

Reactores nucleares de fisión



Nuevas tecnologías



Ing. Ariel Joubanoba

Sumario

- Introducción
- Generaciones de reactores nucleares, breve historia
- Reactores de agua liviana (LWR)
- Programa INPRO de la IAEA
- Foro Internacional de IV Generación (GIF)
- Reactores de alta temperatura (HTR)
- Reactores de neutrones rápidos
- Otras iniciativas
- Reflexión final



Introducción

Introducción: energía nuclear

- Alta densidad de energía
- Proceso controlado por los neutrones diferidos
- Radioactividad de los productos de fisión
- Isótopos fisibles, fisionables y fértiles
- Criterios de criticalidad
- Ciclo de combustible
 - “Front end”
 - “Back end”

Introducción: principios de seguridad

- Dos riesgos principales:
 - Incremento de potencia no controlada
 - Pérdida de refrigerante
- Características de seguridad intrínsecas
- Protección y acciones
- Isótopos fisibles, fisionables y fértiles
- Mitigación de accidentes severos
- Otros riesgos (proliferación, terrorismo, terremotos)

Introducción: Factor de conversión

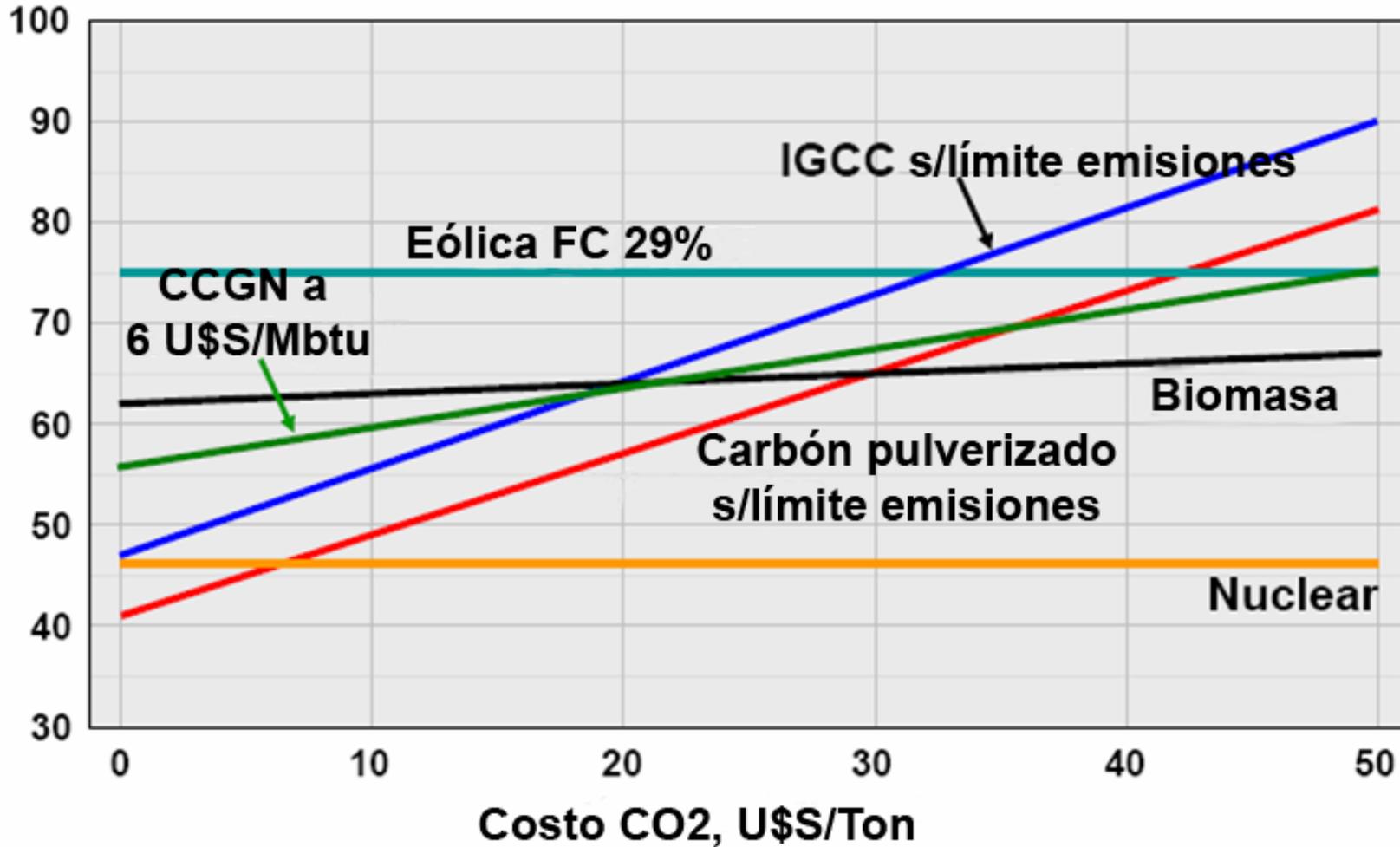
- $FC = \frac{\text{Núcleos fisibles producidos}}{\text{Núcleos fisibles consumidos}}$
- $FC \sim 0$: Reactor quemador
- $0,7 < FC < 1$: Reactor convertidor
- $FC > 1$: Reactor reproductor o incubador (breeder)

Introducción: economía – costos de capital

- Altos costos de inversión en capital
- Largos horizontes de planeamiento
- Bajos costos de combustible y medios de operación y mantenimiento
- Bajas emisiones de GEI
- Vida útil prolongada

Costo comparativo de las opciones de generación en el año 2010

Costo nivelado de la electricidad, U\$/MWh





Reactores de agua liviana (LWR)

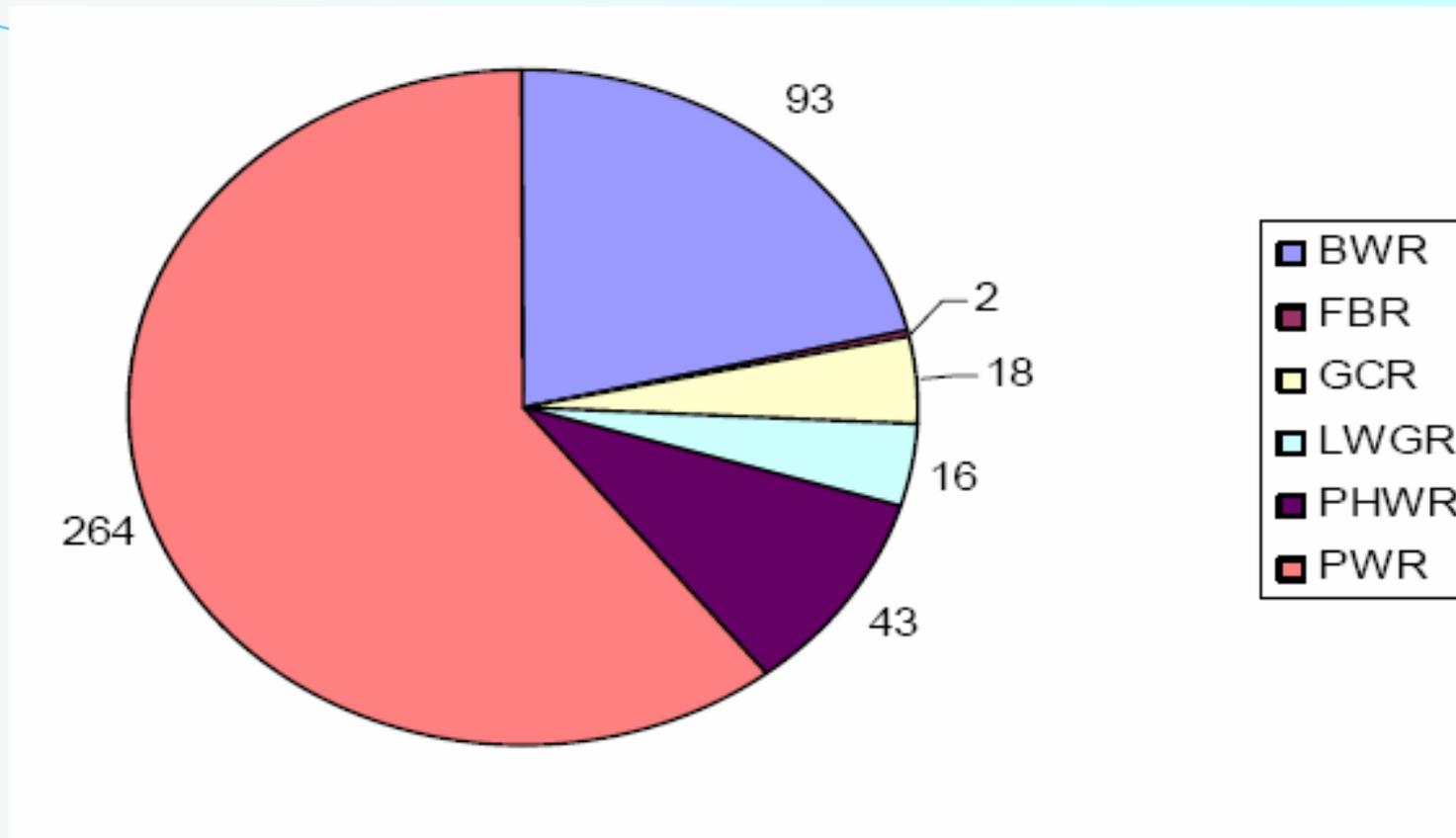
Reactores de agua liviana

Tecnología madura sobre la cual hay amplia experiencia.

- Una tecnología con dos diseños
 - Reactores de agua en ebullición (BWR).
 - Reactores de agua presurizada (PWR).
- Más de 15.000 años reactor de experiencia
- 350 reactores de potencia en 25 países
- Sólo un accidente severo (TMI) de consecuencias limitadas
- Posibilidad de extender la vida útil de las centrales
- Aumento de su factor de capacidad
- **Evolución** del diseño de Generación II a Generación III
- Dos limitaciones principales:
 - Temperatura $< 300^{\circ}$ C, lo que implica un bajo rendimiento del ciclo Rankine
 - Saldo neutrónico que lleva a bajas tasas de conversión

Reactores de potencia por tipo

Número de unidades



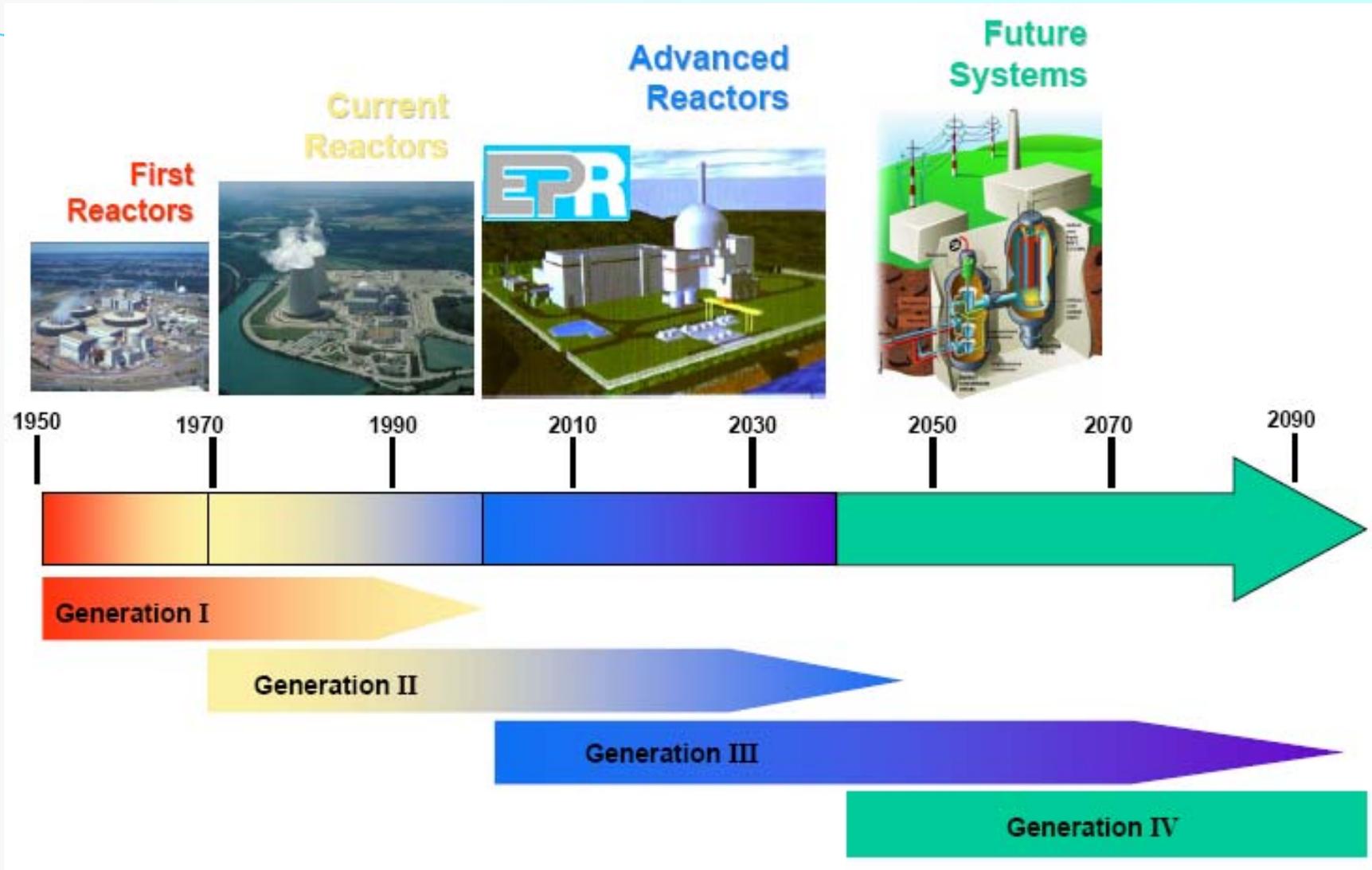
A mayo de 2009, hay 436 reactores nucleares con una capacidad de 372 GW
Se están construyendo 45 reactores con una capacidad total de 40 GW

Fuente: OIEA



**Generaciones de
reactores nucleares de
potencia**

Generaciones de reactores nucleares de potencia



Generación III: Reactores avanzados

Reactores nucleares a ser instalados en el corto plazo.

- El diseño de esta nueva generación tiene en cuenta la experiencia en la operación de los reactores de Gen. II y las lecciones de los accidentes tales como TMI
- Los reactores LWR son todavía dominantes
- El objetivo es mejorar la seguridad conservando la competitividad.
- Se han estudiado diferentes aproximaciones para la oferta comercial:
 - Reactores pequeños vs. grandes
 - Sistemas de seguridad pasivos vs. activos
- La mitigación de las consecuencias de accidentes severos, especialmente la falla del núcleo, es una de las características principales de los nuevos diseños.

Generación III: Ofertas industriales

Reactores avanzados de agua presurizada (Westinghouse, Areva)

- AP600, AP1000, APR1400, APWR+, EPR

Reactores avanzados de agua en ebullición (General Electric, Areva)

- ABWR II, ESBWR, HC-BWR, SWR-1000

Reactores avanzados de agua pesada

- ACR-1000 (Advanced CANDU Reactor 1000)

Reactores pequeños y medianos integrados

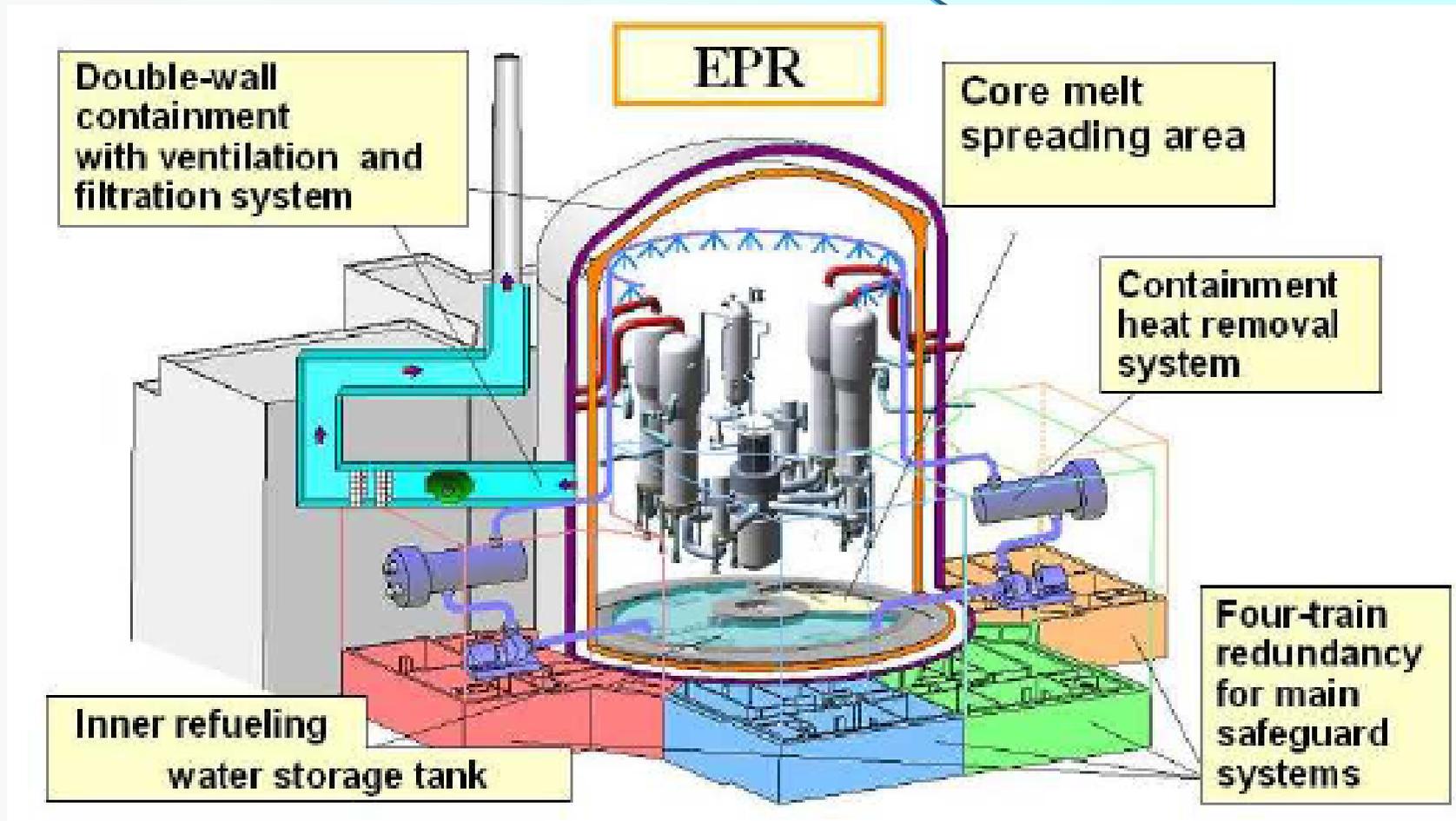
- CAREM, IMR, IRIS, SMART

Reactores de alta temperatura, refrigerados por gas, y modulares

- GT-MHR, PBMR

Generación III: Reactores de agua liviana

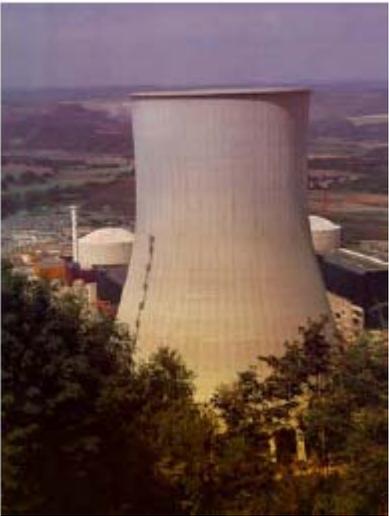
AREVA – NP: EPR



EPR: European (Evolutionary) Pressurized Water Reactor



N4



KONVOI

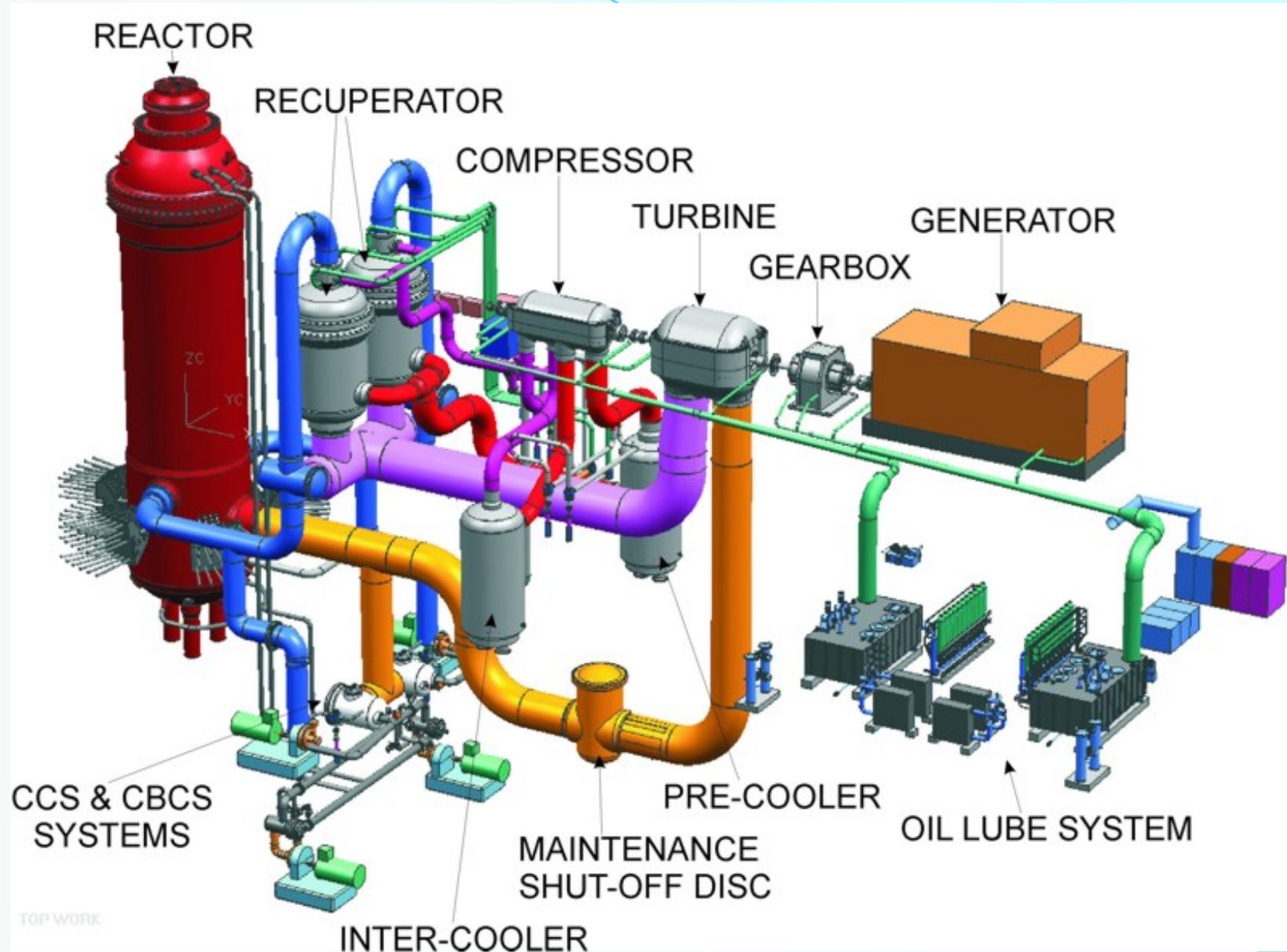


Desarrollo evolutivo

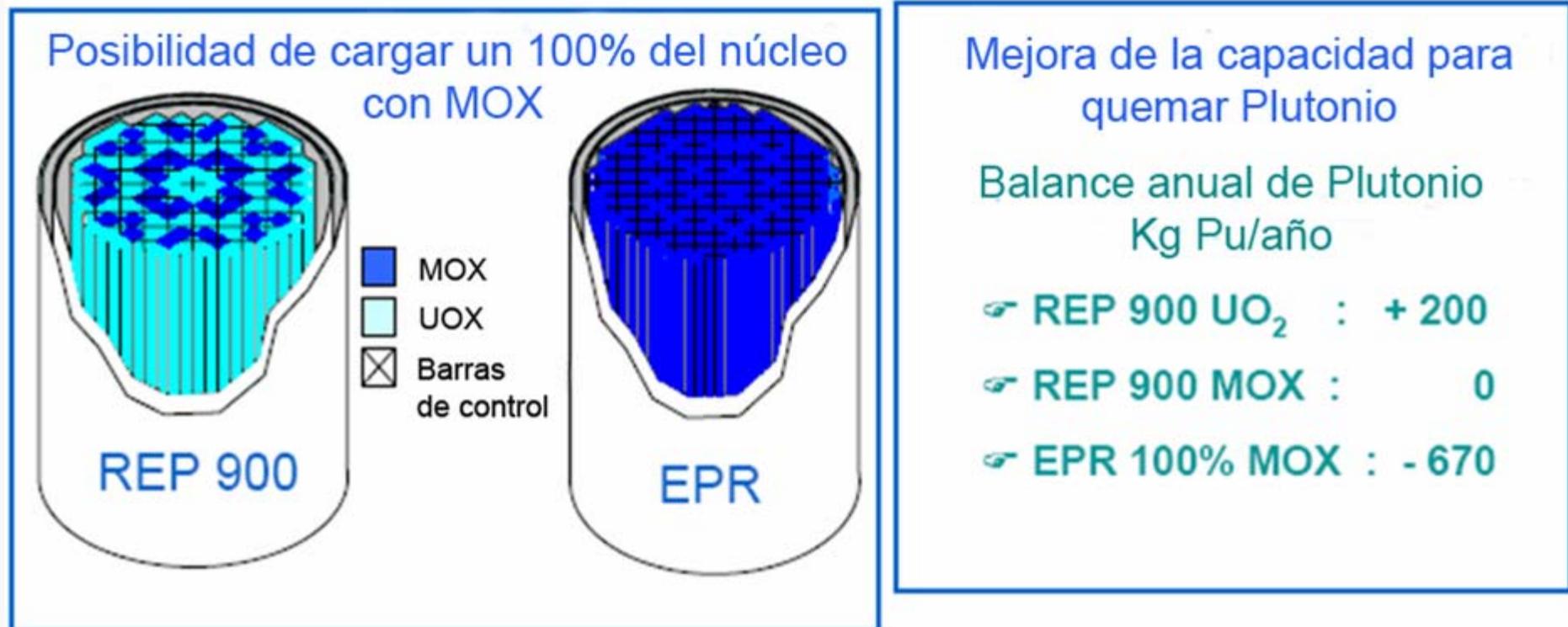


EPR: Vista de la construcción de Olkiluoto - 3, Finlandia, octubre de 2008

HTR: Pebble Bed Modular Reactor



LWR de Gen III: Back end del ciclo de combustible



- A nivel mundial, se producen alrededor de 100 T de Plutonio, disponibles en el combustible gastado de los reactores.
- Existe además el inventario de Plutonio de las armas nucleares.
- Hay 30 reactores en Europa que usan MOX, y 20 más están licenciados para usarlo.
- Todos los isótopos del Plutonio son fisibles o fértiles.

Generación III: Perspectivas de mercado

- Además del reemplazo de las plantas existentes cuando lleguen al fin de su vida útil, existen planes para nuevos reactores en muchos países (EE.UU., China, India, etc.)
- La capacidad de generación nuclear puede crecer de los 372 GWe en la actualidad a 1000~1500 GWe en 2050.
- La mayor parte de las nuevas plantas nucleares a instalar en los próximos 30 o 40 años serán de la Generación III.

LWR: desafío para otras tecnologías

- Desde el comienzo, se consideraron otras tecnologías para tratar de superar las dos mayores limitaciones de la tecnología LWR:
 - Rendimiento termodinámico limitado por la baja temperatura.
 - Quemado del uranio limitado por bajas tasas de conversión
- Dos caminos principales:
 - Reactores de alta temperatura
 - Reactores de neutrones rápidos
- Otras tecnologías en consideración:
 - Reactores de sales fundidas
 - Reactores de agua supercríticos

The image features a light blue gradient background. A dark blue, curved shape, resembling a stylized 'C' or a partial circle, is positioned on the right side, extending from the bottom towards the top. The word 'INPRO' is written in a bold, black, sans-serif font on the left side of the image.

INPRO

INPRO (OIEA)

- INPRO: Proyecto Internacional sobre Reactores Nucleares y Ciclos Nucleares Innovativos.
- Bases de INPRO: Resolución de la Conferencia General en Viena en setiembre del año 2000 y de la Asamblea General de la ONU del año 2001.
- Se estudiarán otras aplicaciones de la energía nuclear además de la generación de electricidad, en particular, la producción de hidrógeno, uso industrial y desalinización.
- La Resolución de la OIEA invita a todos los miembros a combinar los esfuerzos para considerar los temas de los ciclos de combustible y la tecnología nuclear innovativa y resistente a la proliferación.
- En la actualidad, 26 países miembros, entre los cuales tres sudamericanos: Argentina, Brasil y Chile.

Objetivos generales de INPRO

- Objetivos generales:
 - Colaborar para que la energía nuclear esté disponible para llenar las necesidades energéticas del siglo XXI de manera **sustentable**.
 - Unir a los poseedores de la tecnología y a sus usuarios para considerar en conjunto las acciones requeridas para alcanzar las innovaciones deseadas en los reactores nucleares y los ciclos de combustible.
- El horizonte de tiempo de INPRO es de 50 años hacia el futuro.

Pequeños y medianos reactores en estado avanzado de desarrollo

CAREM-25	27 MWe PWR	CNEA & INVAP, Argentina
KLT-40	35 MWe PWR	OKBM, Rusia
MRX	30-100 MWe PWR	JAERI, Japón
IRIS-50	50 MWe PWR	Westinghouse, EE.UU.
SMART	100 MWe PWR	KAERI, Corea del Sur
NP-300	100-300 MWe PWR	Technicatome (Areva), Francia
SBWR Modular	50 MWe BWR	GE & Purdue University, EE.UU.
PBMR	165 MWe HTGR	Eskom, Sudáfrica, y otros
GT-MHR	285 MWe HTGR	General Atomics (EE.UU.)
BREST	300 MWe LFR – 1200 MWe LFR	RDIFE (Rusia)
FUJI	100 MWe MSR	ITHMSO, Japón-Rusia-EE.UU.
Toshiba 4S	10 MWe SFR	Toshiba, Japón



Generación IV

Generación IV: Futuros sistemas nucleares

I&D en preparación para una gran expansión de la energía nuclear

- La prospectiva energética muestra la posibilidad de una demanda creciente de energía nuclear
- En esa hipótesis, la **sustentabilidad** se convierte en una preocupación predominante: la preservación de los recursos naturales, minimización de los residuos y resistencia a la proliferación son criterios tan importantes como la economía y la seguridad.
- Se consideran otras aplicaciones de la energía nuclear además de la generación de electricidad, tales como la producción de hidrógeno, uso industrial del calor residual o desalinización.
- El desarrollo de nuevos sistemas tomará tiempo y requerirá validación y demostración. Por lo tanto, el plazo para aplicaciones en escala industrial es a partir del año 2030.

Generación IV: Foro Internacional (GIF)

- Nuevos requerimientos para energía nuclear sustentable.

- Mejoras graduales en:

- ✓ **Competitividad**
- ✓ **Seguridad y confiabilidad**

- Nuevos conceptos en:

- ✓ **Minimización de residuos**
- ✓ **Preservación de recursos**
- ✓ **No proliferación**

- Los sistemas llegarán a su madurez en el 2030.

- Activos para nuevos mercados

- Producción de hidrógeno
- Uso del calor residual - Cogeneración
- Desalinización del agua de mar

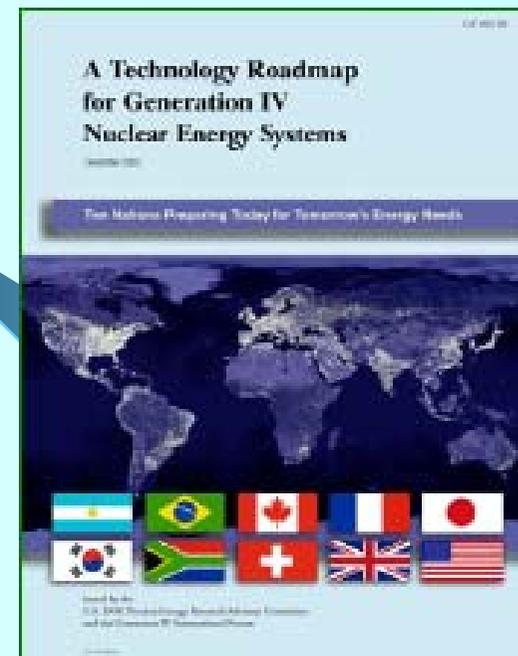
- I&D a través de la cooperación internacional

- Rusia y China ingresaron en el año 2006.



Programa tecnológico de GIF

- Publicado en Diciembre de 2002
- **6 sistemas como más prometedores:**
 - Reactores de neutrones térmicos:
 - Reactor de muy alta temperatura (VHTR)
 - Reactor de sales fundidas (MSR)
 - Reactores de neutrones rápidos:
 - Reactor rápido enfriado por sodio (SFR)
 - Reactor rápido enfriado por gas (GFR).
 - Reactor rápido enfriado por plomo (LFR).
 - Ambas posibilidades:
 - Reactor de agua supercrítica (SCWR)
- Descripción de la I&D requeridas.
- Identificó también 16 tecnologías a ser puestas en práctica en el corto plazo y sus sinergias de I&D.

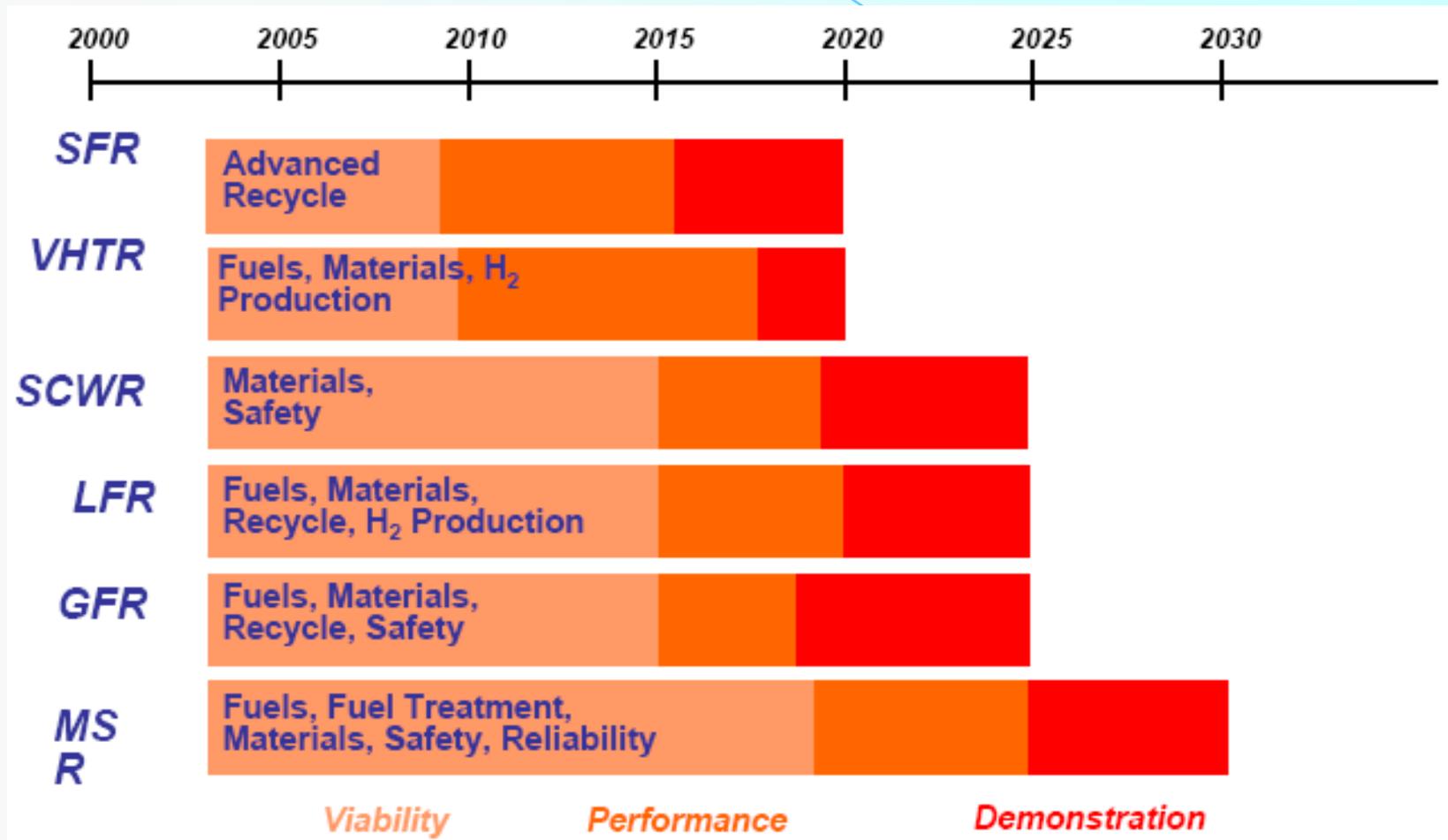


Membresía de GIF en sistemas

	VHTR	SFR	SCWR	GFR	LFR	MSR
Canadá	●		▲			
China	●	●				
Euratom	●	●	▲	●	▲	●
Francia	●	●	●	▲		●
Japón	▲	▲	●	●	●	
Corea del Sur	●	●				
Rusia		●				
Suiza	●			●		
EE.UU.	▲	▲				
Total	8	7	4	4	2	2

● Miembro ▲ Co - Presidencia

Gen IV: Plazos de desarrollo



Fuente: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF, diciembre 2002



Reactores de alta temperatura (HTR)

Reactores de alta temperatura

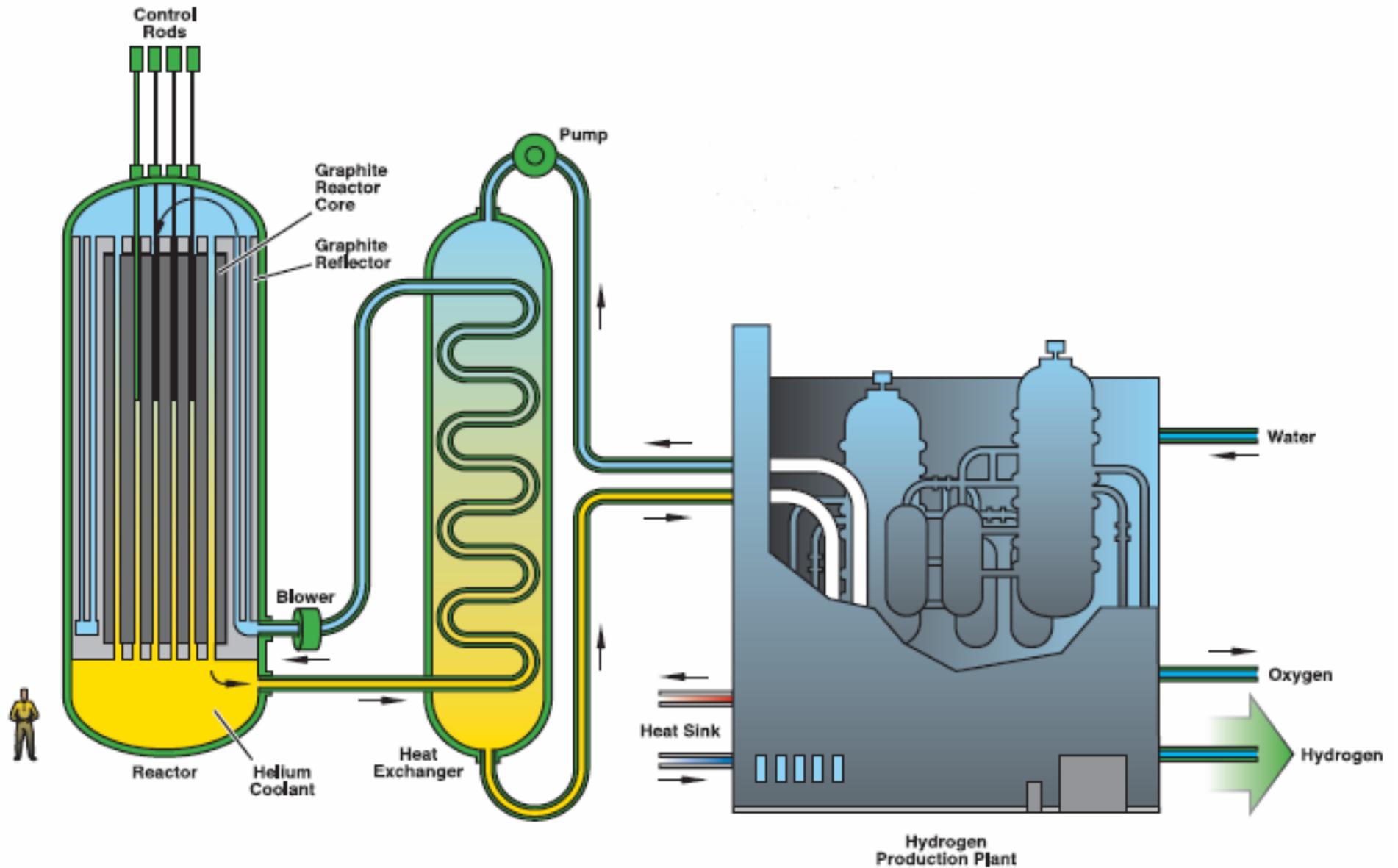
Un nuevo camino para la producción simultánea de hidrógeno y electricidad

- Uso directo de calor para aplicaciones industriales, incluyendo la producción de hidrógeno por ciclos termoquímicos (ciclo S-I), que requieren temperaturas en el rango de 800 a 1000°C.
- El enfriamiento por gas es la única solución y dentro de los gases el helio es la solución más práctica.
- Prototipos en los 70: Fort St. Vrain (EE.UU.), AVR, THTR (Alemania)
- Pequeños prototipos construidos en Asia: HTTR en Japón, HTR 10 en China.
- Nuevos proyectos en el marco de Gen III (PBMR, Sudáfrica) y en el marco de la Gen IV (NGNP, EE.UU.).

HTR: los desafíos

- **Combustible:** pequeñas partículas de uranio enriquecido (y eventualmente, junto con torio) con recubrimientos de carbono y SiC, embebidas en grafito. Dos opciones:
 - Compactas (FSV, GT-MHR)
 - Bolas (AVR, THTR, PBMR)
- **Materiales estructurales:** grafito es el material básico en el núcleo
- **Sistema de enfriamiento:** Loops de helio con conversión directa (ciclo de Brayton) o conversión indirecta con intercambiadores.
- **Potencia del reactor:** limitada por baja densidad de potencia y alta presión de gas; en el PBMR, además, por la reactividad del núcleo

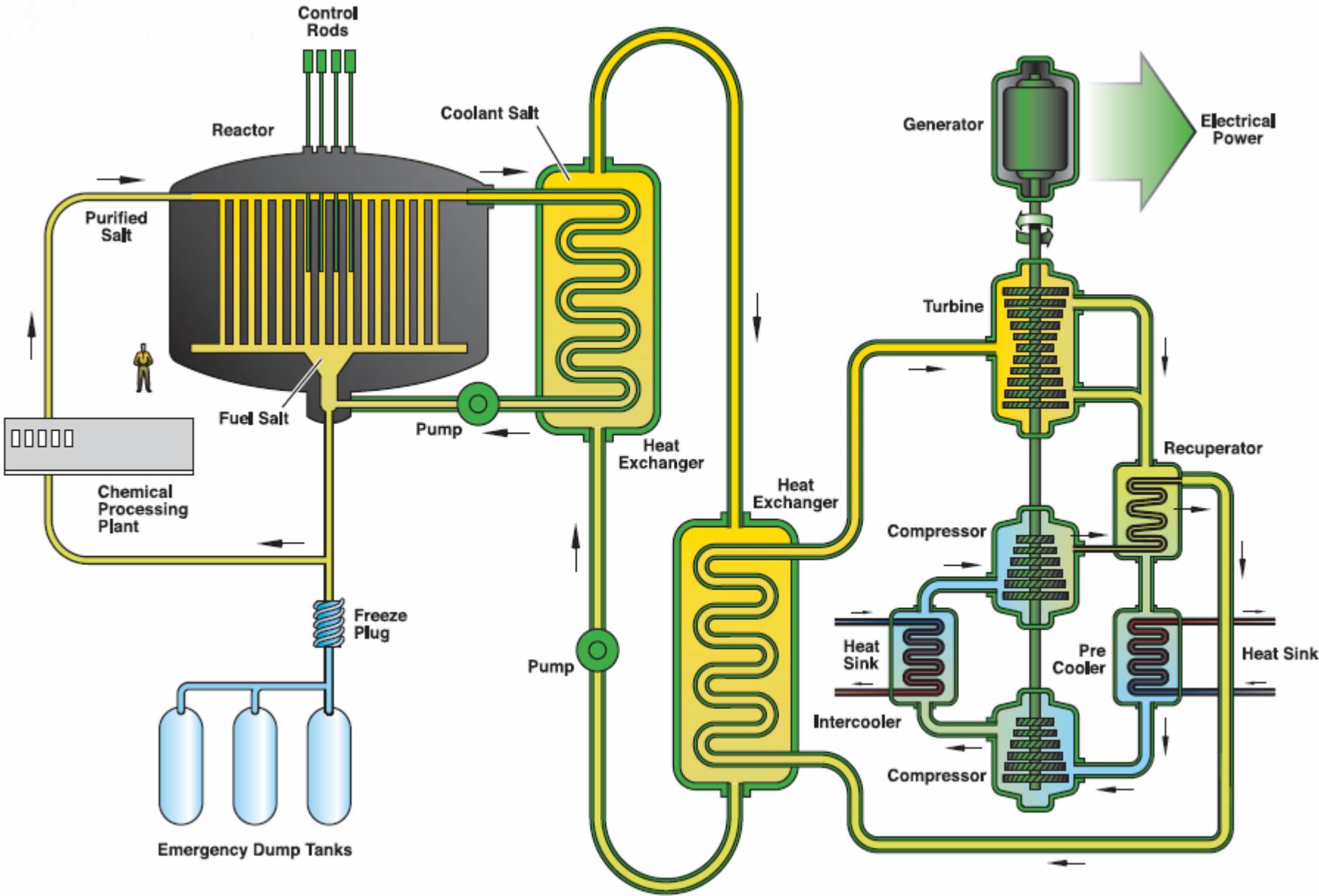
VHTR





Reactores térmicos de IV generación

MSR: reactor de sales fundidas

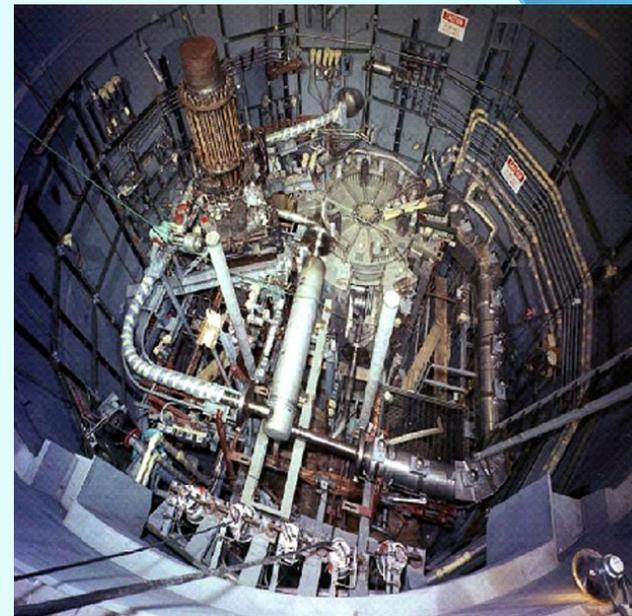


MSRE: Molten Salt Reactor Experiment (1964 – 1969)

- Se utilizó como combustible, entre otros, y por primera vez, ^{233}U procedente de la transmutación del torio en el propio reactor → reactor térmico reproductor.



Núcleo de grafito del MSRE



Vista superior de la sala del reactor

SCWR: enfriamiento por agua supercrítica

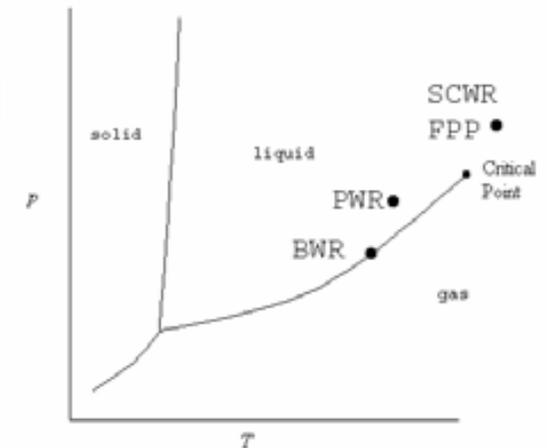
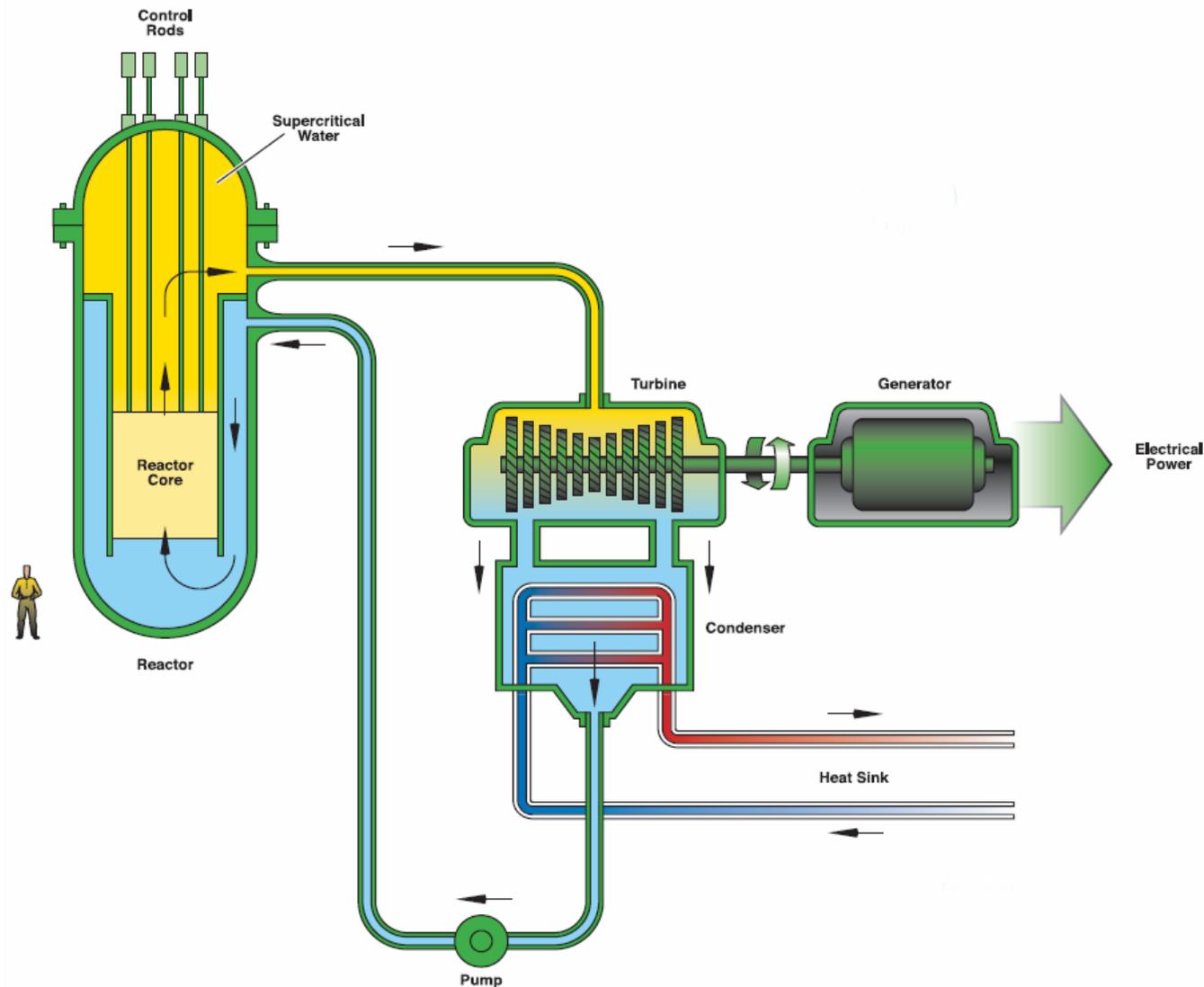


Diagrama de fases del agua

Punto crítico del agua:
- 374 °C
- 217,7 atmósferas

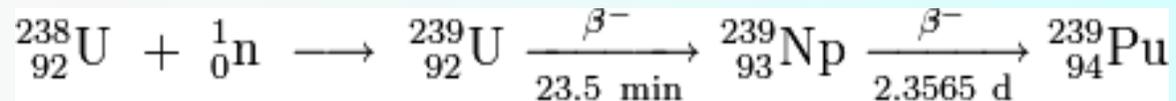


Reactores de neutrones rápidos

Reactores de neutrones rápidos

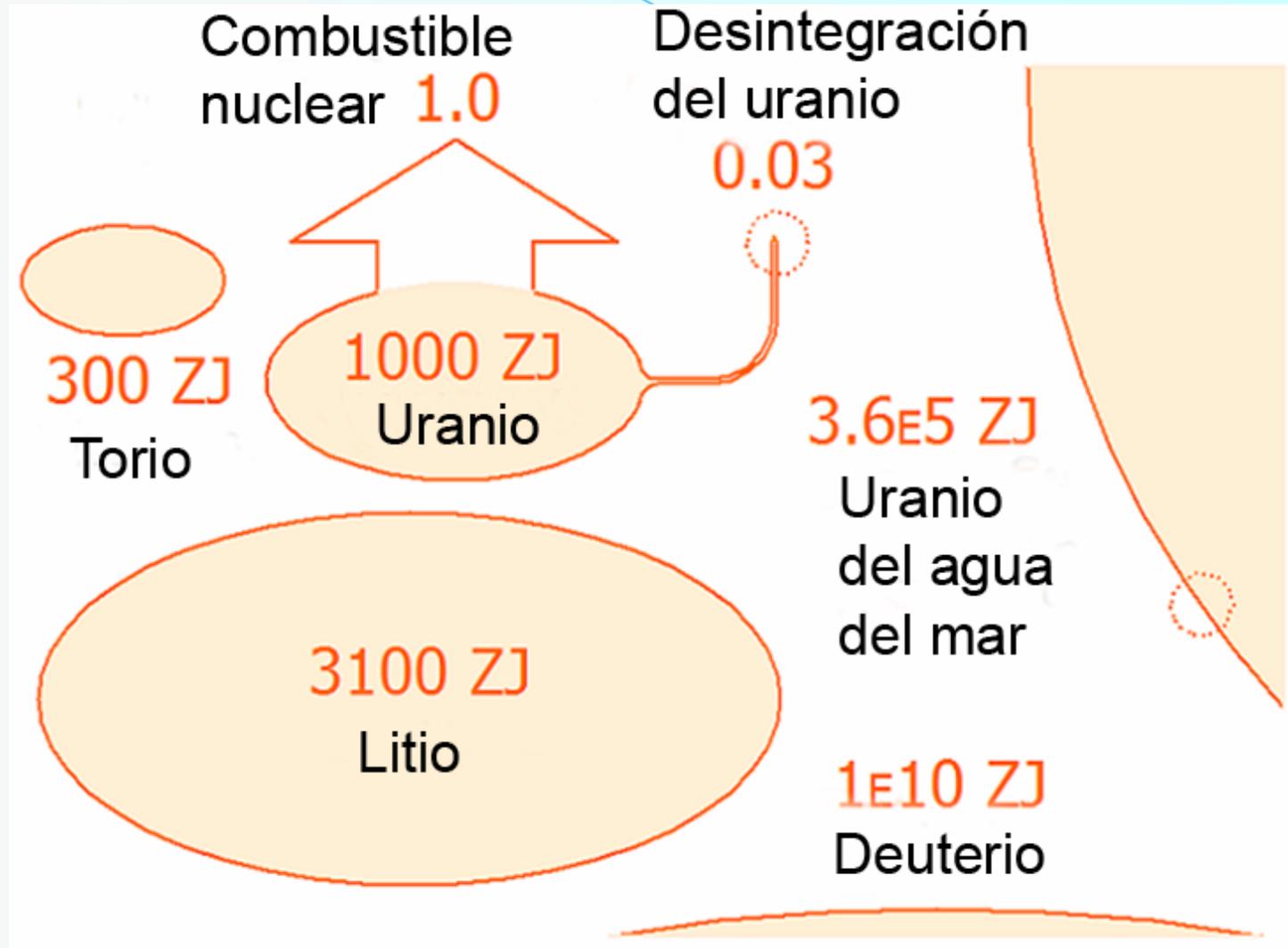
Solución para un uso óptimo de los recursos y minimización de los residuos

- Los neutrones rápidos permiten un quemado eficiente de los actínidos porque el cociente: sección eficaz de fisión/captura es mayor para el espectro de neutrones rápidos que para los neutrones térmicos.
- La primera consecuencia es la posibilidad de ganancias de conversión > 1 , que permiten utilizar todo el uranio a través de la conversión de ^{238}U en ^{239}Pu → **reactores reproductores** → aumento de hasta 100 veces el aprovechamiento del uranio extraído.



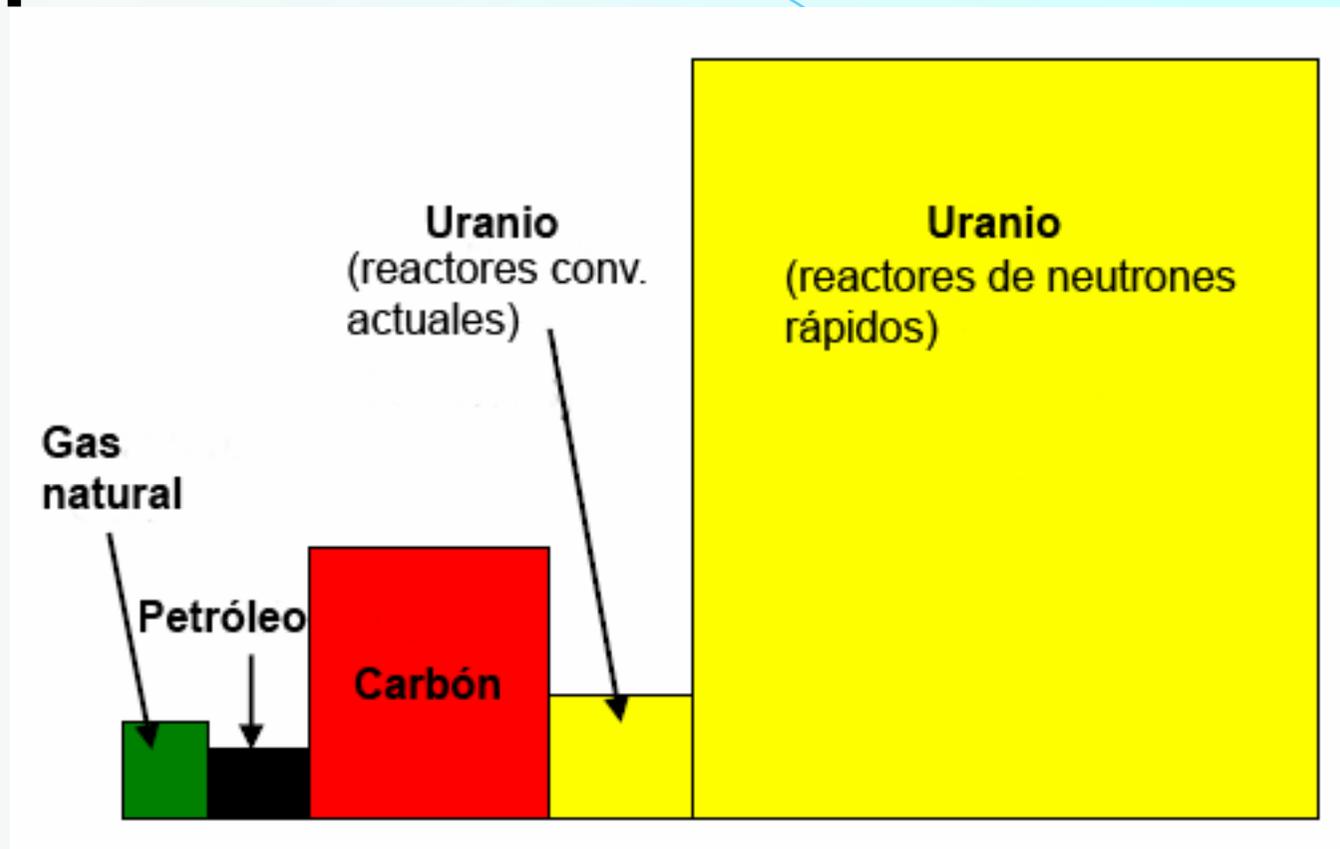
- Posibilidad de quemar todos los actínidos producidos en los propios reactores rápidos o en los LWR a través de un reciclaje continuo, **reduciendo de ese modo el potencial radioactivo de largo plazo de los residuos.**

Reservorios y flujos exergéticos



1 ZJ = 10^{21} J = $2,8 \cdot 10^5$ TWh

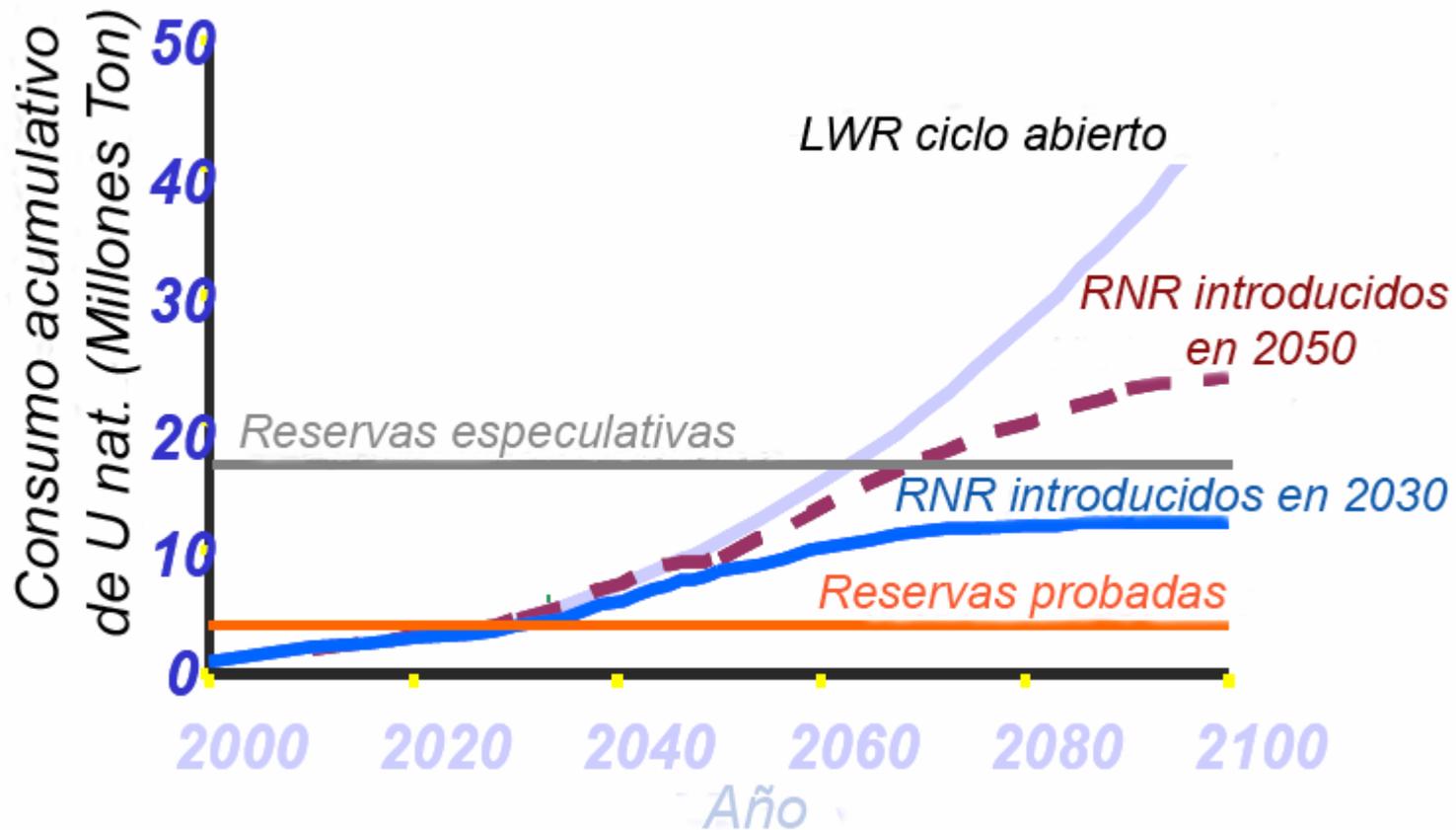
Reservas mundiales de uranio en comparación con las reservas fósiles



Fuente: "America the Powerless", Alan E. Waltar, Med. Phys. Publ., 1995

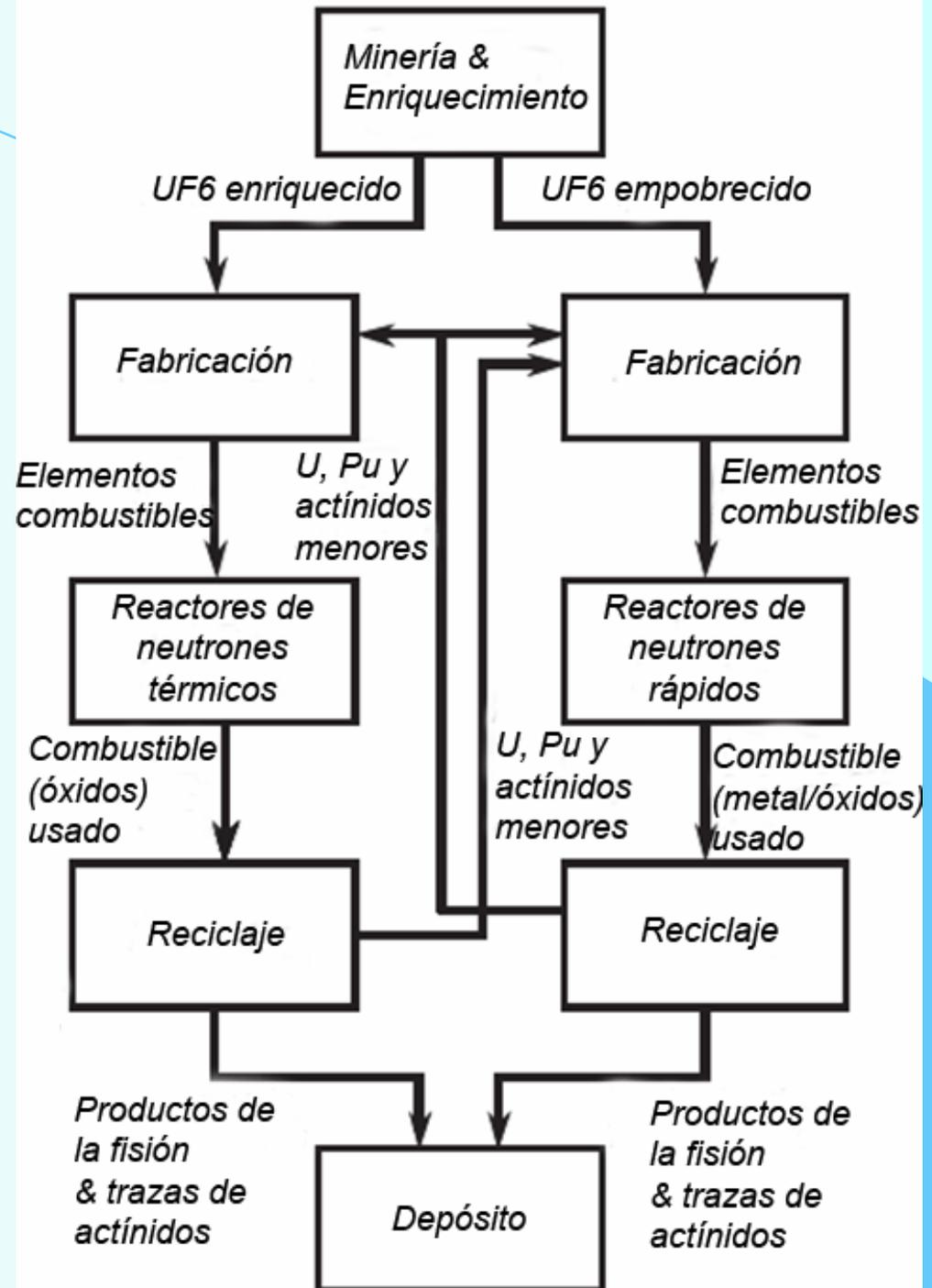
Nota: se considera sólo el uranio existente en la corteza terrestre

Reservas mundiales de uranio en comparación con las reservas fósiles

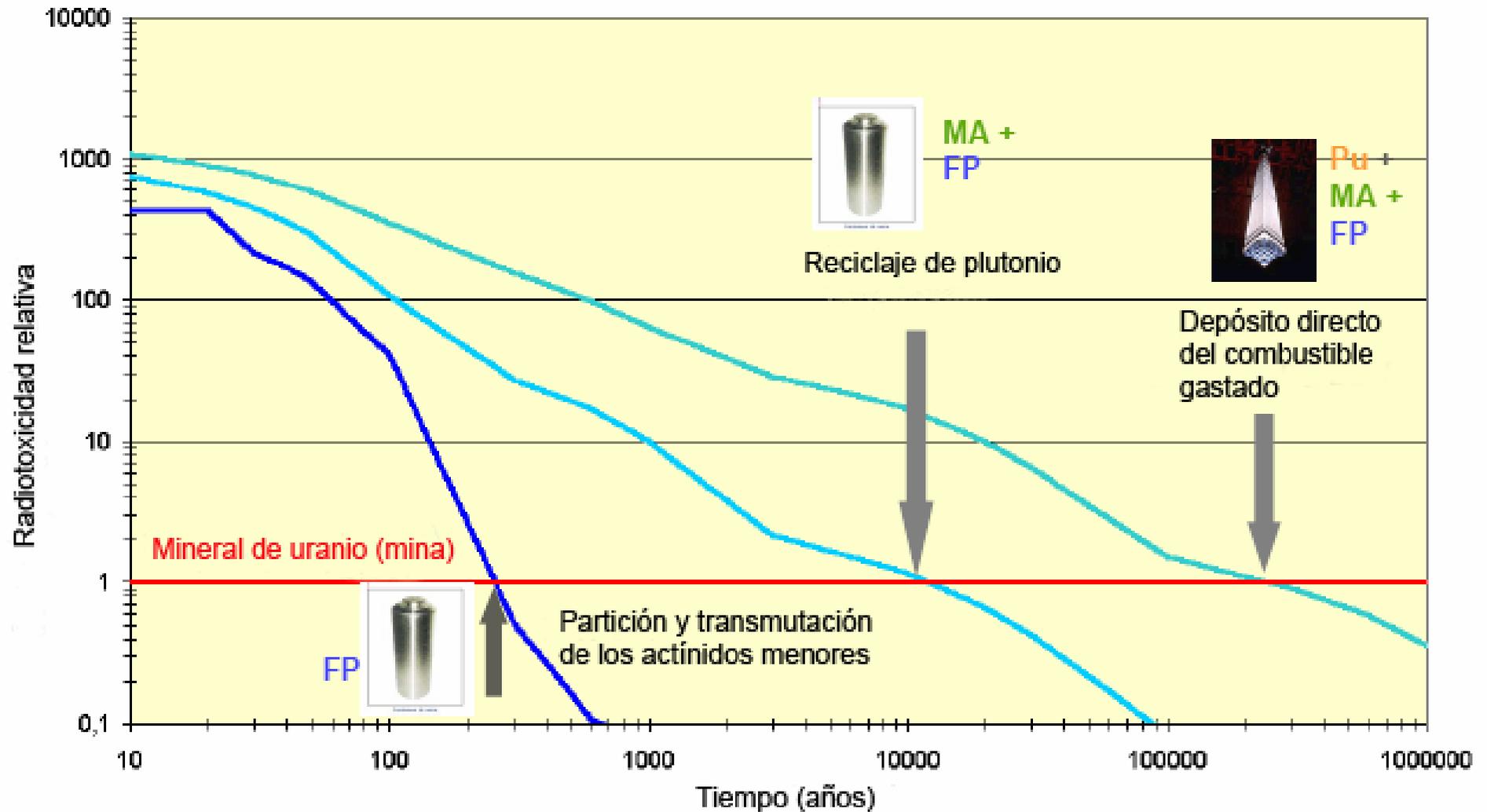


Fuente: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF, diciembre 2002

Ciclos simbióticos Reactores térmicos – Reactores de neutrones rápidos



RNR: Minimización de los residuos



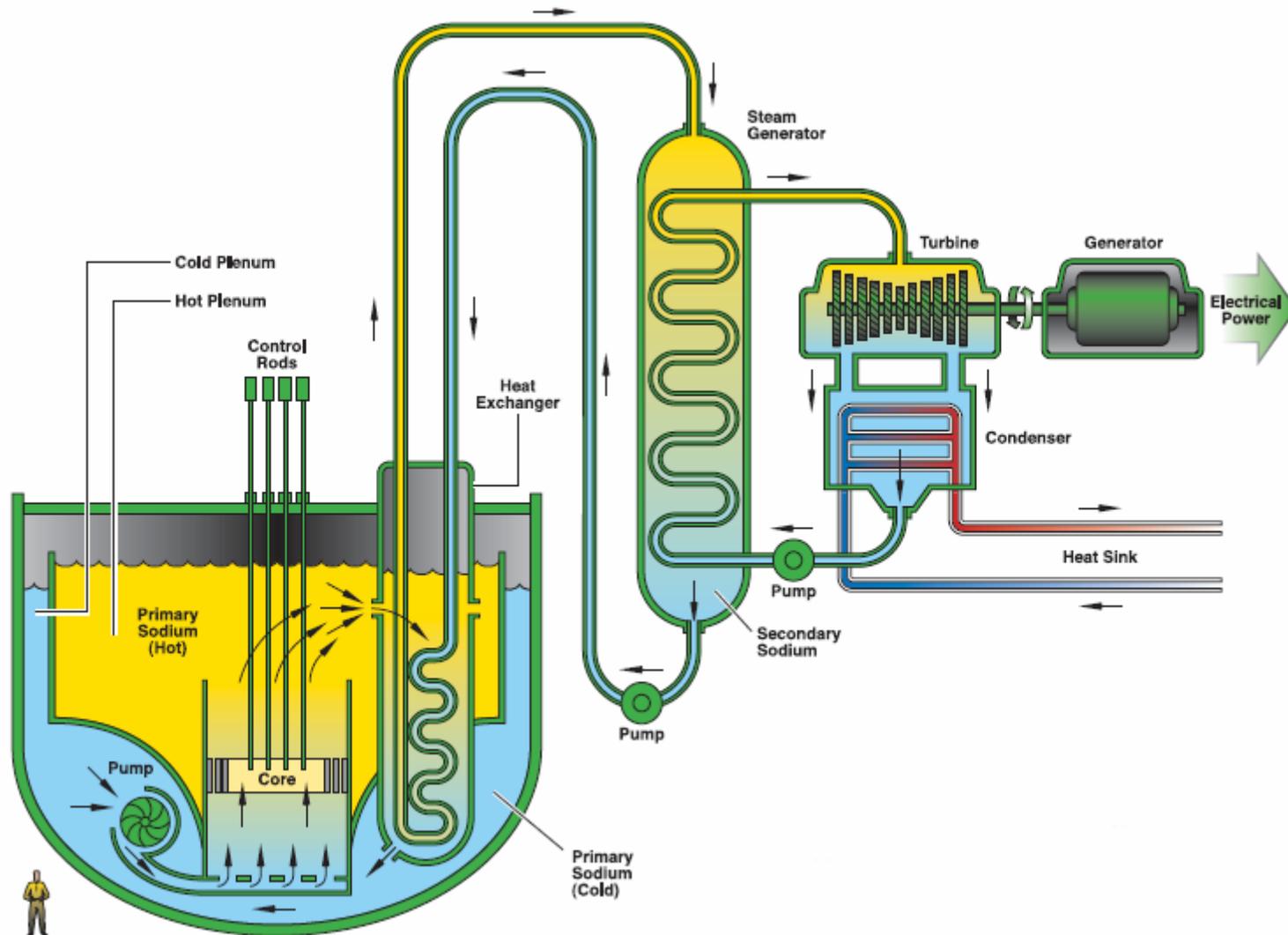
RNR: Tecnología

- Para mantener en funcionamiento un RNR, es necesario evitar en el núcleo los elementos de número atómico bajo, que actuarían como moderadores. **Se trata de reactores sin moderador.**
- Requieren el reprocesamiento del combustible gastado para extraer el plutonio (ciclo cerrado de combustible).
- Mantos fértiles de ^{238}U o ^{232}Th alrededor del núcleo \rightarrow ^{239}Pu o ^{233}U .
- Admiten múltiples reciclajes del plutonio, a diferencia de los LWR.
- Tienen una alta densidad de potencia; el combustible es MOX (~ 20% PuO_2 y 80% UO_2) o aleaciones metálicas de Pu-U-Zr.
- Las dos principales posibilidades para el enfriamiento son los metales líquidos o los gases.
- Se han construido prototipos industriales enfriados con sodio (BN600 en Rusia, Superphénix en Francia, Monju en Japón, Fermi - I en los EE.UU.).
- Rusia ha usado el enfriamiento por plomo para sus reactores navales.
- El helio, ya usado en los reactores HTGR, ha sido considerado, así como el agua supercrítica.

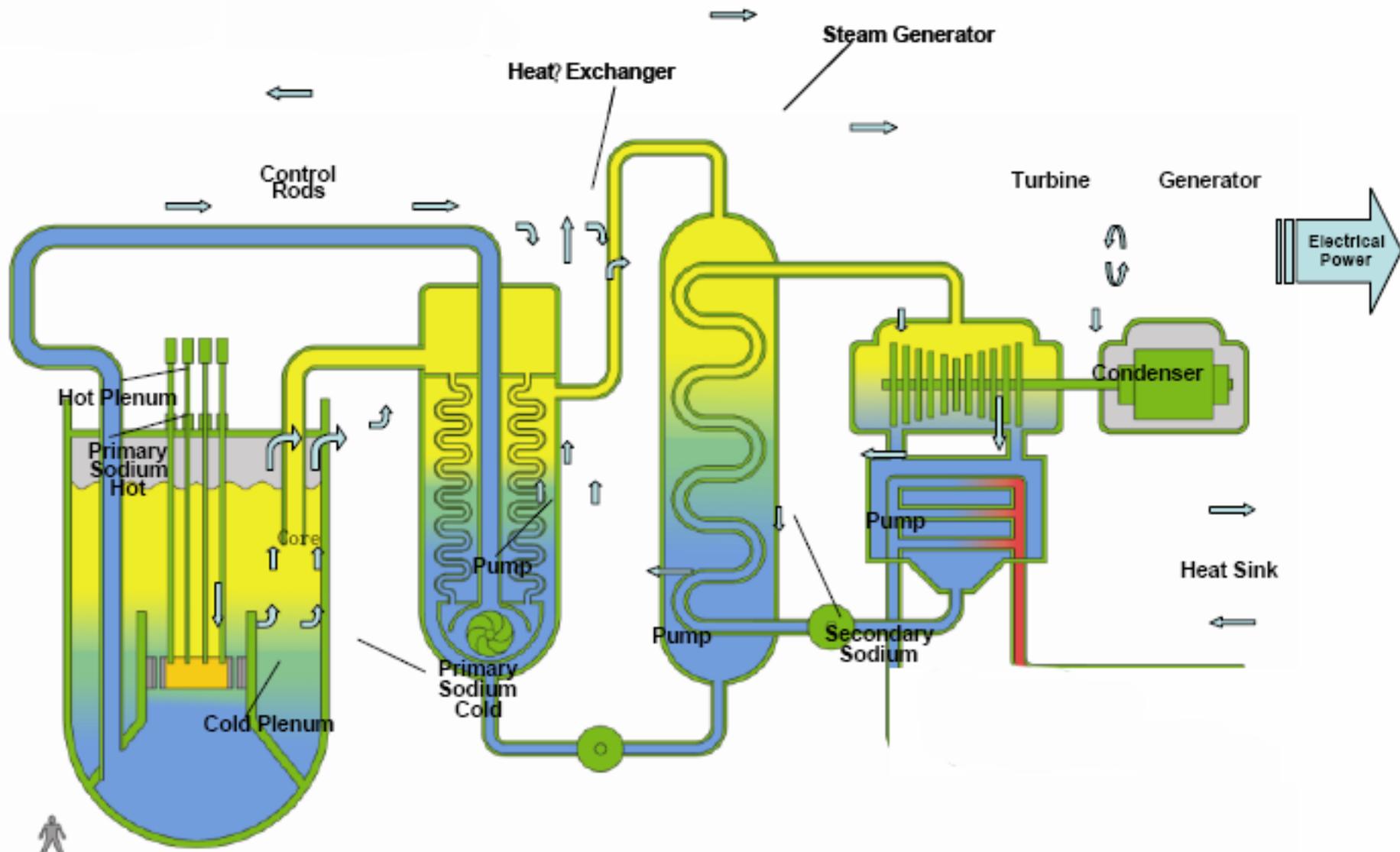
RNR: Tecnología del sodio

- El sodio es un muy buen refrigerante:
 - Líquido entre 90 a 890 °C
 - Mono isotópico (^{23}Na)
 - Buenos parámetros termodinámicos
 - No corrosivo cuando está purificado
- Amplia experiencia industrial.
- El refrigerante del núcleo no está presurizado
- Desventajas conocidas:
 - Reactividad química (incendios debidos al sodio y reacciones sodio-agua)
 - Dificultades para el manipuleo e inspección.
 - Mantenimiento del sodio a temperatura $>90^{\circ}\text{C}$
 - Activación del sodio en el circuito primario

SFR: Reactor rápido enfriado por sodio (diseño de piscina)



SFR: Reactor rápido enfriado por sodio (diseño de loop)



RNR construidos

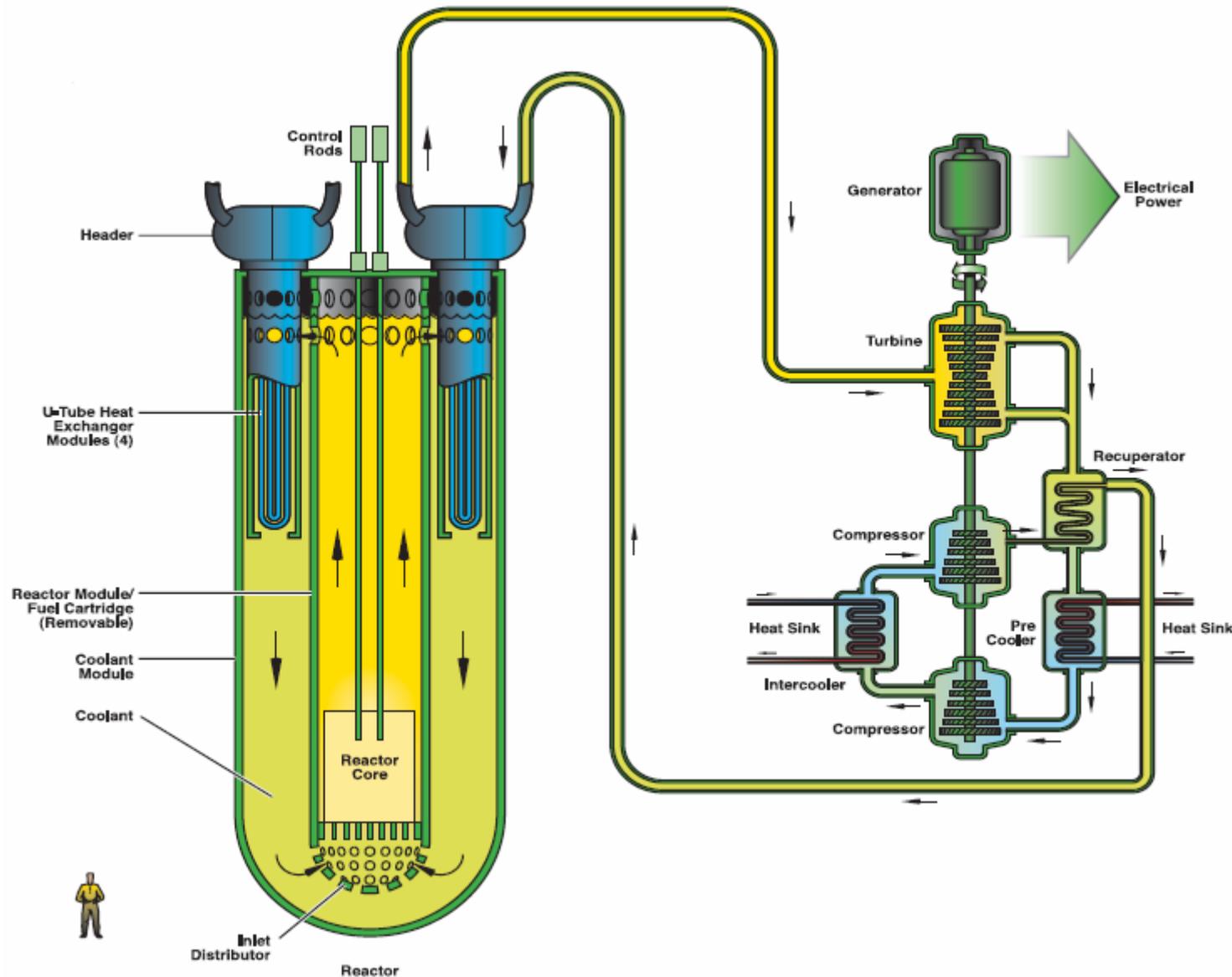
Instalación	Localización	Fechas	Potencia (MWt)
BR-2	Rusia	1956 – 1957	0,1
BR-5/BR-10	Rusia	1958 – 2002	5/10
DFR	Reino Unido	1957 – 1977	60
Rapsodie	Francia	1967 – 1983	40
BOR – 60	Rusia	1968 -	50
KNK-II	Alemania	1972 – 1999	58
Phénix	Francia	1973 - 2009 (planeado)	563
PFR	Reino Unido	1974 – 1994	650
BN-600	Rusia	1980 -	1470
JOYO	Japón	1978 -	140
FBTR	India	1985 -	40
SuperPhénix	Francia	1985 - 1997	2990
MONJU	Japón	1994-1995 (a reiniciar en 2009)	714

RNR futuros

Instalación	Localización	Fechas	Potencia (MWe)
CEFR	China	En construcción - 2009	25
PFBR	India	En construcción - 2010	500
BN-800	Rusia	En construcción - 2012	800
CPFR	China	Conceptual - 2020	600
EFR	Francia	Conceptual – 2020+	1500
JSFR	Japón	Conceptual – 2025+	1500
BN-1600	Rusia	Conceptual - TBD	1600
Prototipo ABR	EE.UU.	Pre Conceptual - 2020-2025	95-760

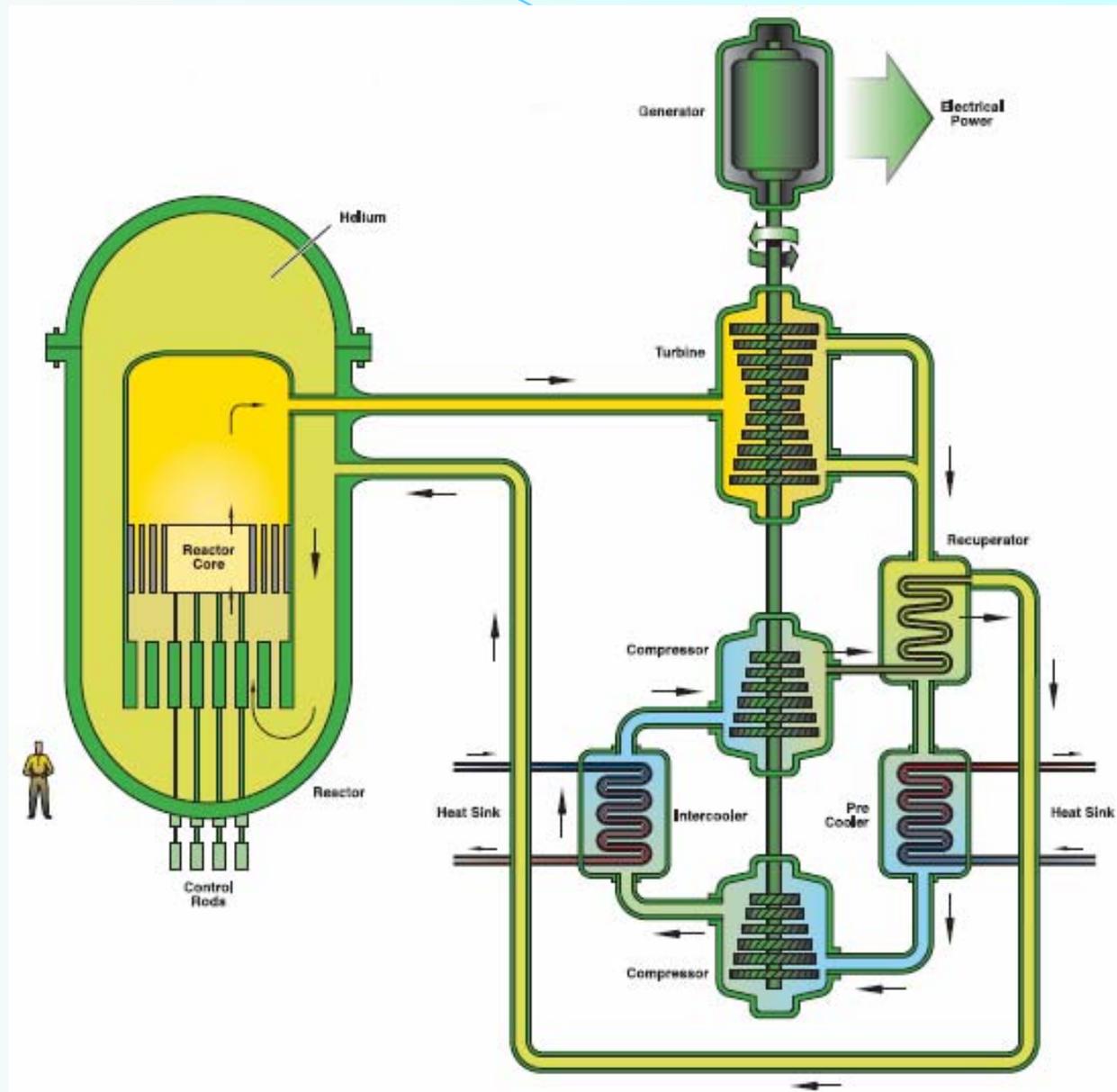
*** Todos estos actores están trabajando en el reactor SFR dentro de la Gen IV, salvo la India**

LFR: enfriamiento por plomo



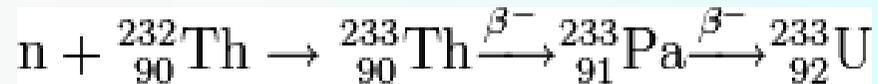
Rusia: reactor
SVBR-100
enfriado
por plomo-
bismuto

GFR: enfriamiento por gas



Otras iniciativas

- **Reactores térmicos reproductores** en base a combustible ^{233}U - ^{232}Th . El plan nuclear hindú está basado en el aprovechamiento de sus reservas de torio, y el desarrollo del reactor AHWR.



- Reactores ADS (Accelerator Driven System), subcríticos
- Reactores de potencia flotantes. Rusia construirá 7 plantas nucleares flotantes de 70 MWe (2x 35 MWe)



Reflexión final

“¿Qué es lo que fué? Lo mismo que será. ¿Qué es lo que ha sido hecho? Lo mismo que se hará: y nada hay nuevo debajo del sol.”

Eclesiastés, Capítulo I, versículo 9, Antiguo Testamento, año 700 A.C.

- La energía nuclear, bajo su forma de utilización práctica, es sin embargo algo nuevo bajo el sol, con un enorme potencial para beneficiar a la Humanidad.
- En el corto período de existencia de la energía nuclear – 60 años – han surgido pocas nuevas ideas. Los diseños de reactores avanzados fueron explorados y desarrollados en el pasado
- El desafío es tomar esos viejos – nuevos – conceptos y desarrollarlos en una realidad comercial para el bien común.