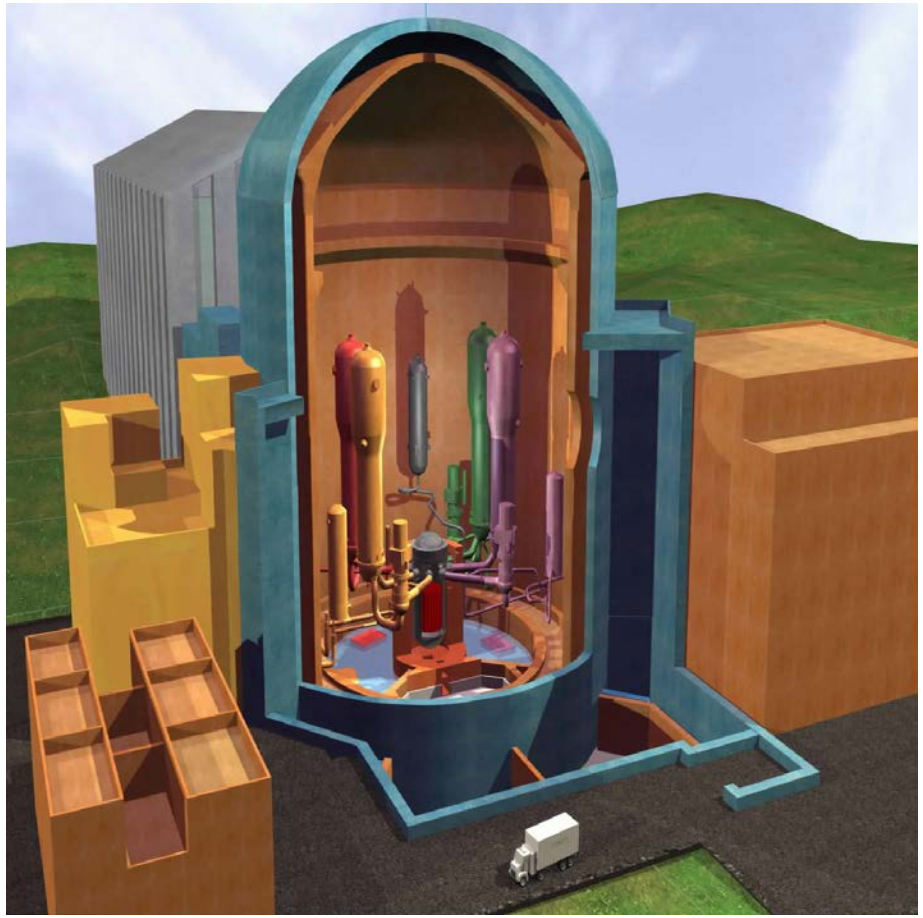
PWR avanzado (Westinghouse/ Mitsubishi)

- 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)

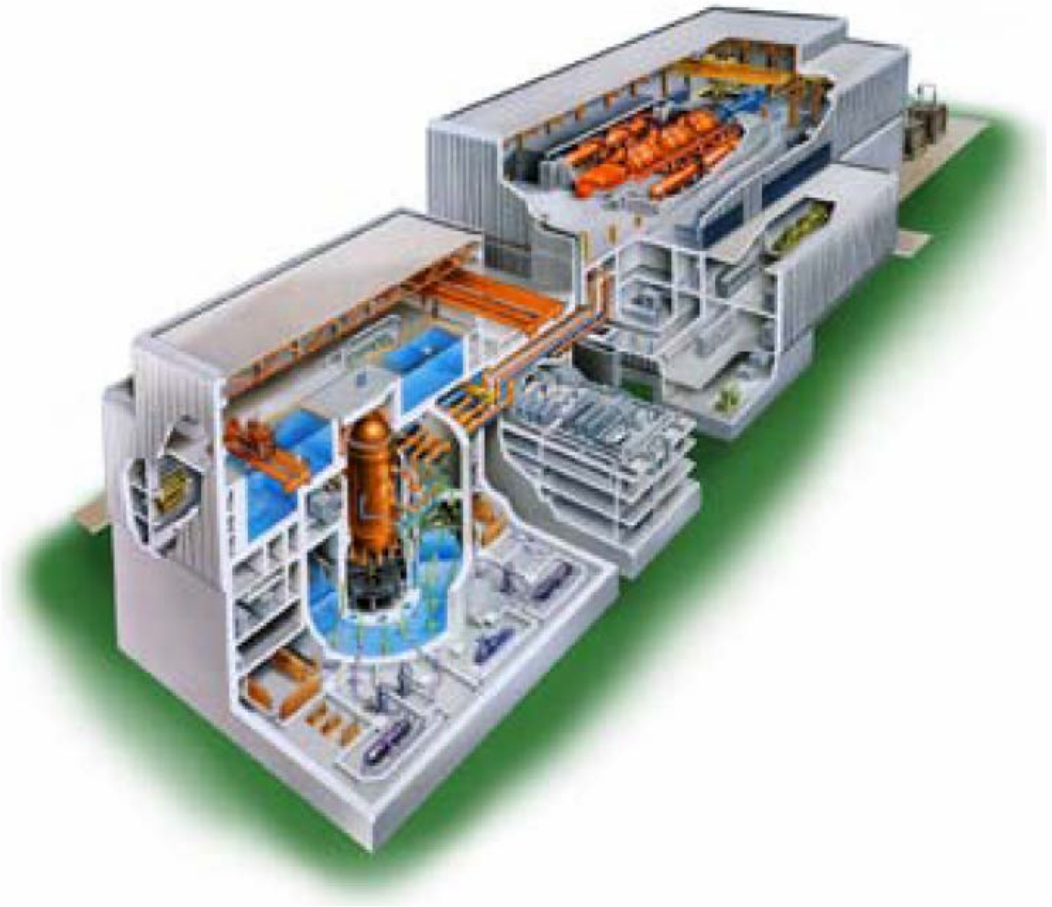


- 1600 MWe
- Doble contención
- Área expansión del *corium*

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)

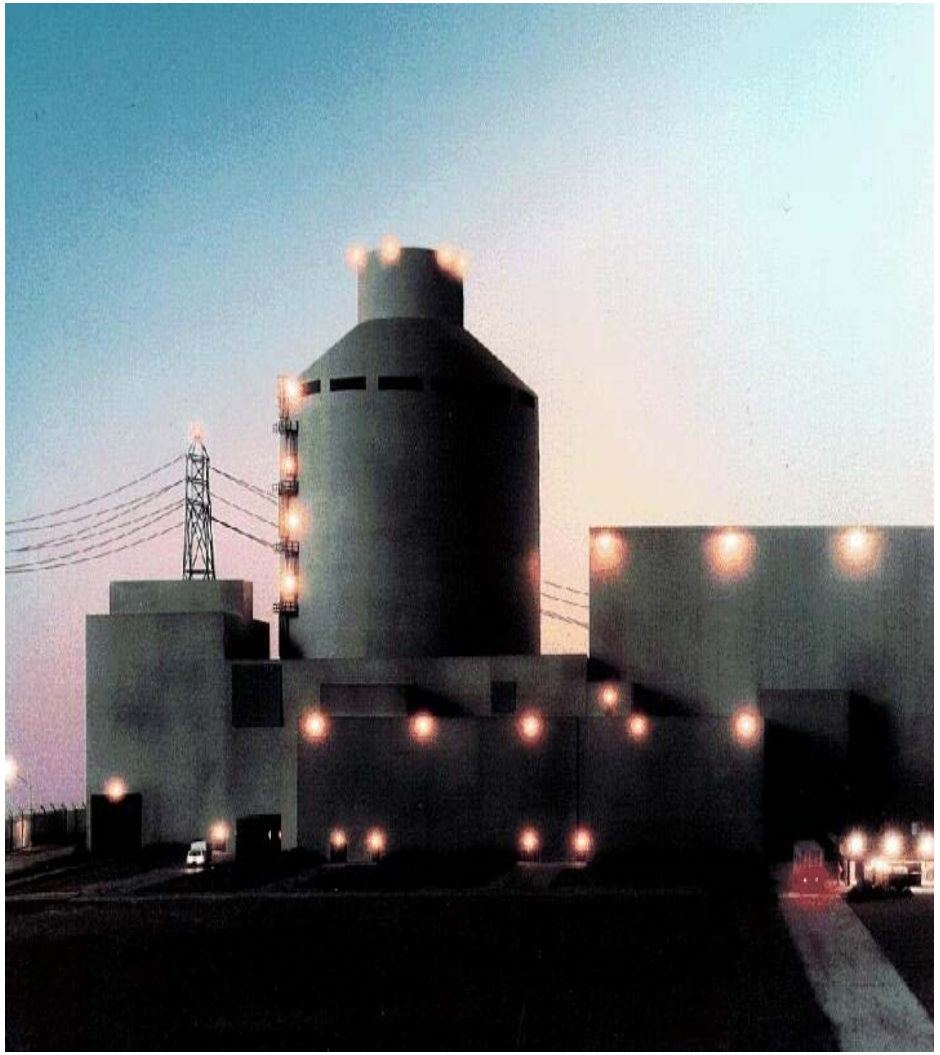


- 1350 MWe
- Bombas de recirculación internas
- Movimiento fino barras control
- I&C Digital
- 3 trenes refrigeración emergencia
- 4 CCNN Operando en Japón en 1996

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**

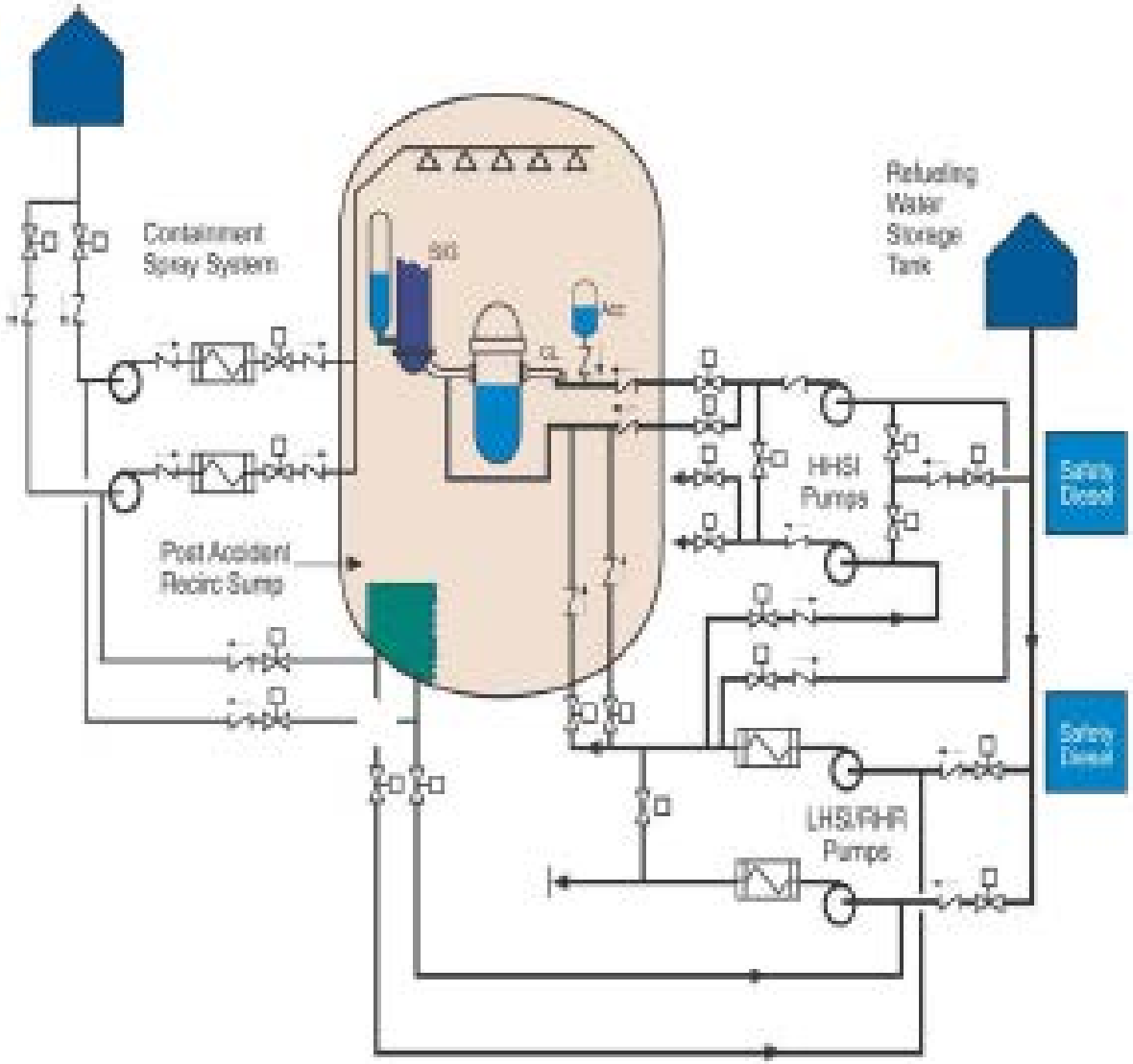
Sanmen-2 (China)

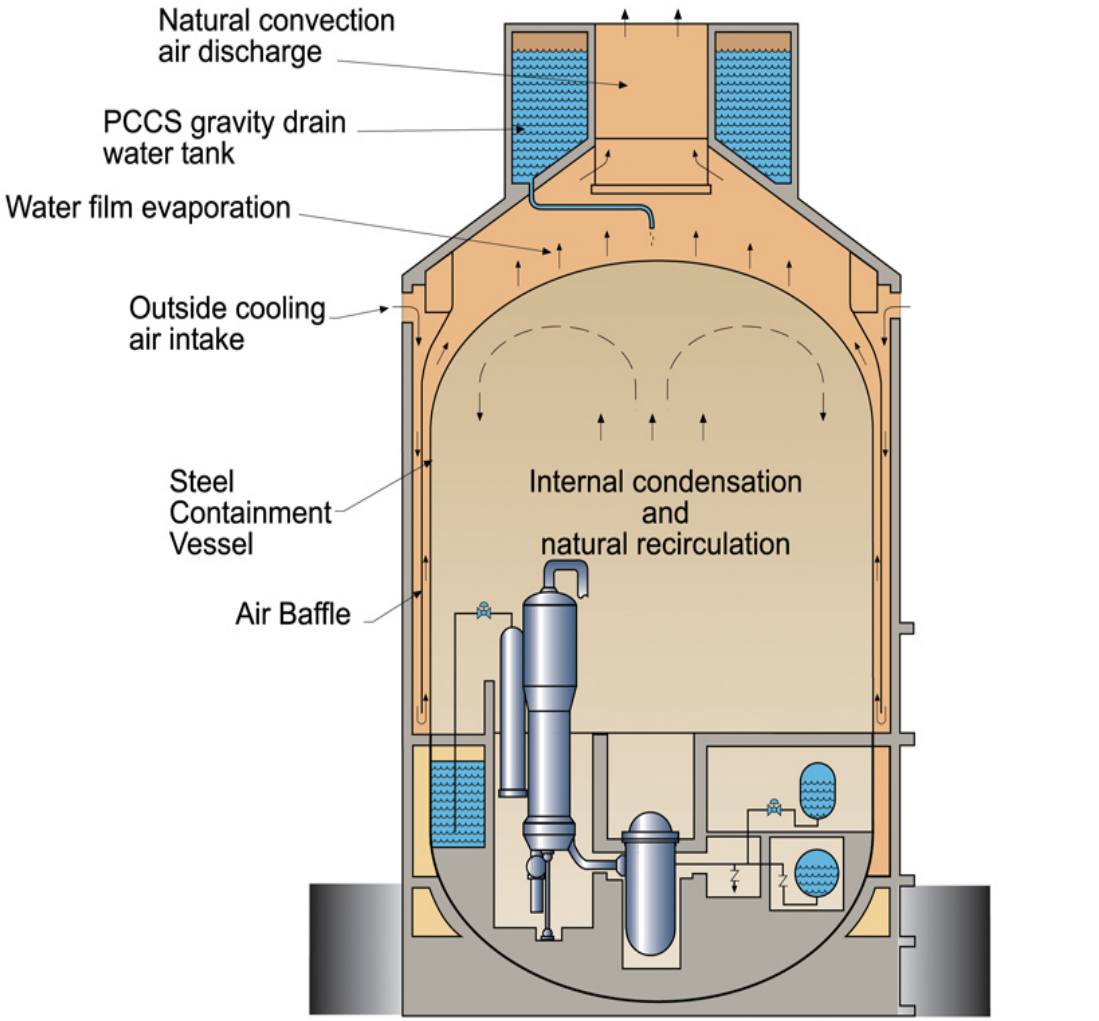
2 en Haiyang (China) arranca 2025

2 en Vogtle (EEUU) arrancan 2021 y 2022

2 en Summer (EEUU)

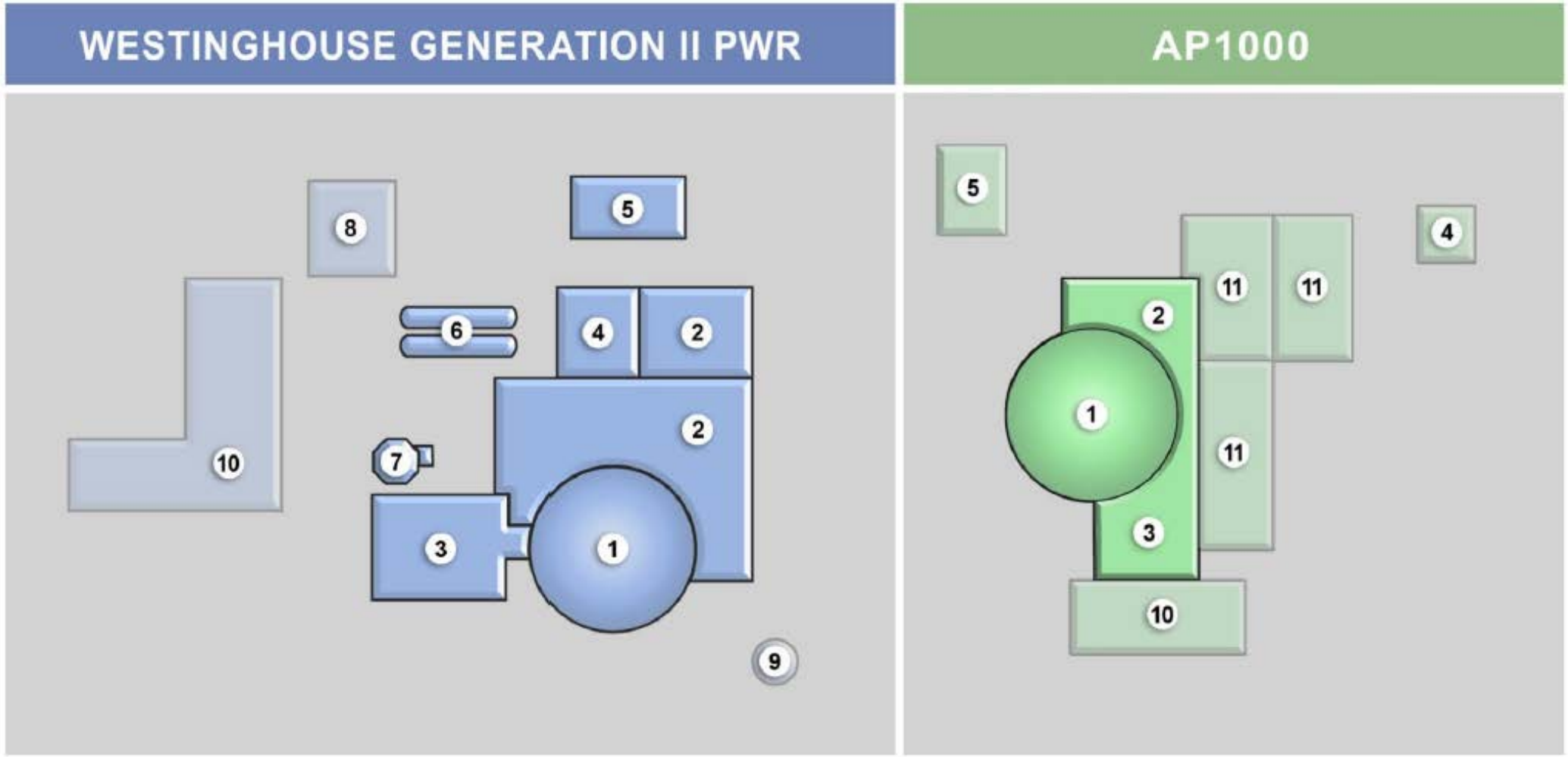
Comparación sistemas PWR y AP-1000



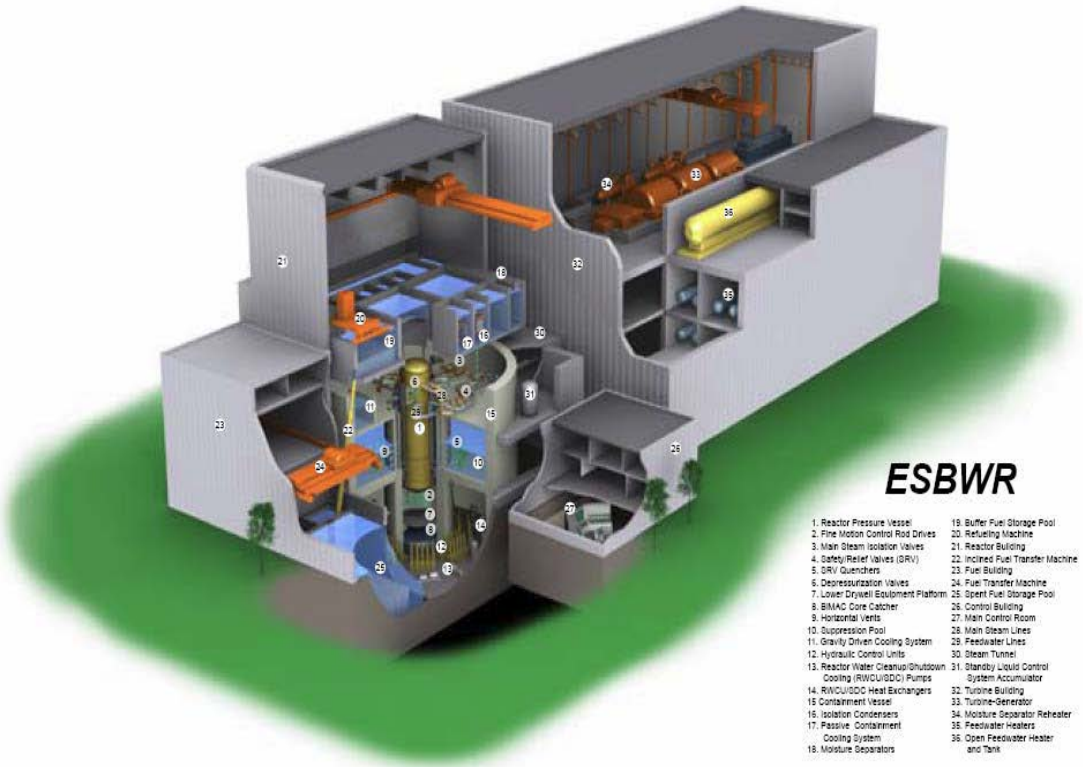


AP1000 Passive Containment Cooling System

Comparación planta PWR y AP-1000



ESBWR (General Electric)



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

Licenciamiento para:

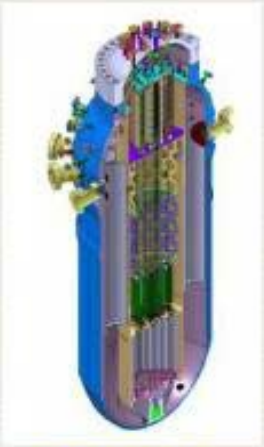
North Anna (EEUU)

Fermi (EEUU)

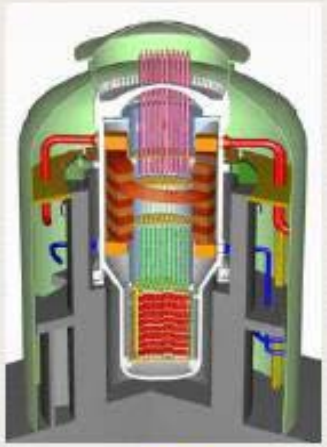
Generación III+: Seguros por diseño

- 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

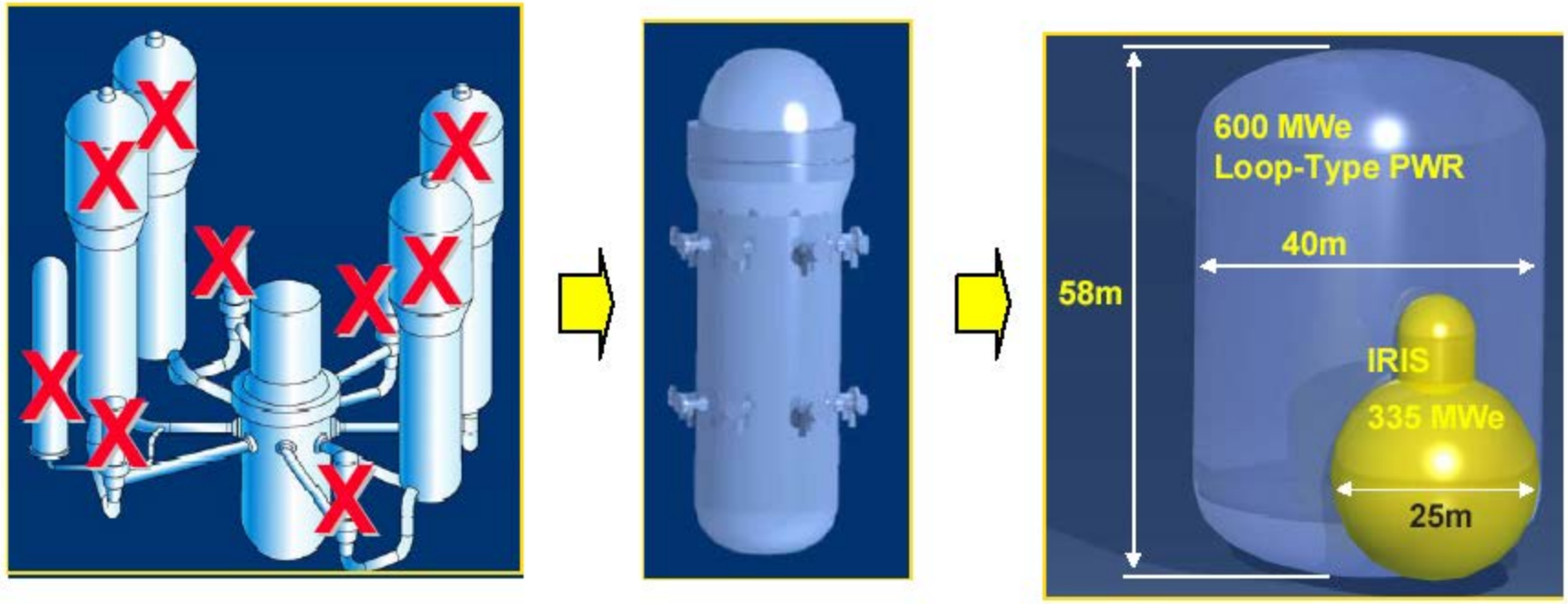
CNP-300
China, People Republic of

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

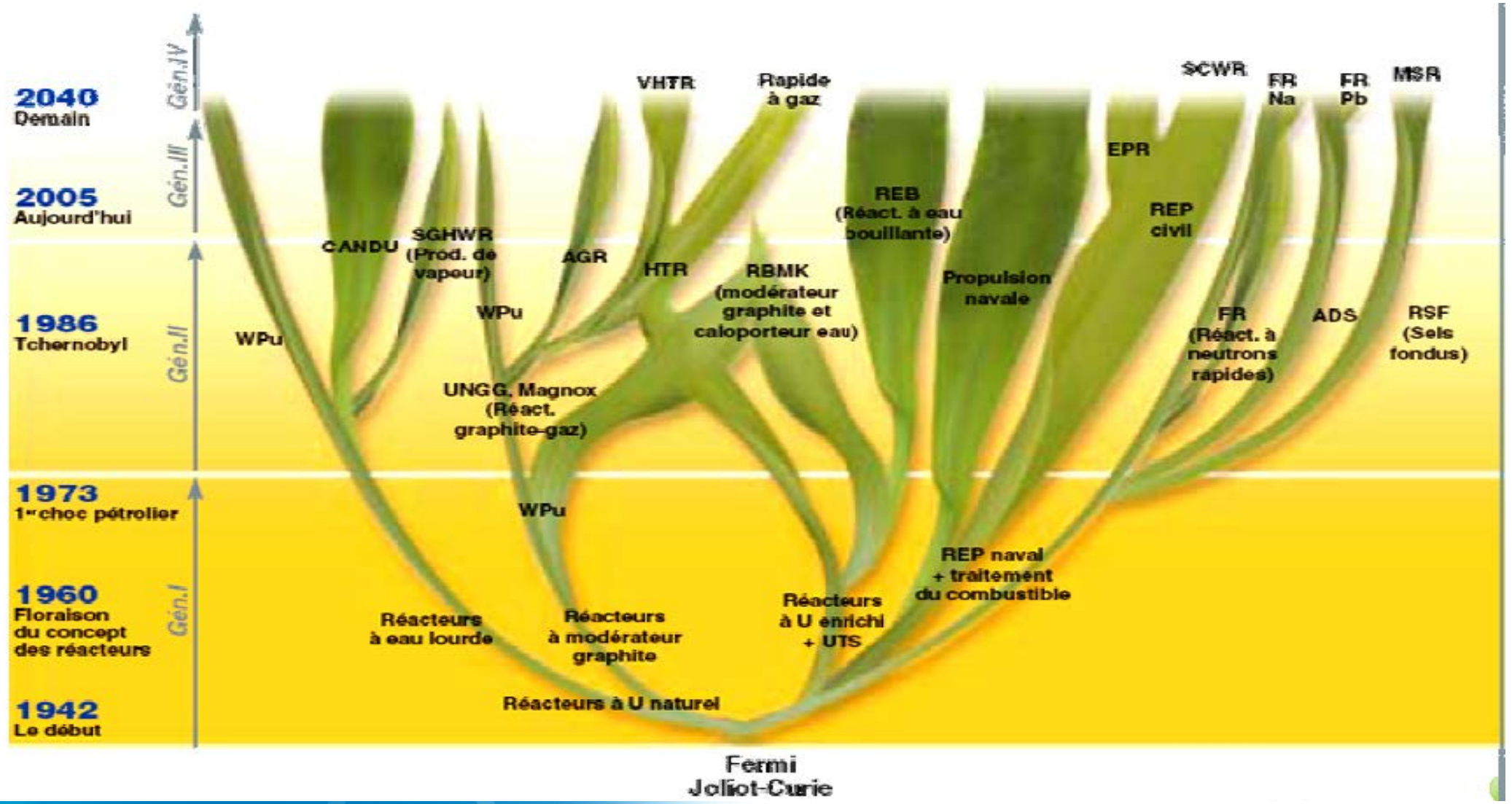
Comparación PWR y SMR (Westinghouse)



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 H_2, y agua desalada
- Combustible no-proliferante
- Disponibles en 2040

Generación IV: Evolución cronológica diseños



Reactores de Fusión

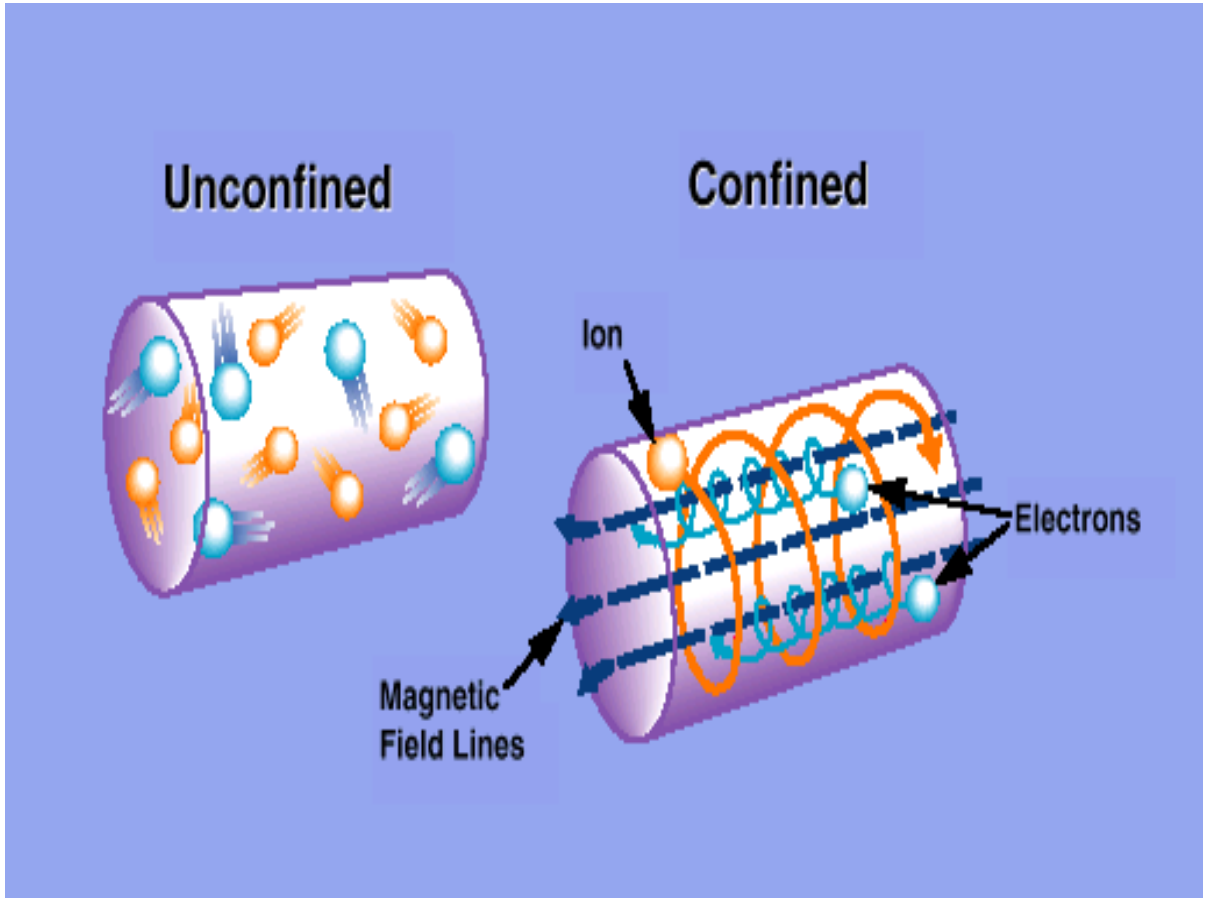
Fases del desarrollo: Científica (superada)
Tecnológica (actualmente)
Económica (futuro)

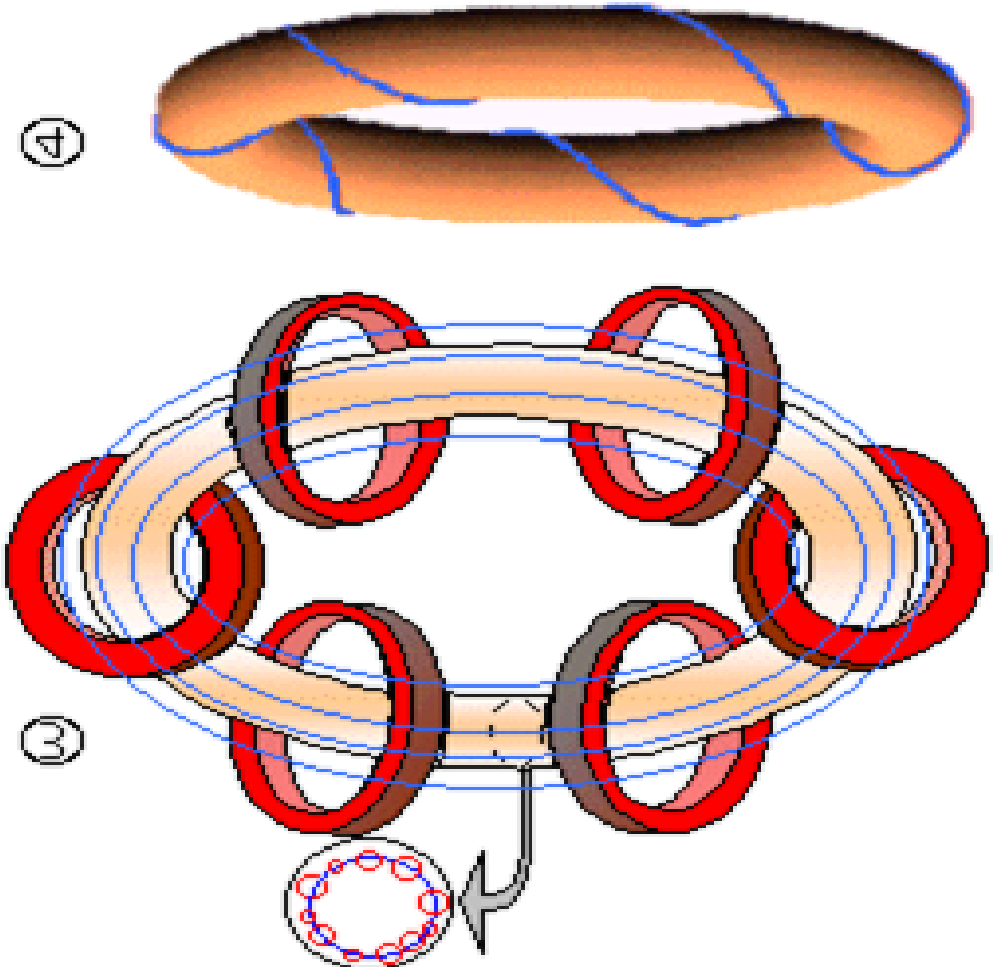
Breakeven Q=1: Energía consumida = Energía producida

- Confinamiento por campos Magnéticos (JET, ITER)
  JET Consiguió en 1991: Q=0,67 (Inglaterra)
  ITER Previsto en 2025: Q=10 (Europa en Francia)

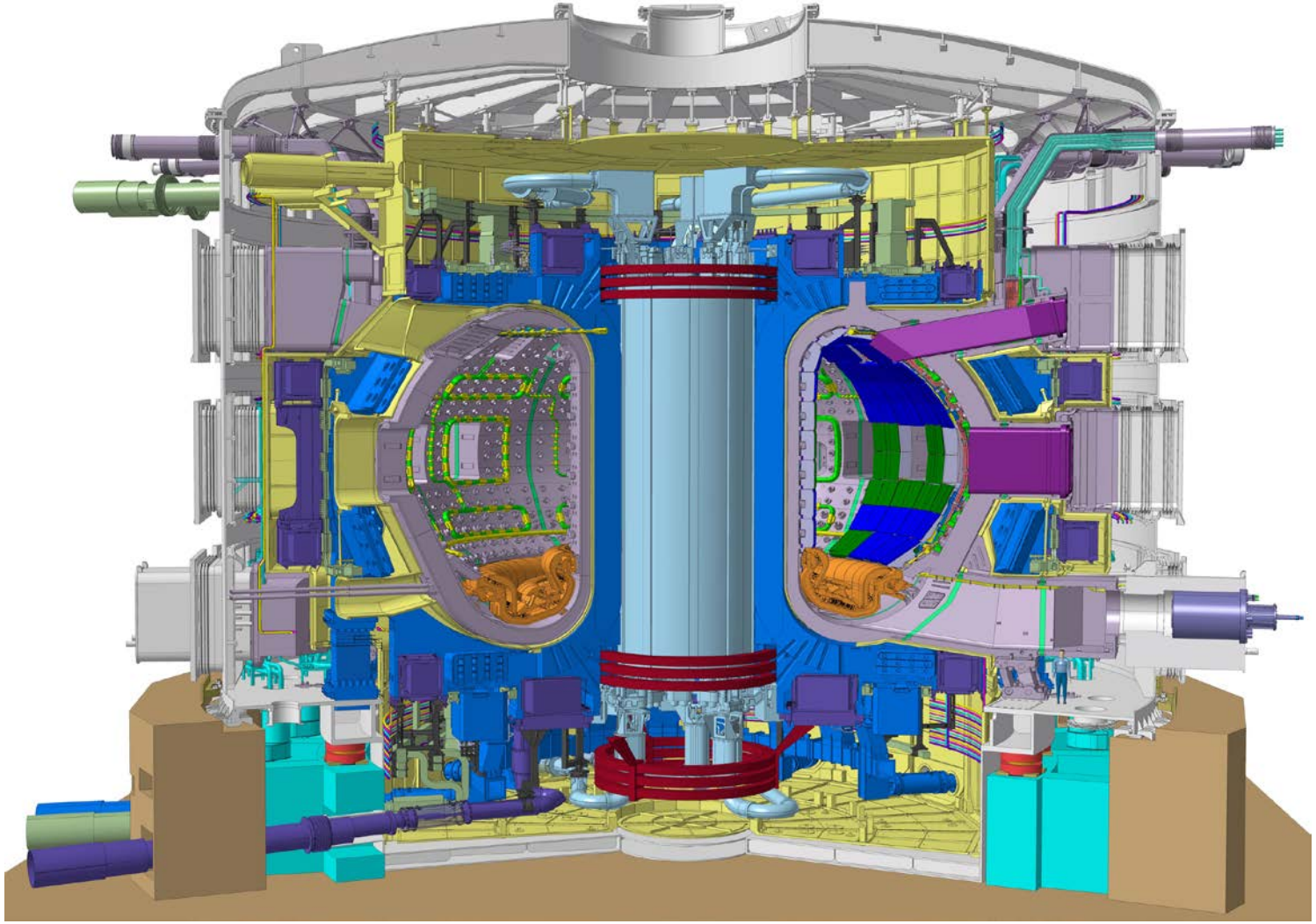
- Confinamiento inercial por laser (NIF, LMJ)
  NIF Consiguió en 2015: Q=1 (EEUU)
  LMJ arrancó en 2014 para pruebas de materiales

Planta de Fusión por Confinamiento magnético

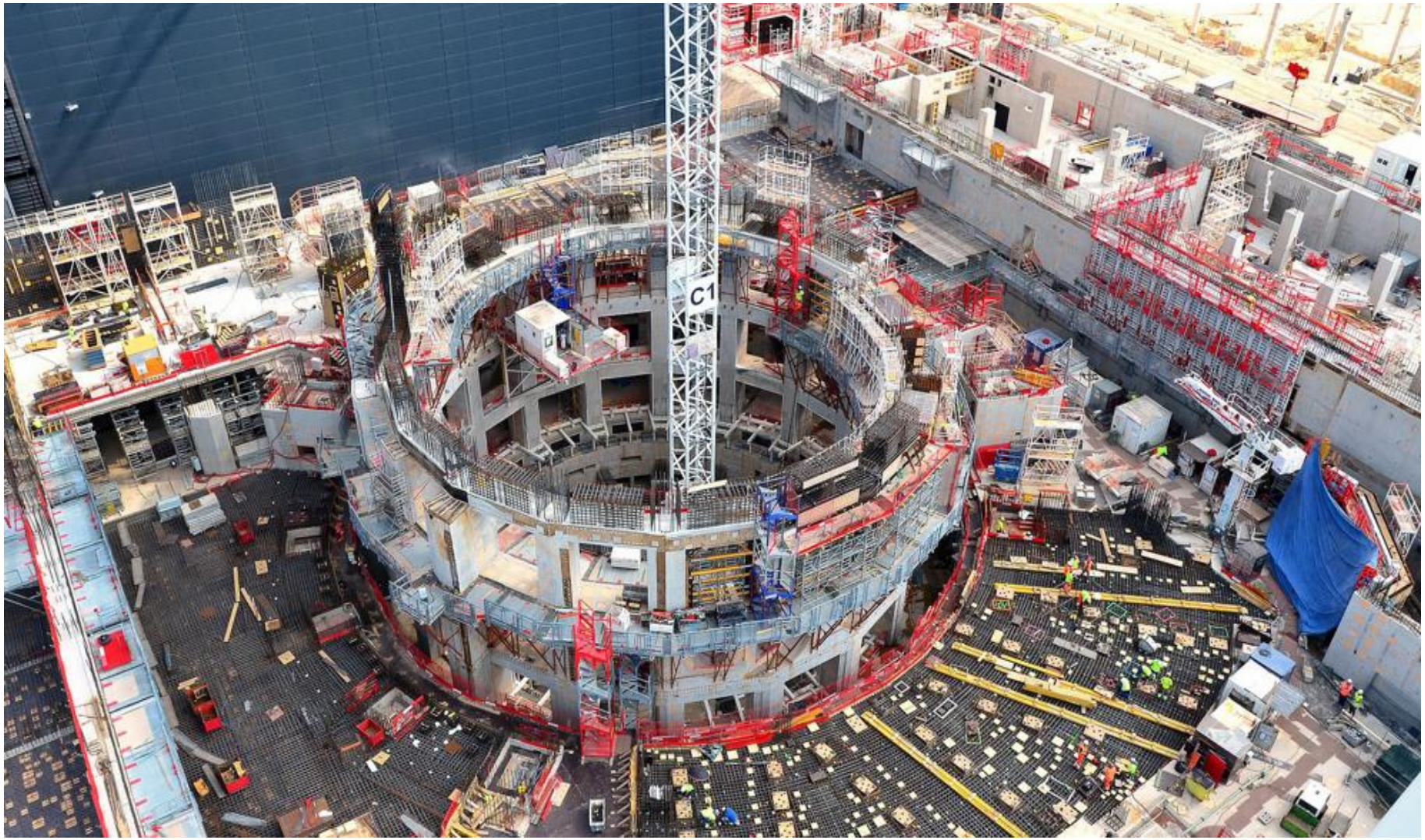




ITER: International Tokamak European Reactor



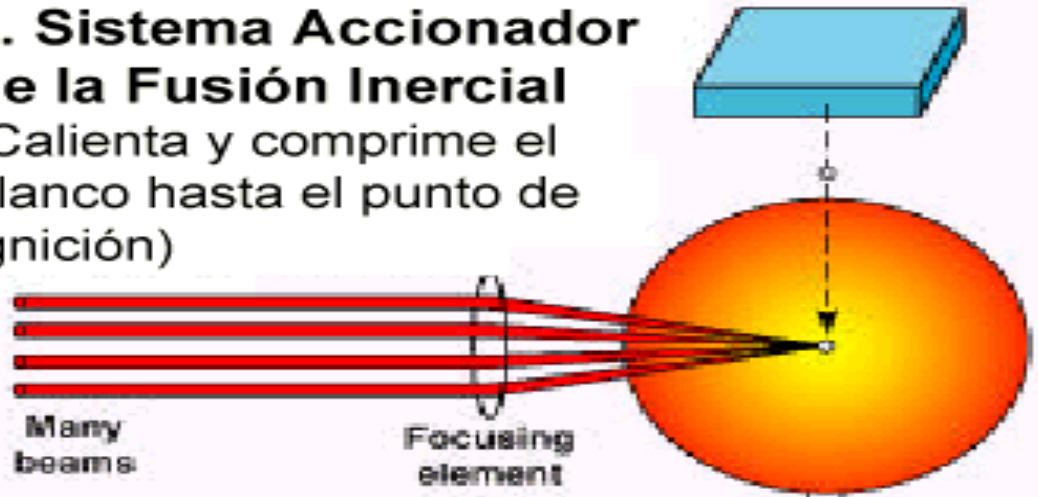
ITER Construcción (Francia)



Planta de Fusión por Confinamiento Inercial

1. Fábrica de Blancos

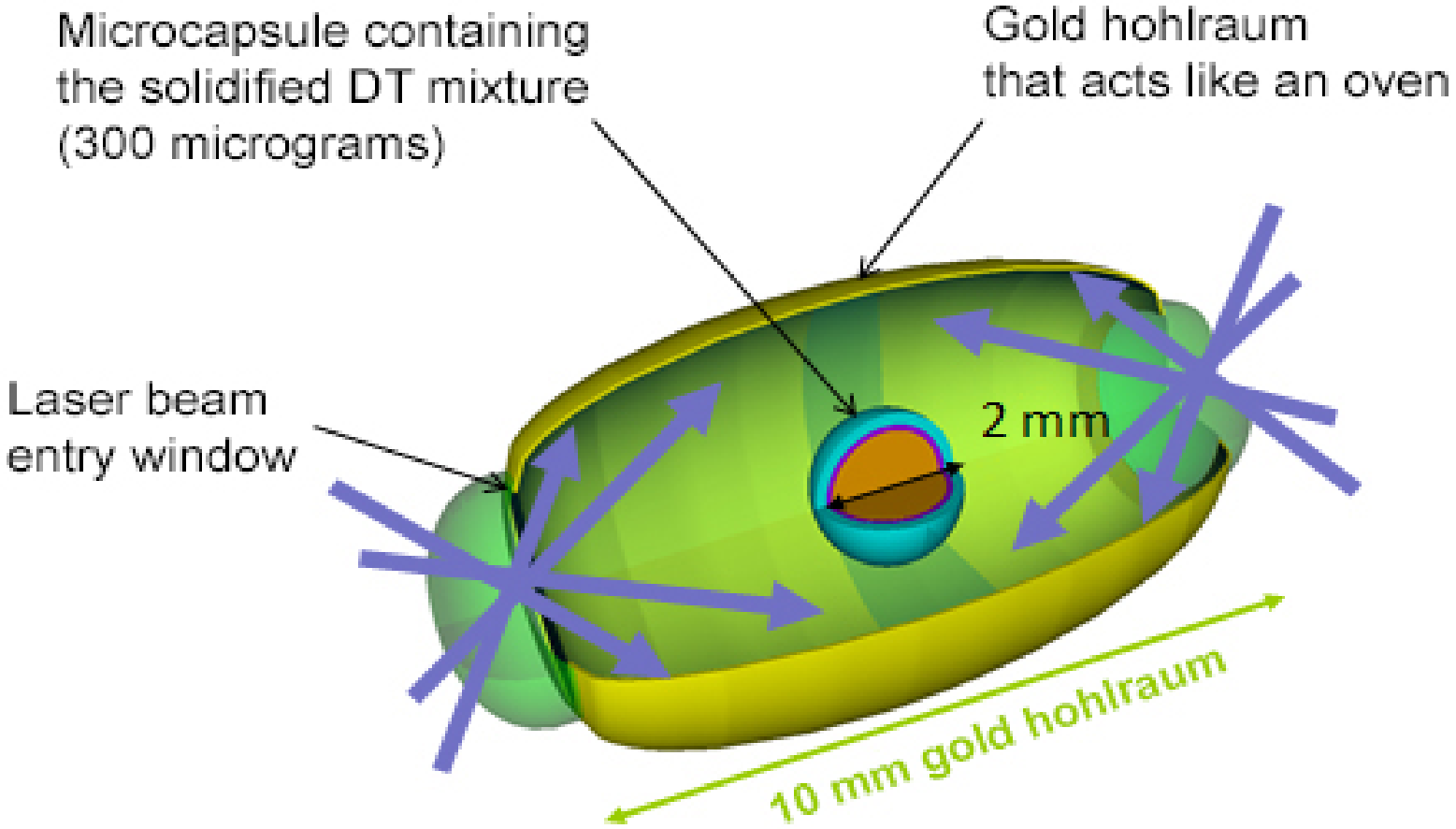
2. Sistema Accionador de la Fusión Inercial
(Calienta y comprime el blanco hasta el punto de ignición)



3. Cámara de Fusión
(Para recuperar la energía de fusión liberada de forma pulsada ~ 5 pastillas/sg)

4. Planta de Generación de Energía Eléctrica

Blanco de DT

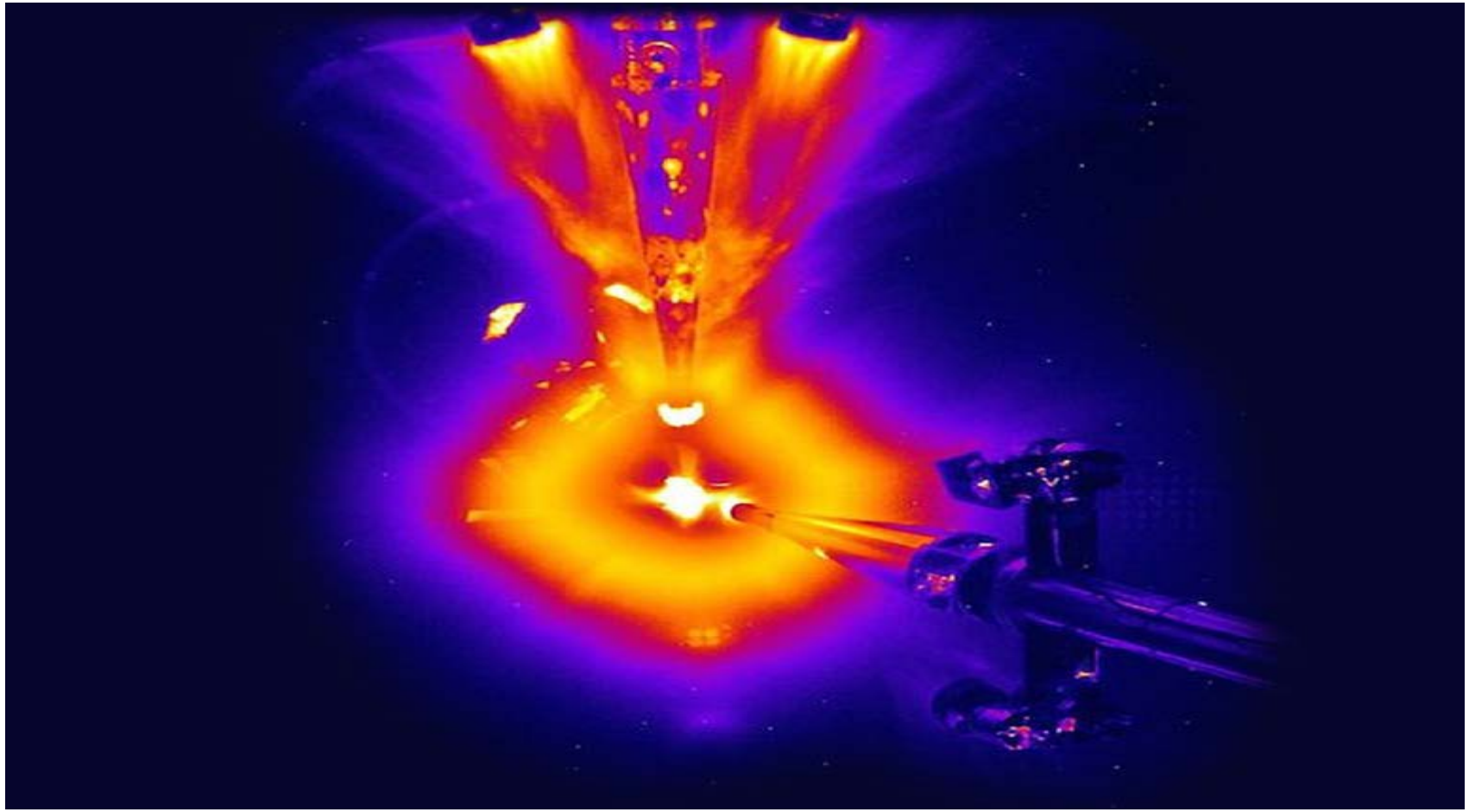

Microcapsule containing
the solidified DT mixture
(300 micrograms)
Gold hohlraum
that acts like an oven
Laser beam
entry window
2 mm
10 mm gold hohlraum

NIF: National Ignition Facility (EEUU)

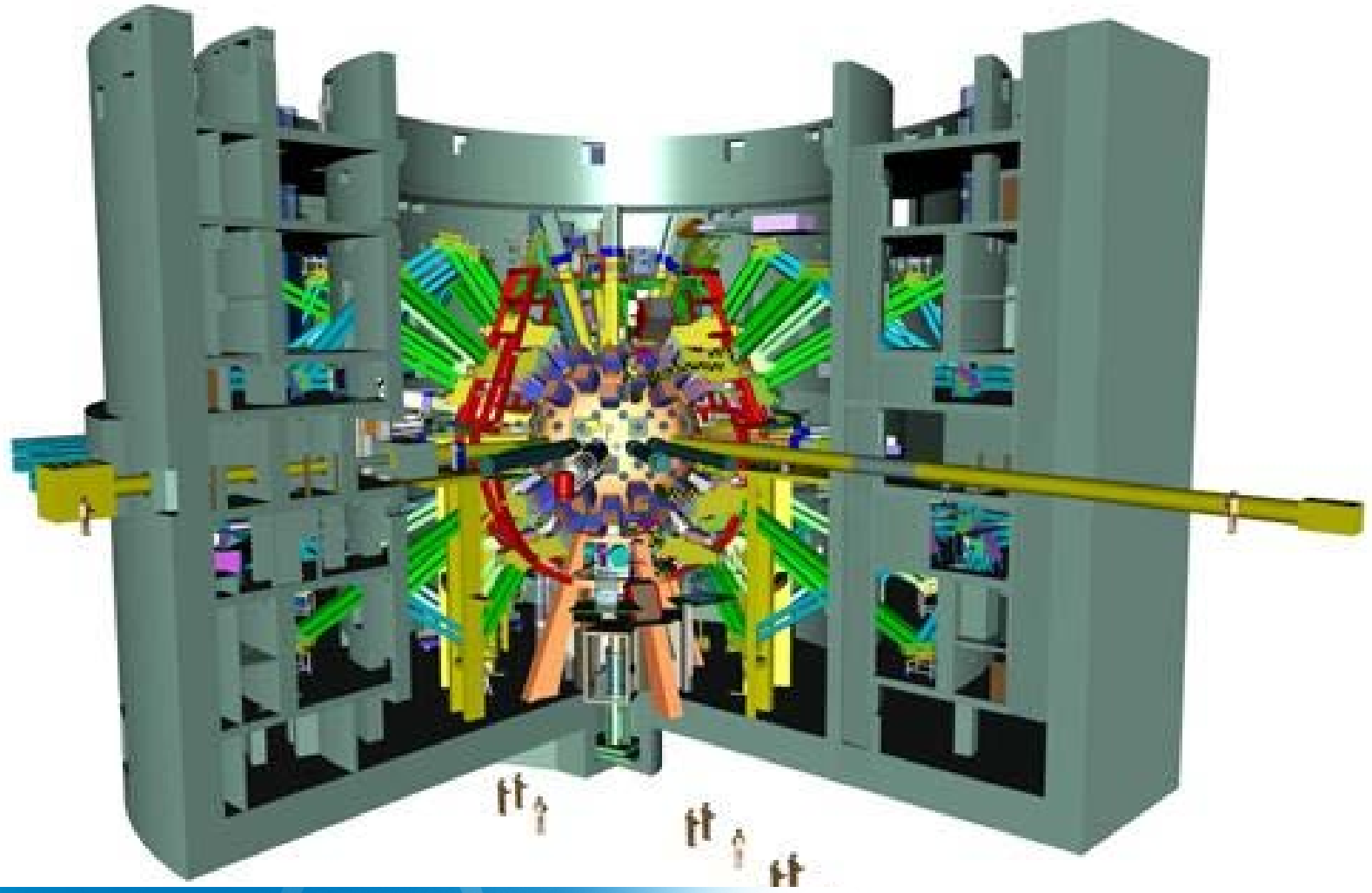
192 Haces de laser en blancos de $1mm^3$

NIF: disparo en pastilla

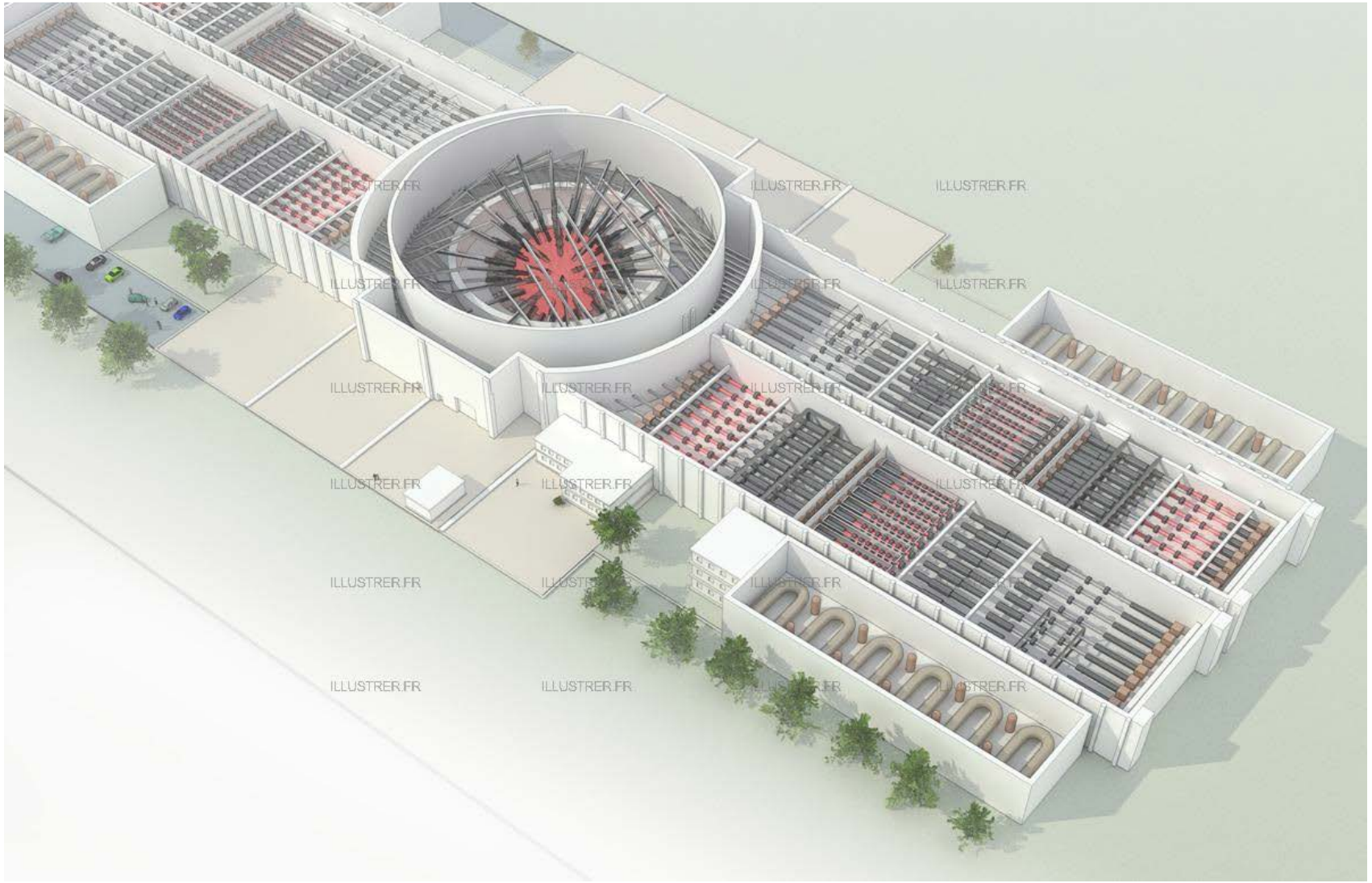
Ignición en 2012



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 desarrollando conceptos avanzados de reactores de fisión.
- También para producir H2, agua desalada, y propulsión naval
- 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.