

REACTORES NUCLEARES PARA USOS CIVILES MARINOS

Jornada AINE: Energía nuclear en
buques y usos marinos civiles

Diana Cuervo

Profesora Titular

Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Navales

18 noviembre de 2024

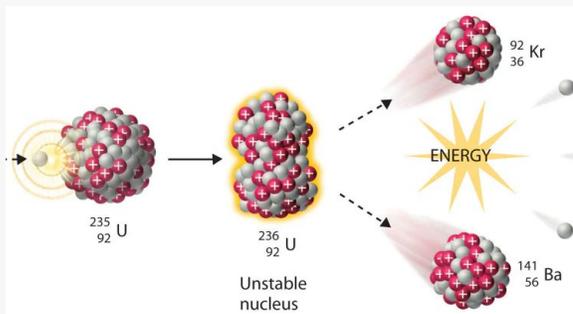
CONTENIDO

01. QUE ES LA ENERGÍA NUCLEAR

02. VENTAJAS Y DESAFÍOS QUE CONLLEVA

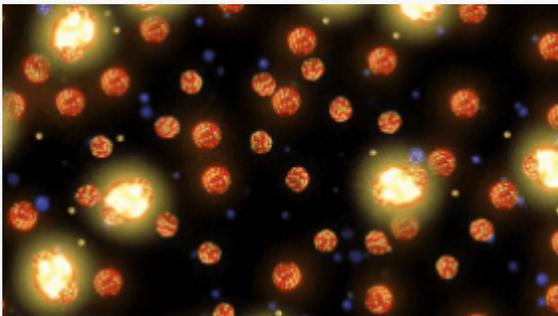
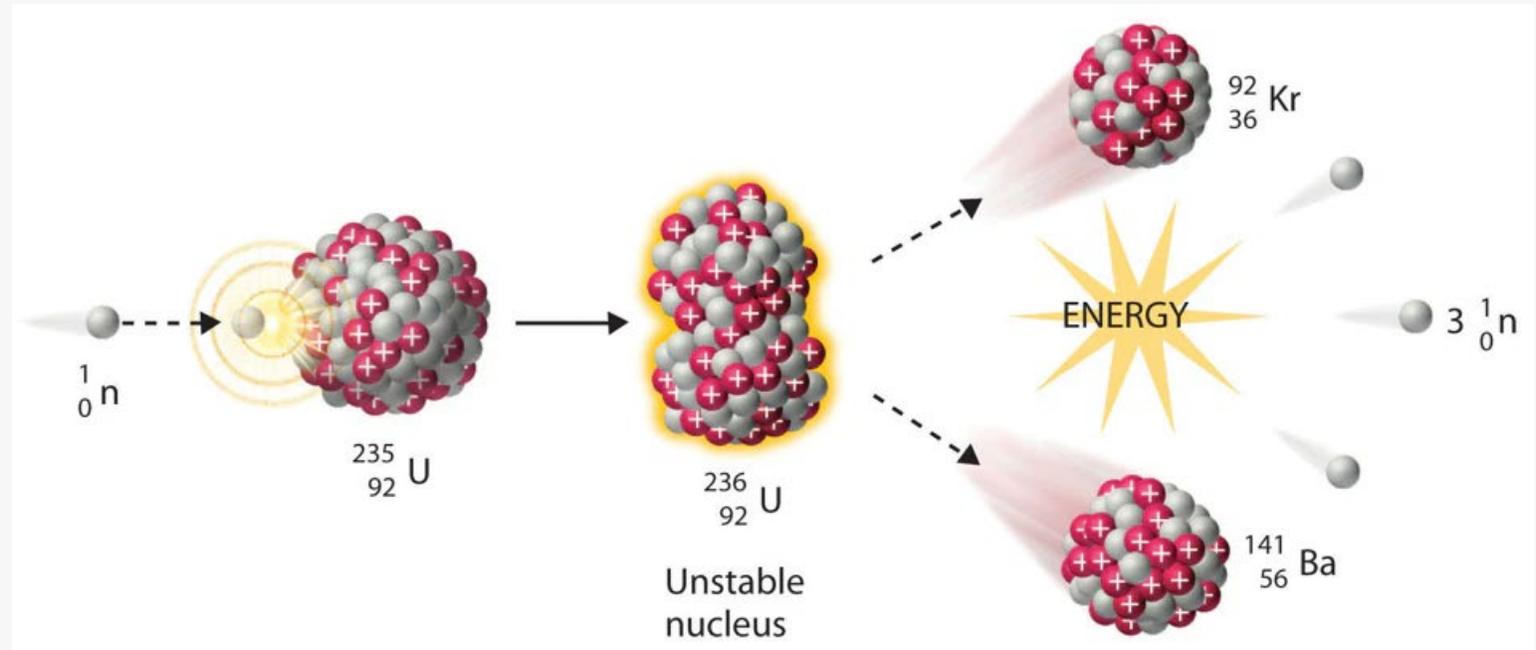
03. ENERGÍA NUCLEAR EN EL ÁMBITO MARÍTIMO

04. NUEVOS REACTORES Y PROPUESTAS PARA EL SECTOR MARÍTIMO

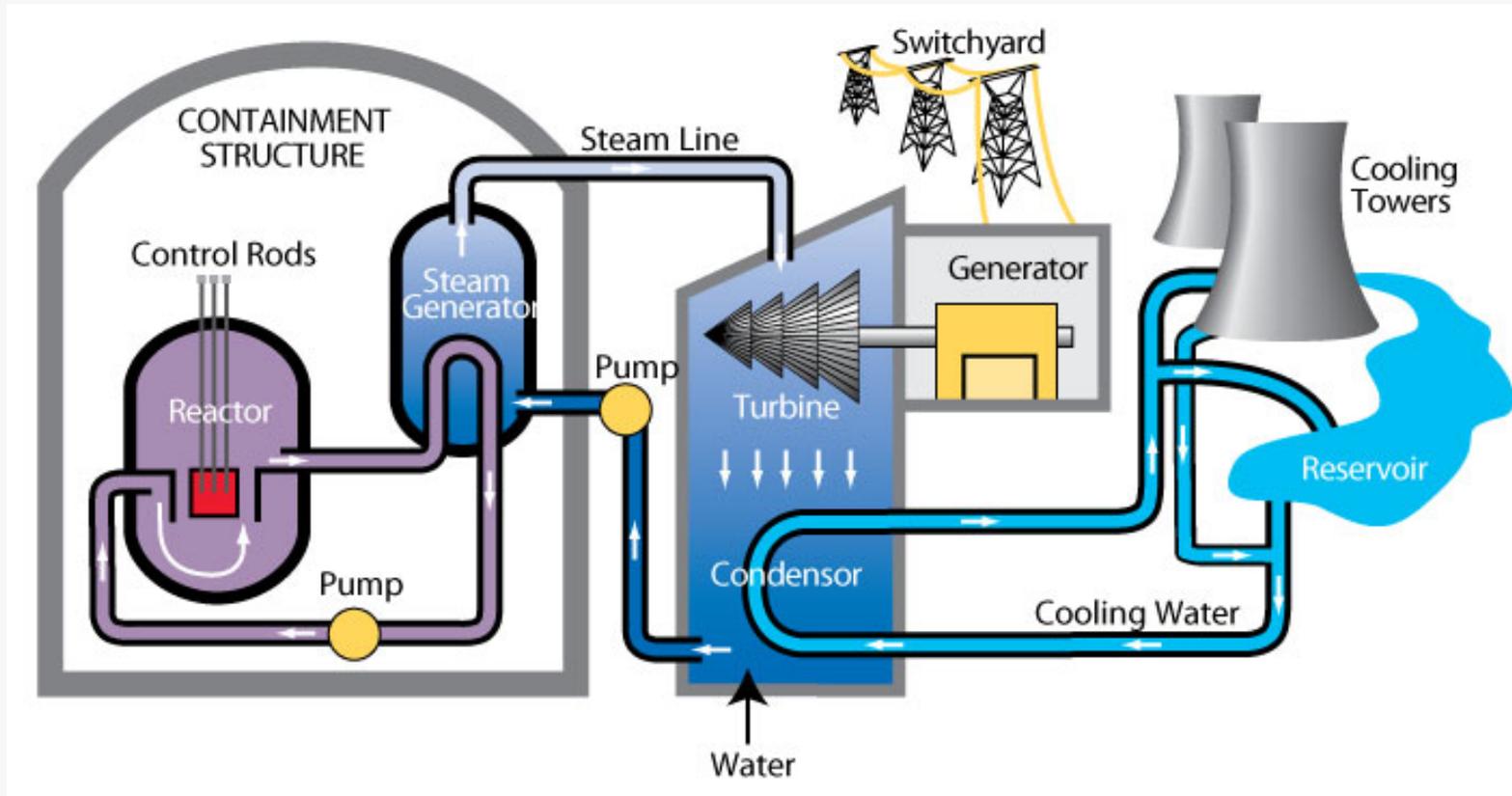


¿Qué es la energía nuclear de fisión?

Reacción de fisión en cadena controlada

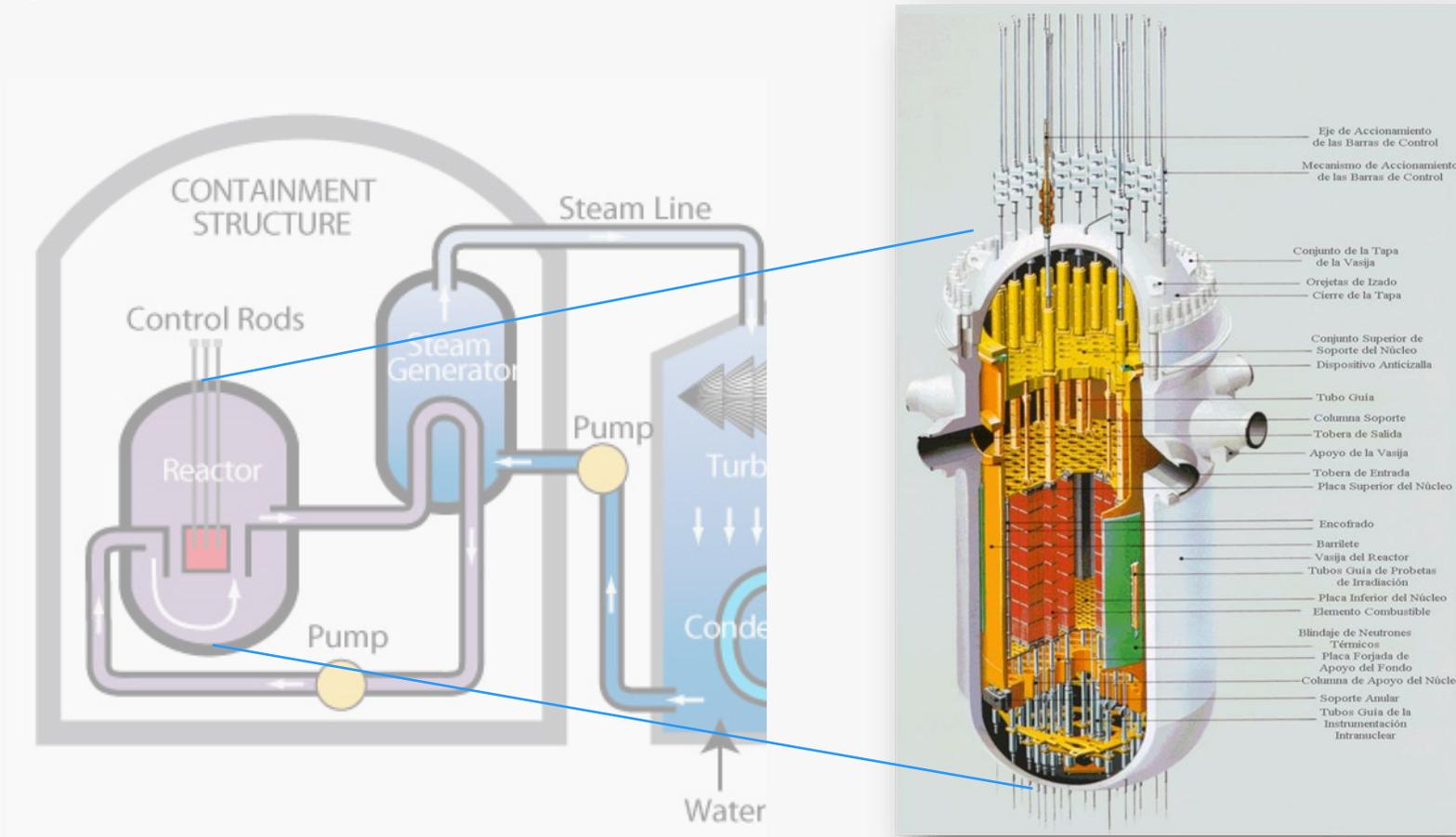


¿Cómo es un reactor nuclear?



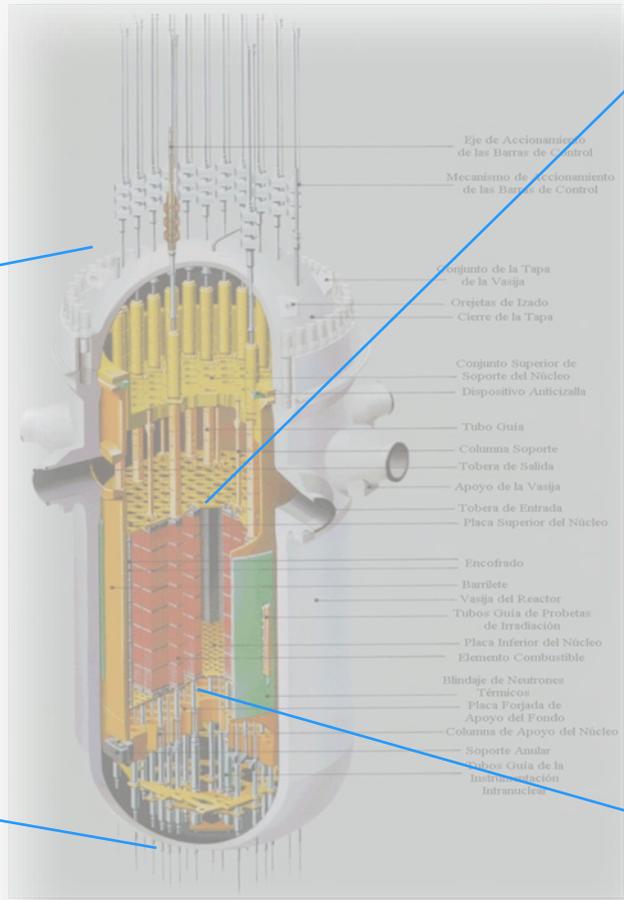
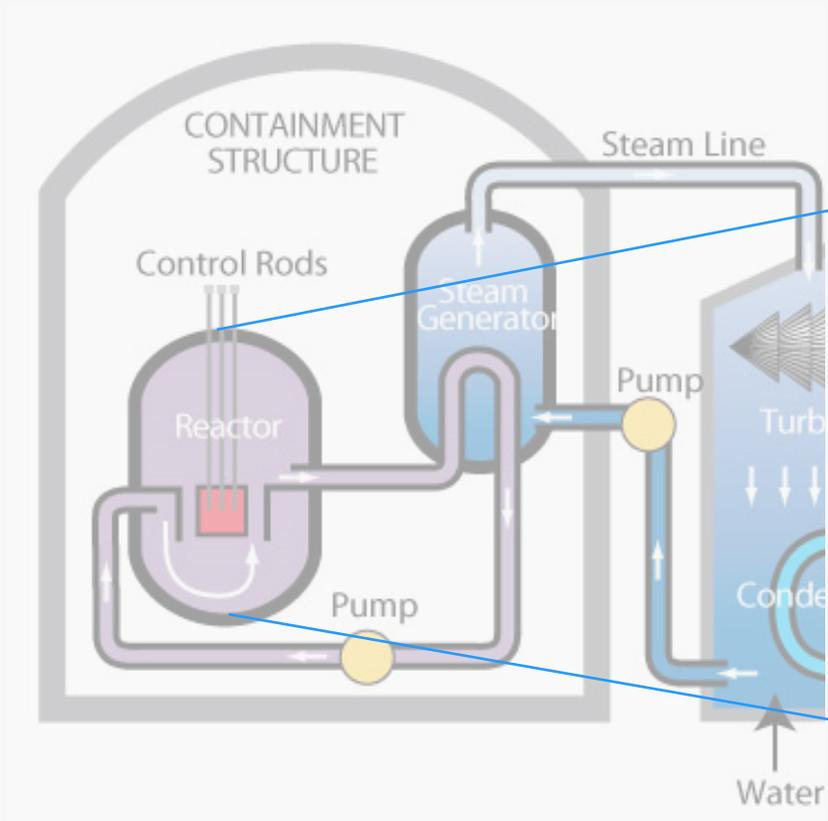
Pressurized Water Reactor (PWR)

¿Cómo es un reactor nuclear?



Pressurized Water Reactor (PWR)

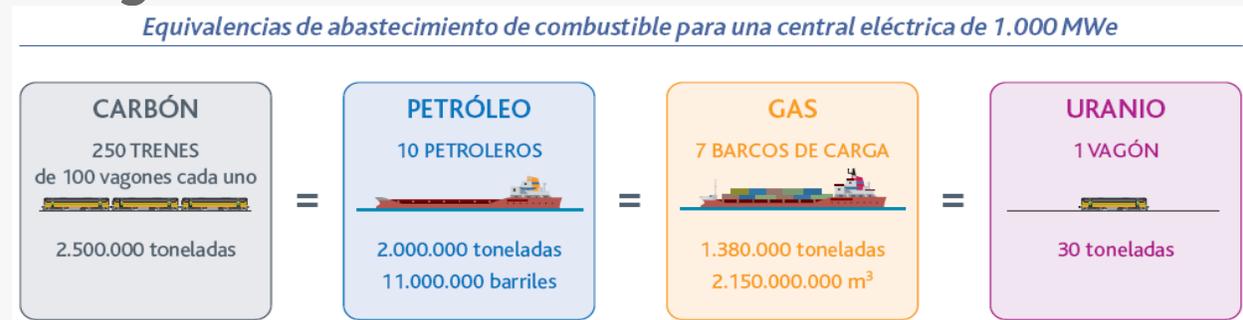
¿Cómo es un reactor nuclear?



Pressurized Water Reactor (PWR)

Ventajas como fuente de energía

✓ Potencia específica muy elevada



✓ No emite gases contaminantes

~~S~~ ~~C~~ ~~N~~

✓ Bajo coste específico del combustible

Desafíos principales

➤ Generación de residuos

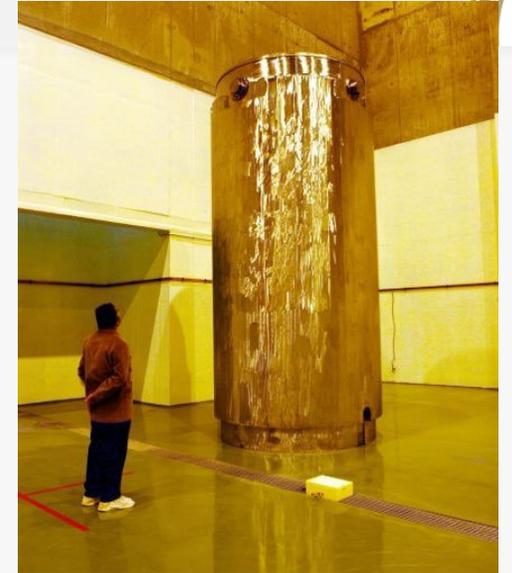
Actualidad:

Controlados en almacenes adecuados

Futuro:

Consumidos en nuevos reactores

Reducción en su generación y
peligrosidad



Fuente: Foro nuclear: CN Trillo



Desafíos principales

➤ Seguridad

Control de la reactividad

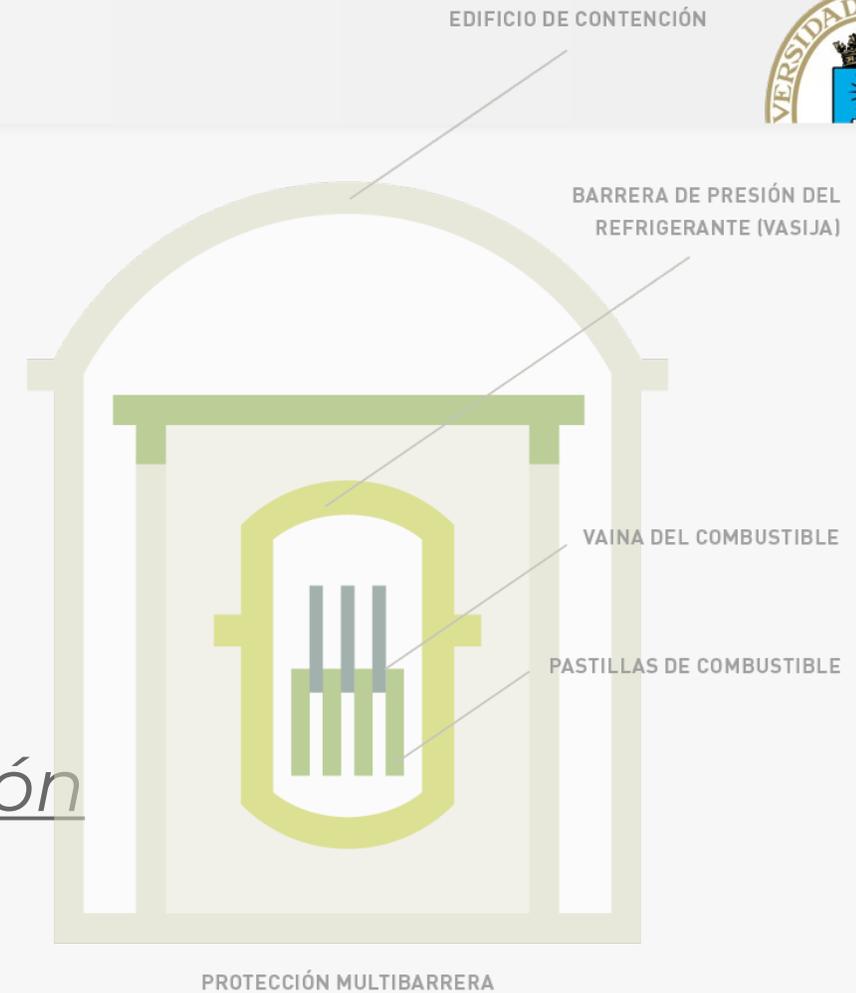
Reactores intrínsecamente seguros

Confinamiento de los productos de fisión

Barreras de defensa en profundidad

Evacuación de la potencia residual

Mecanismos pasivos de refrigeración



Fuente: Sociedad Nuclear Española

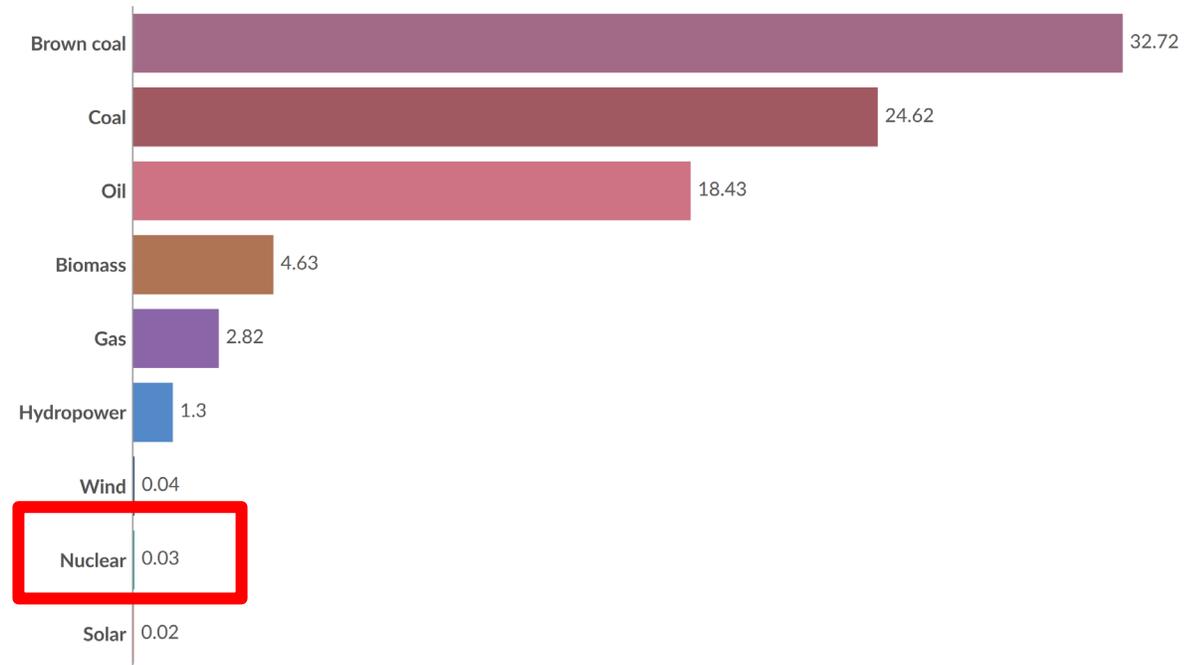
Desafíos principales

➤ Seguridad

Death rates per unit of electricity production

Our World
in Data

Death rates are measured based on deaths from accidents and air pollution per terawatt-hour¹ of electricity.



Data source: Markandya & Wilkinson (2007); Sovacool et al. (2016); UNSCEAR (2008; & 2018) OurWorldinData.org/energy | CC BY

1. **Watt-hour:** A watt-hour is the energy delivered by one watt of power for one hour. Since one watt is equivalent to one joule per second, a watt-hour is equivalent to 3600 joules of energy. Metric prefixes are used for multiples of the unit, usually: - kilowatt-hours (kWh), or a thousand watt-hours. - Megawatt-hours (MWh), or a million watt-hours. - Gigawatt-hours (GWh), or a billion watt-hours. - Terawatt-hours (TWh), or a trillion watt-hours.

Desafíos principales

➤ Coste de la instalación

Los reactores nucleares

- Son instalaciones complejas
- Requieren alta tecnología
- Se diseñan de forma personalizada

Objetivo de los nuevos diseños

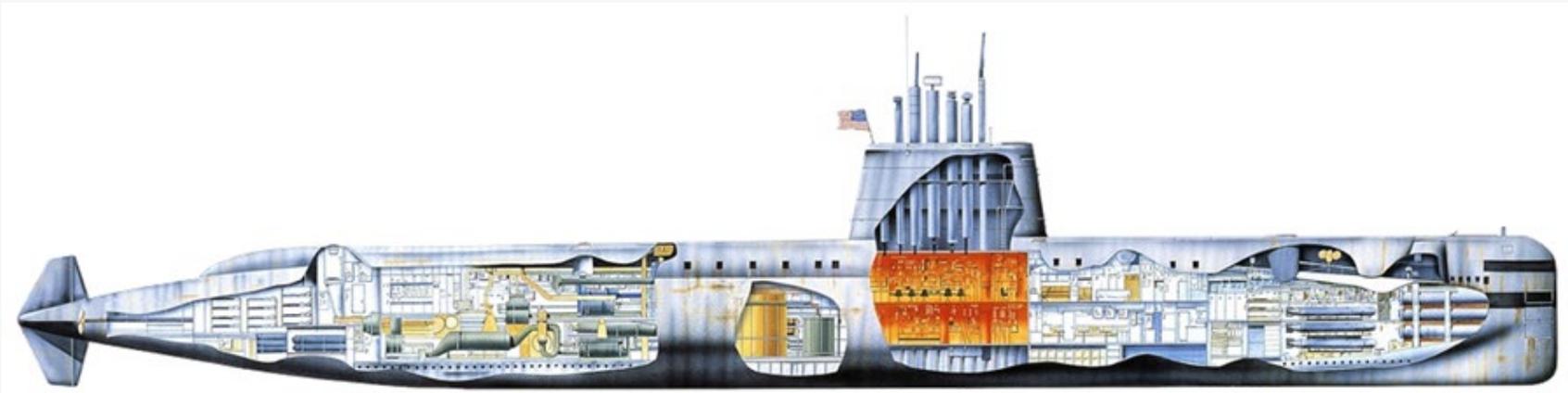
- **Modularización**
- **Estandarización**

Energía nuclear en el ámbito marítimo

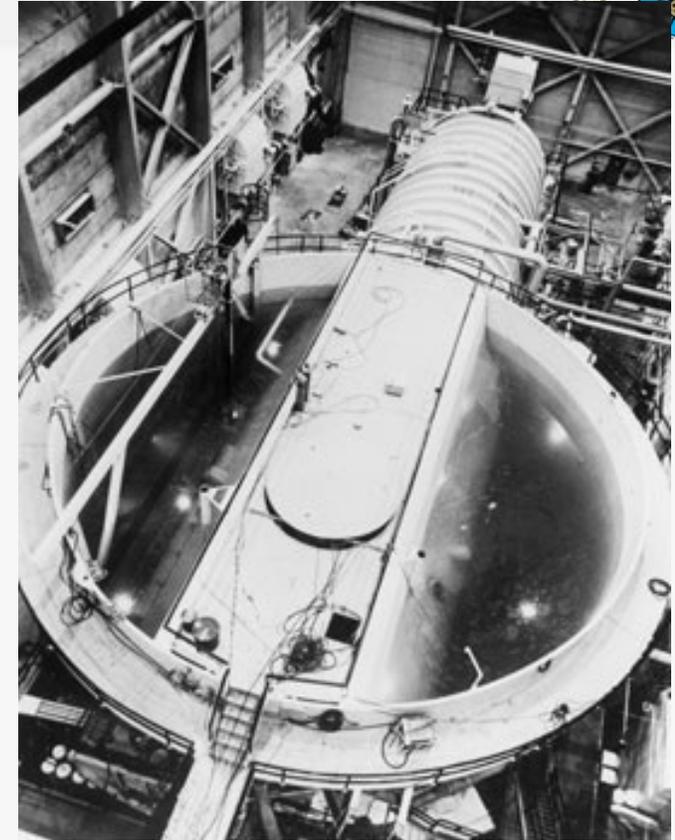
Hitos históricos

1952 Submarine Thermal Reactor
(Tipo PWR)

SSN Nautilus



Fuente: www.zona-militar.com

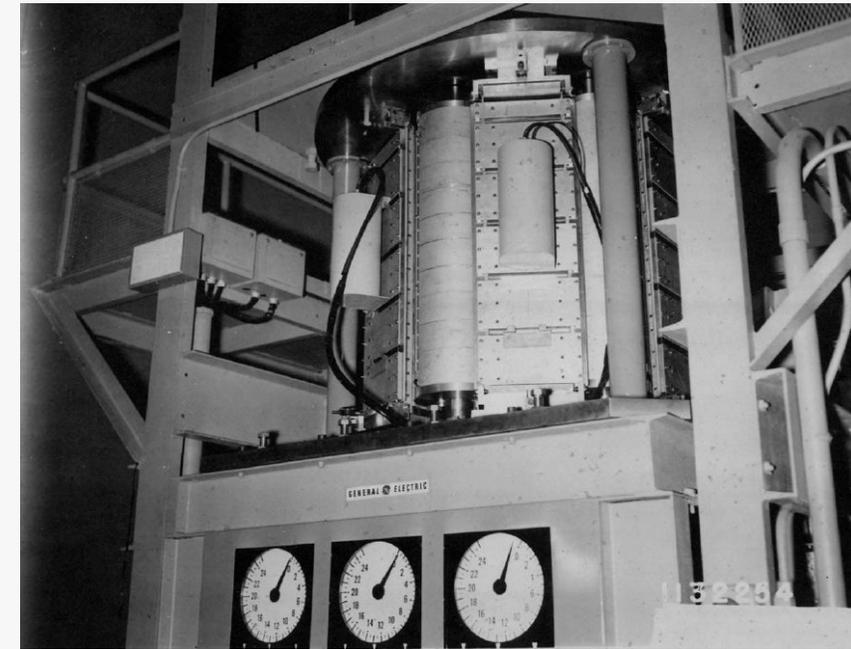


Fuente: nrl.navy.mil

Hitos históricos

1953 Submarine Intermediate Reactor
(Tipo SFR)

SSN Seawolf



USS Seawolf (SSN-575)
Special Projects boat



Hitos históricos

Se desarrollo el uso de energía nuclear en el mar por parte de diferentes armadas

EEUU

URSS/Rusia

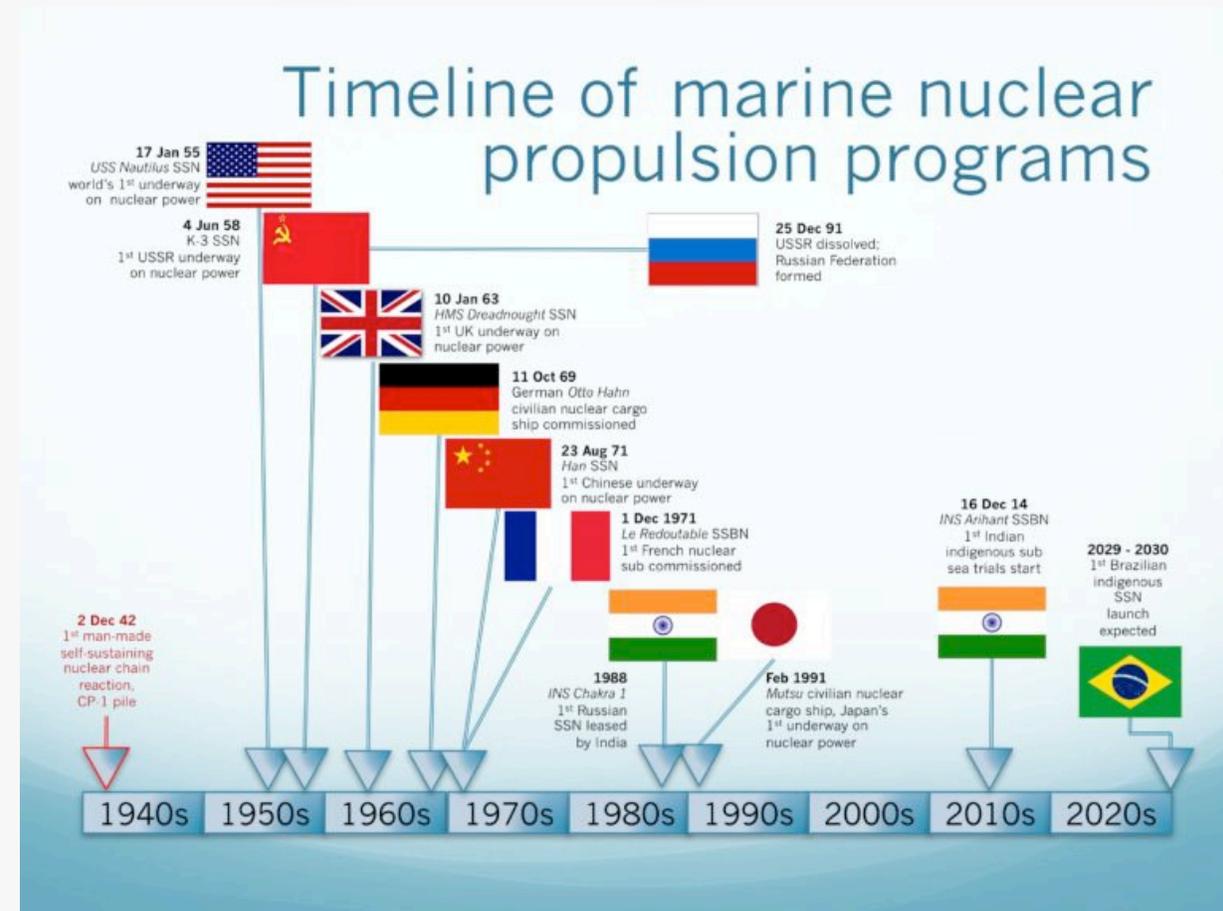
Gran Bretaña

China

Francia

India

... Brasil



Buques militares

Reactores PWR

→ Todas las armadas con propulsión nuclear

Reactor de Sodio

→ E.E.U.U.

Reactores de Metales Fundidos Plomo-Bismuto

→ U.R.S.S./Rusia

Más de 600 reactores han sido utilizados en el mar de los que **180** están **operativos** en la actualidad

Buques civiles

NS Lenin (U.R.S.S/Rusia)

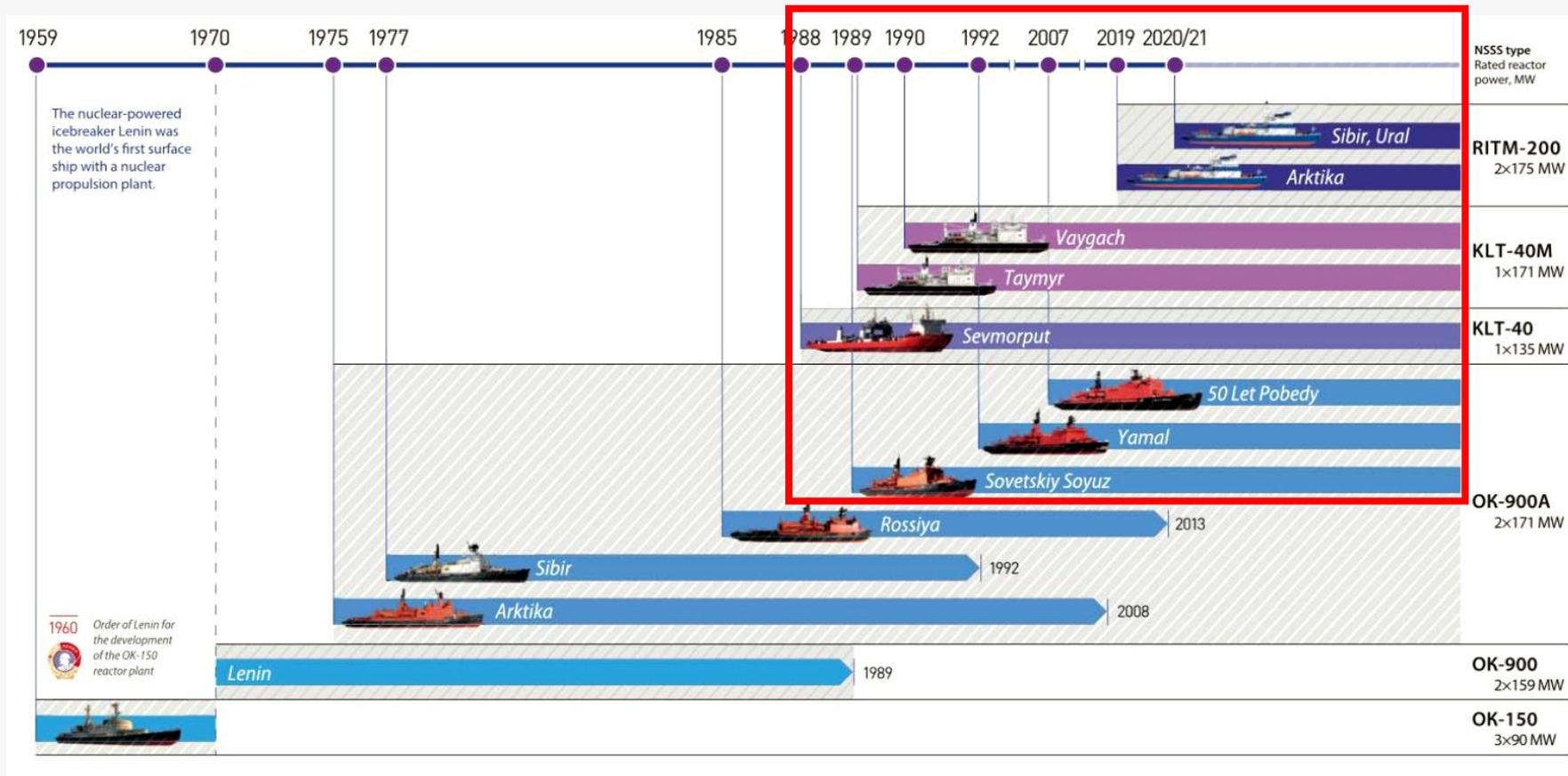
Buque Rompehielos
1957-1989



Fuente: www.britannica.com

Buques civiles

Rompehielos rusos hasta la actualidad



Buques civiles

NS Savannah (E.E.U.U.)

Buque de carga y pasaje
1962-1972

Atoms for peace



Fuente: Wikipedia

Buques civiles

NS Otto Hahn (Alemania)

Buque de investigación
1964-1979



Fuente: Bundesarchiv

Buques civiles

NS Mutsu (Japón)

Buque de investigación
1972-1992



Fuente: Japan Atomic Energy Research Institute

Planta nuclear flotante (Rusia)



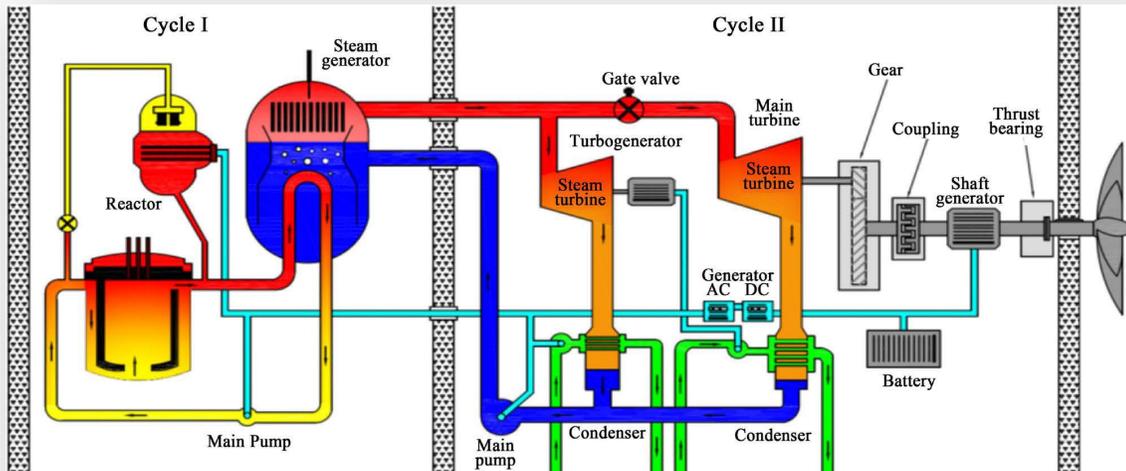
*FNPP Akademik
Lomonosov*

Dos reactores de Rosatom
KLT-40S de 35 MW

Barcaza (no propulsada)

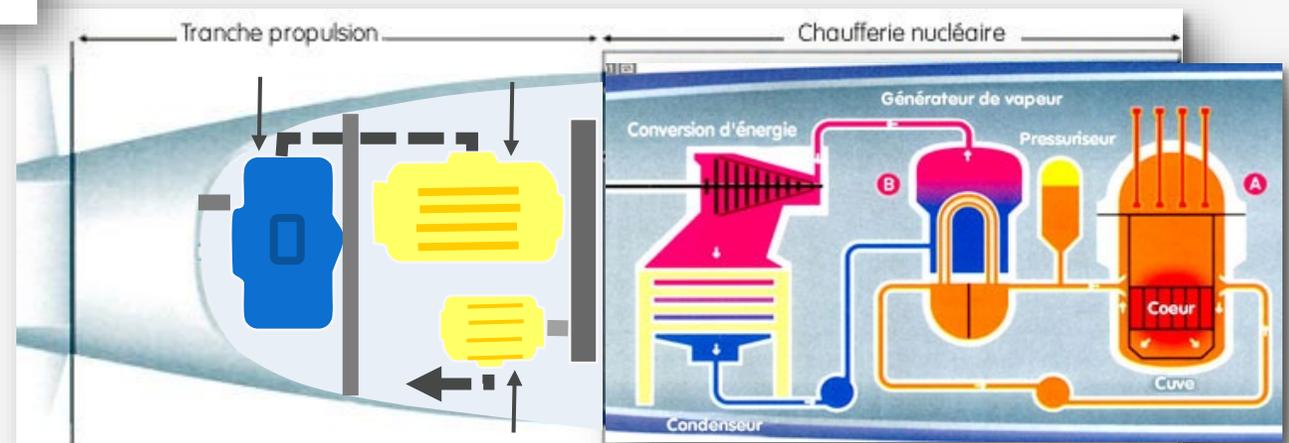
Fuente: Rosatom

El reactor en el buque

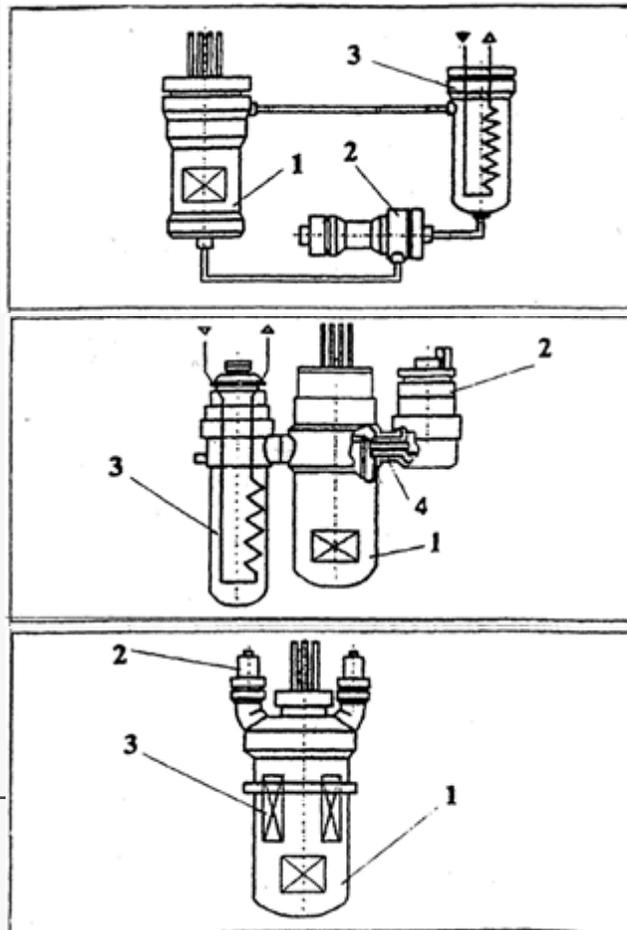


Propulsión turbo-mecánica

Propulsión turbo-eléctrica



Evolución del PWR marítimo



PWR

155 bar

Con tuberías

PWR-Block (Compacto)

125 bar

Tuberías muy cortas

IPWR (Integrado)

125 bar

Sin tuberías

1. Vasija
2. Bomba
3. Generador de vapor

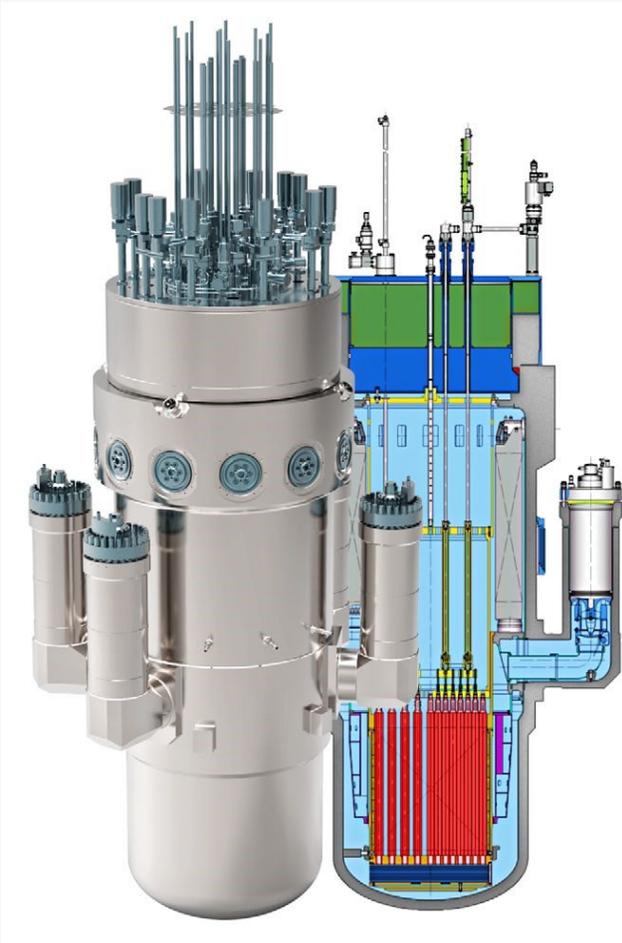
Reactor PWR Block



Fuente: Rosatom

- Diseño **muy compacto** para el circuito primario:
 - Poca longitud
 - Mayor diámetro
- Más fácil mantenimiento que el IPWR
- Permite refrigerar con **circulación natural a baja potencia**
- Países
 - Francia
 - Rusia
 - Otros?

Reactor PWR integrado



Fuente: Rosatom

- Los **componentes** del circuito primario están **integrados** en la vasija
- Permite refrigerar con **circulación natural**
- Países
 - EEUU
 - Rusia
 - Otros?

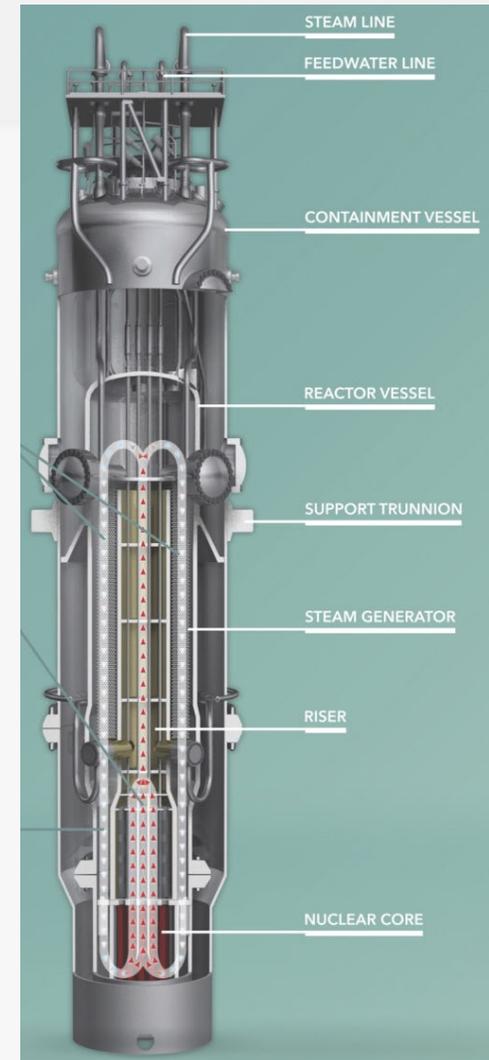
Nuevos reactores y propuestas para el sector marítimo

Reactores SMR PWR

Small Modular Reactor

Herederos de los reactores navales

Se están desarrollando muchos conceptos a nivel mundial



Fuente: NuScale

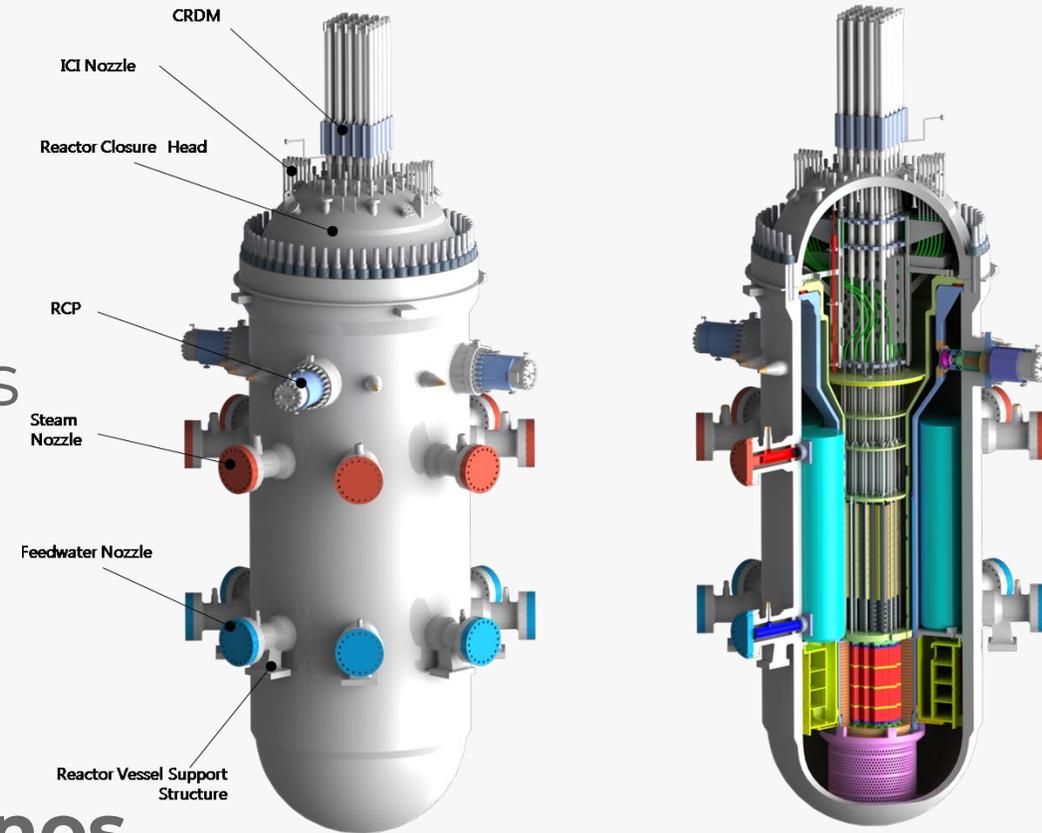
Reactores SMR PWR

Small Modular Reactor

Herederos de los reactores navales

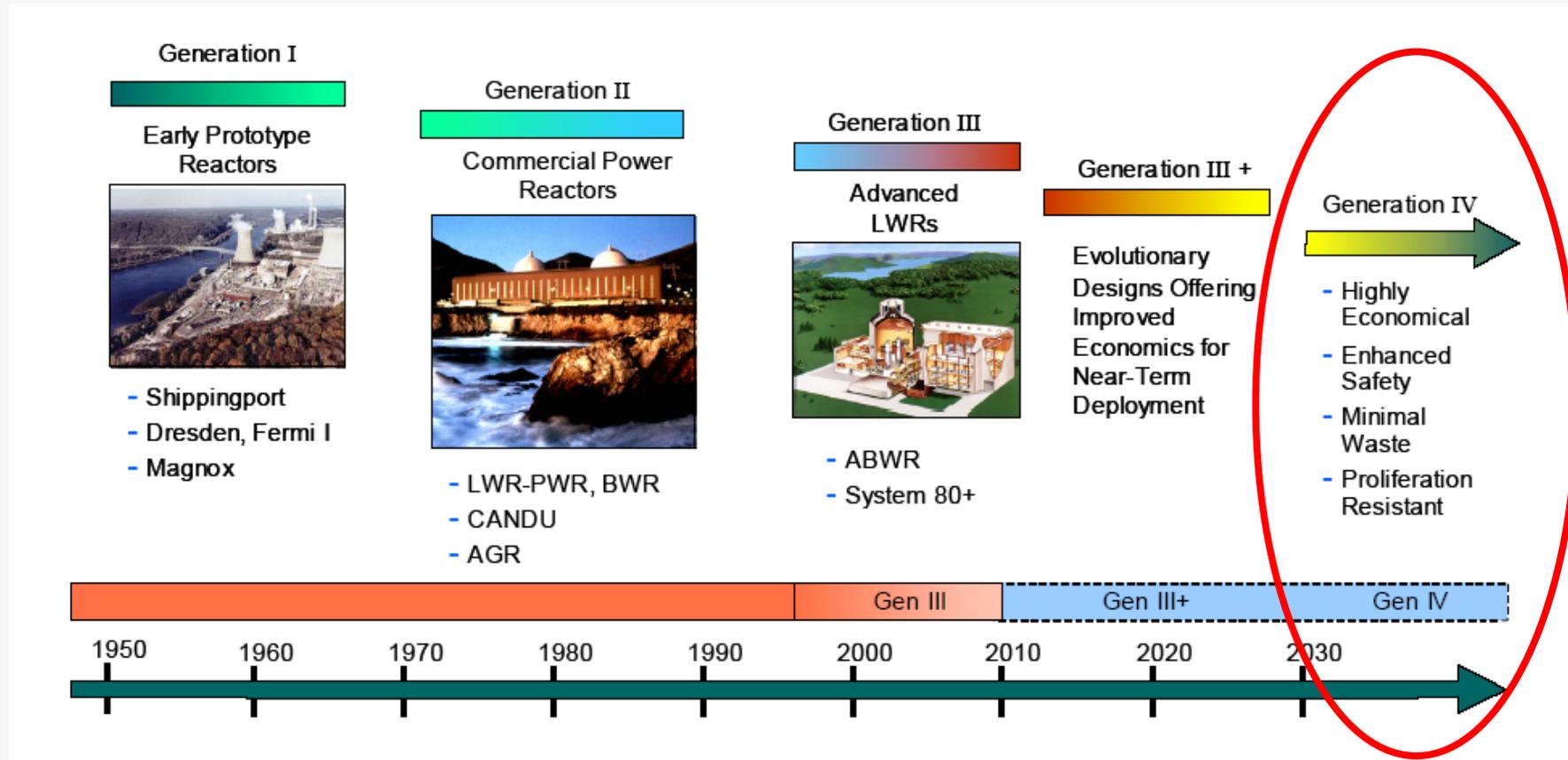
Se están desarrollando muchos conceptos a nivel mundial

Se ha generalizado el concepto a reactores de cualquier tipo de **menos de 300MWe**



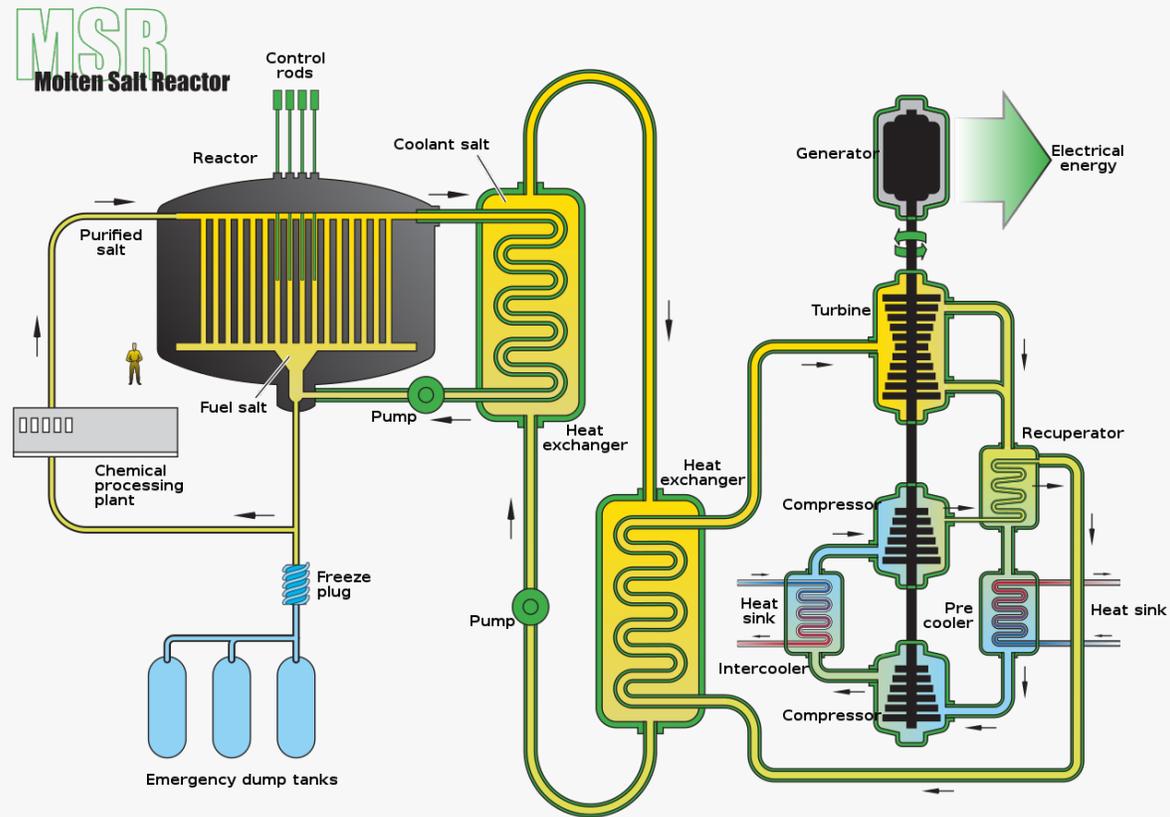
Fuente: SMART - KAERI

Reactores GEN-IV



Fuente: GEN IV International Forum GIF

Molten salt reactor (MSR)



Fuente: GEN IV International Forum GIF

Molten salt reactor (MSR)

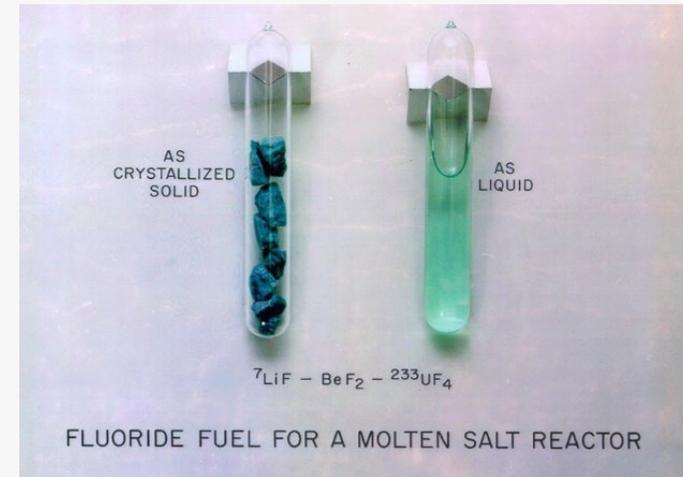
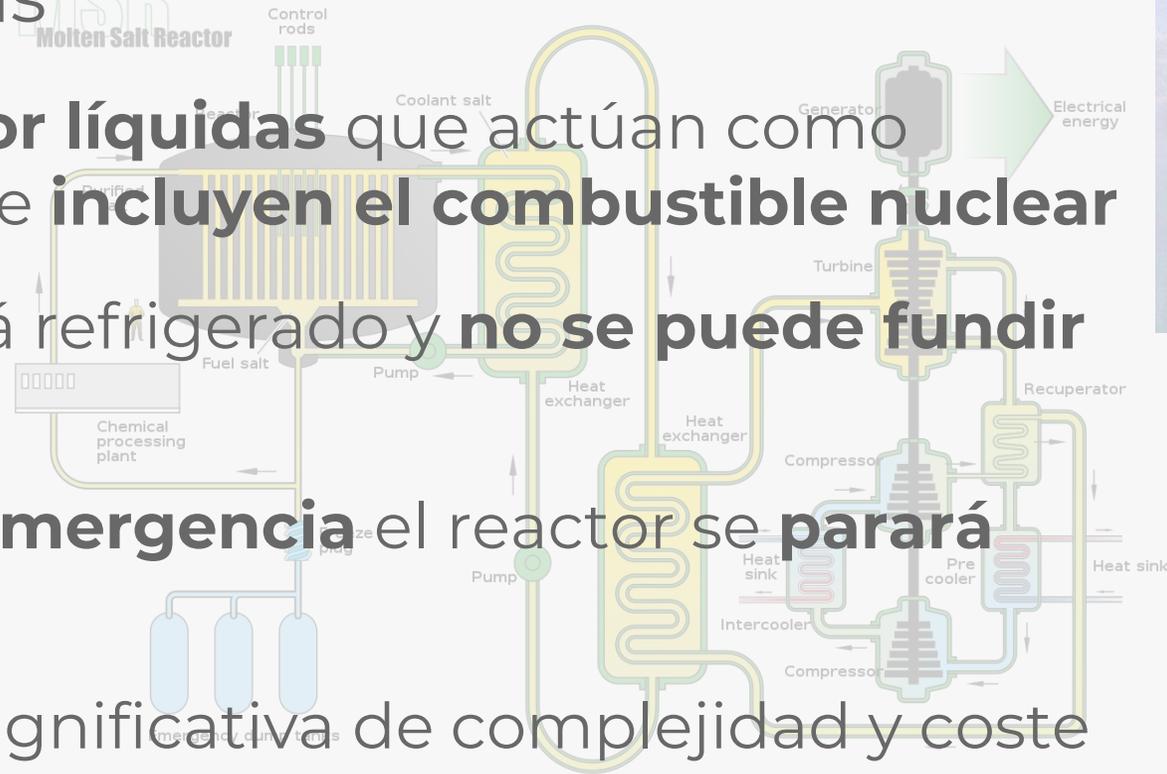
Características

Sales de flúor líquidas que actúan como refrigerante e **incluyen el combustible nuclear**

Siempre está refrigerado y **no se puede fundir ni explotar**

En caso de **emergencia** el reactor se **parará solo**

Reducción significativa de complejidad y coste



FLUORIDE FUEL FOR A MOLTEN SALT REACTOR

Fuente: Oak Ridge National Laboratory

Molten salt reactor (MSR)

Características

Recargas cada **12 años**

Presión casi atmosférica del primario → **evita amplio rango de accidentes** en los que la diferencia de presión tiene mucho impacto

Refrigerante en contacto con la atmósfera se enfriará **solidificando** → **evita la liberación de material radiactivo**



Molten salt reactor (MSR)

Características

Residuos de vida corta (similares a los de medicina) se retiran para enviarlos a almacenamiento

Residuos de vida larga (más peligrosos) se mezclan de nuevo con el combustible para ser **reutilizados**

Todo esto se realiza **en la misma planta** sin que haya que trasladar residuos de alta actividad a otras localizaciones



Molten salt reactor (MSR)

Propuesta: **Seaborg Technologies** (Dinamarca)

Barcaza para generación eléctrica

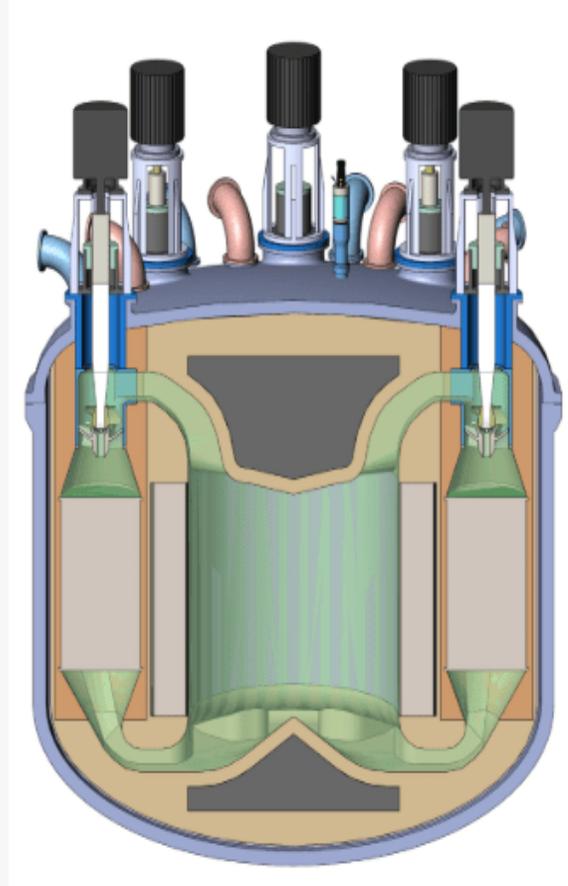
300 MWt por reactor

Fecha prevista 2030



Fuente: Seaborg Technologies

Molten Chloride Salt Reactor (MCSR)



Fuente: NRC

Molten Chloride Salt Reactor (MCSR)

Características

Isótopos físi les disueltos en sales de cloro fundidas

Las **altas temperaturas** de operación **incrementan la eficiencia de la planta** y permiten su uso para **aplicaciones industriales** (desalación, producción de hidrógeno, amoníaco, etc.)

Reactor **muy estable inherentemente seguro** que no necesita de acciones de operador

Recarga continua sin necesidad de instalaciones de enriquecimiento o reprocesamiento lo que elimina el riesgo de proliferación

Molten Chloride Salt Reactor (MCSR)

Características

El espectro rápido permite **mayor utilización del combustible**

Seguridad mejorada debido a que trabaja a **baja presión**

Diseño compacto

Colaboradores:

CORE POWER

Southern Co

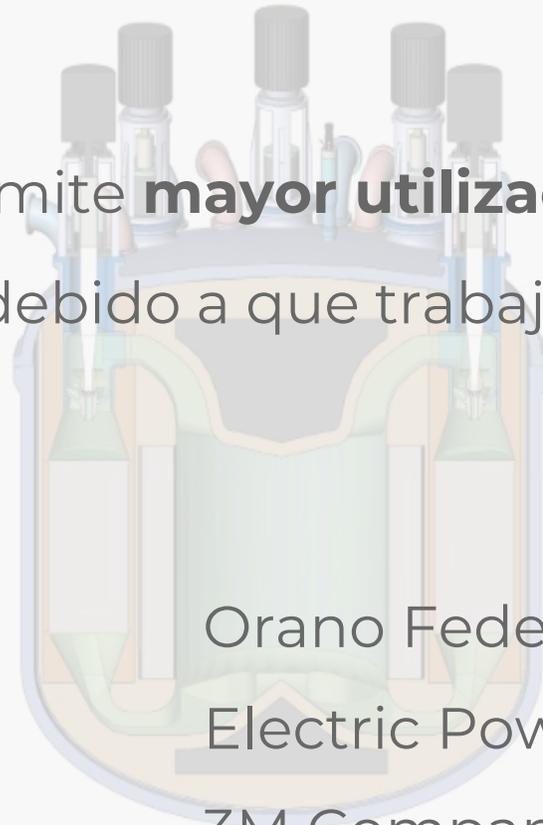
TerraPower

Idaho National Laboratory

Orano Federal Services

Electric Power Research Institute

3M Company

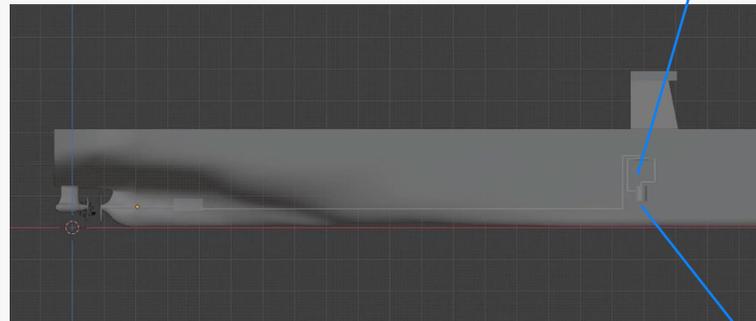


Molten Chloride Salt Reactor (MCSR)

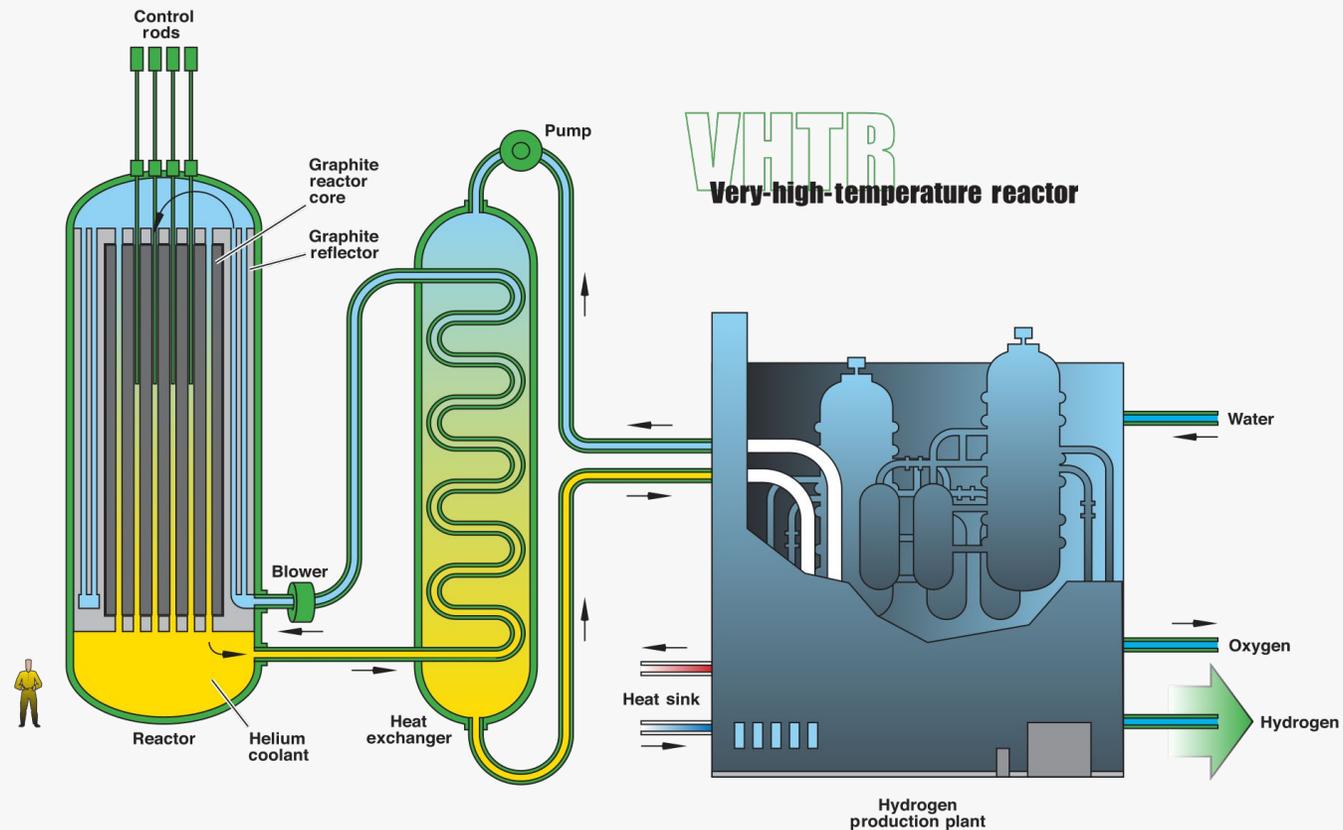
Propuesta **Core Power** (UK-EEUU)

100 a 200 Mwe por reactor

Fecha prevista: 2030



High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)



Fuente: GEN IV International Forum GIF

High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)

Características:

Refrigeración mediante **Helio**

Altas temperaturas de salida del **refrigerante** ($>700^{\circ}\text{C}$)

Alto **aprovechamiento del combustible**

Inherentemente seguro por lo que en caso de emergencia tenderá a pararse



High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)

Propuesta **HolosGen** (EEUU)

Una unidad formada por 4
cartuchos nucleares

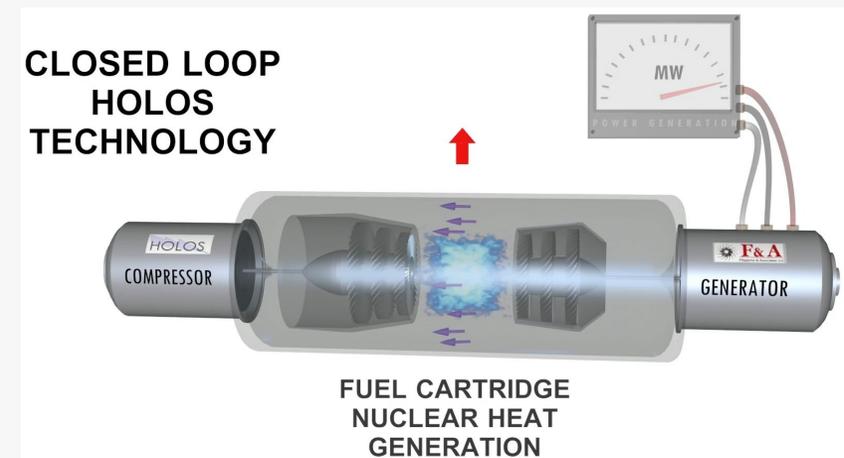
Generadores de entre 3 y 81 Mwe

Cartuchos con una duración de **12
a 20 años**

Seguridad pasiva gracias a la
**refrigeración mediante
circulación natural de aire**



Fuente: HolosGen



High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)

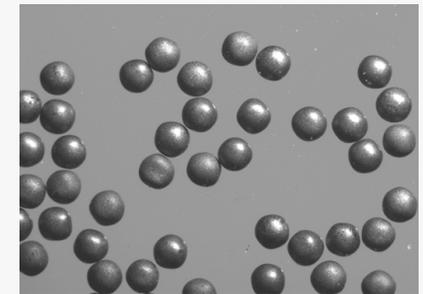
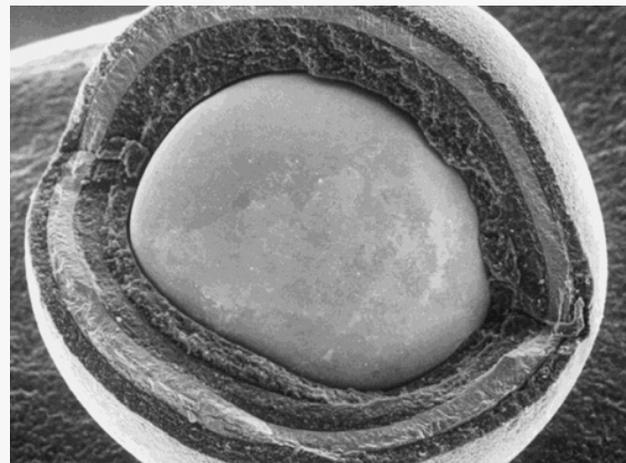
Propuesta **HolosGen** (EEUU)

Ciclo Bryton primario y Rankine secundario

Combustible con **partículas TRISO**
altamente resistentes a la
temperatura



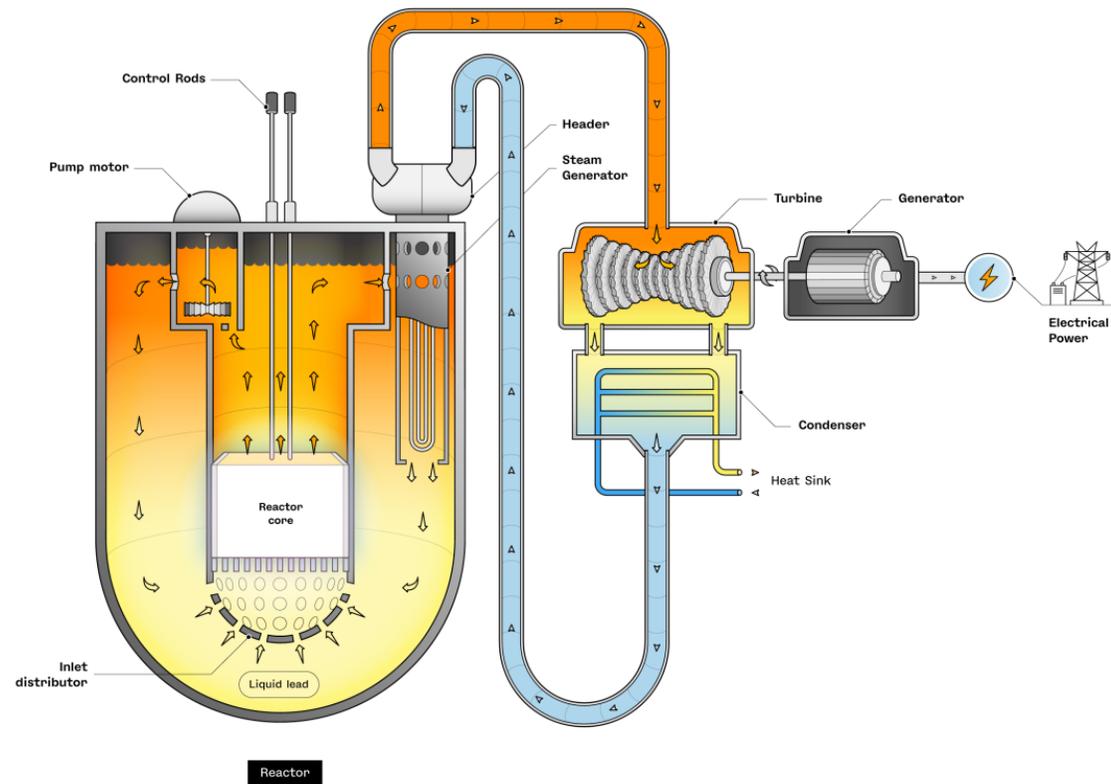
Fuente: HolosGen



Fuente: Energy.gov

Lead-cooled Fast Reactor (LFR)

LFR



Fuente: GEN IV International Forum GIF

Lead-cooled Fast Reactor (LFR)

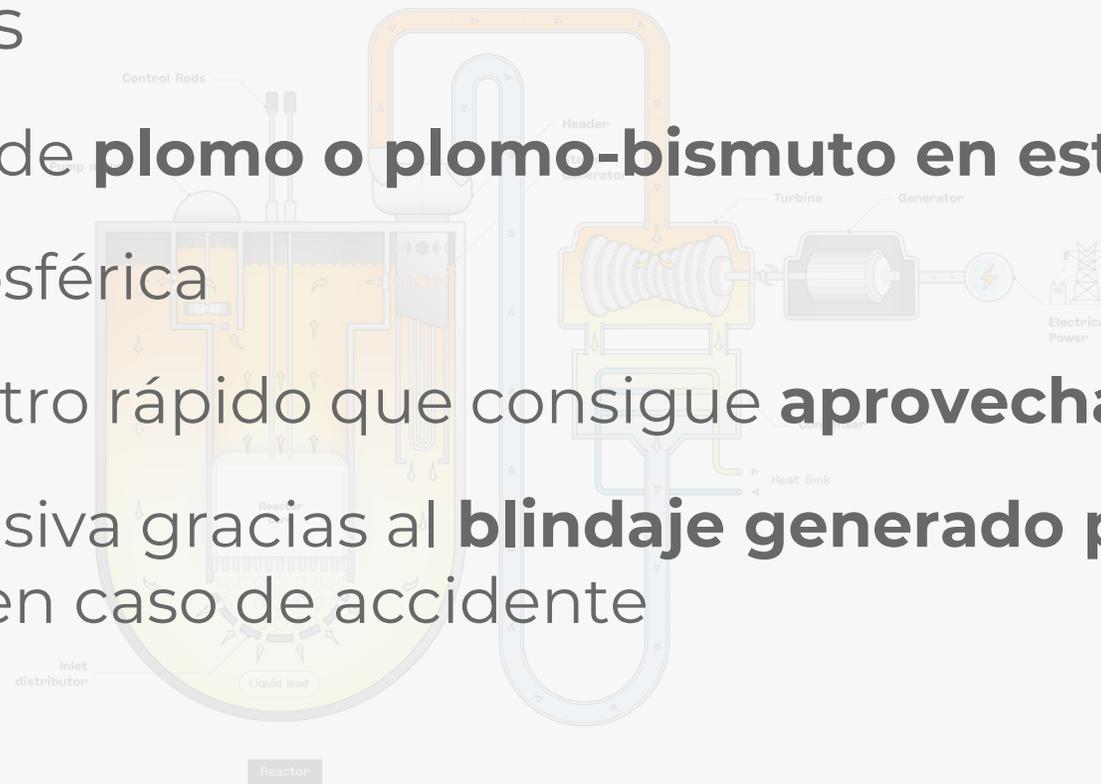
LFR Características

Refrigerante de **plomo o plomo-bismuto en estado líquido**

Presión atmosférica

Uso de espectro rápido que consigue **aprovechar los residuos**

Seguridad pasiva gracias al **blindaje generado por el plomo solidificado** en caso de accidente



Lead-cooled Fast Reactor (LFR)

Propuesta **Newcleo** (EU)

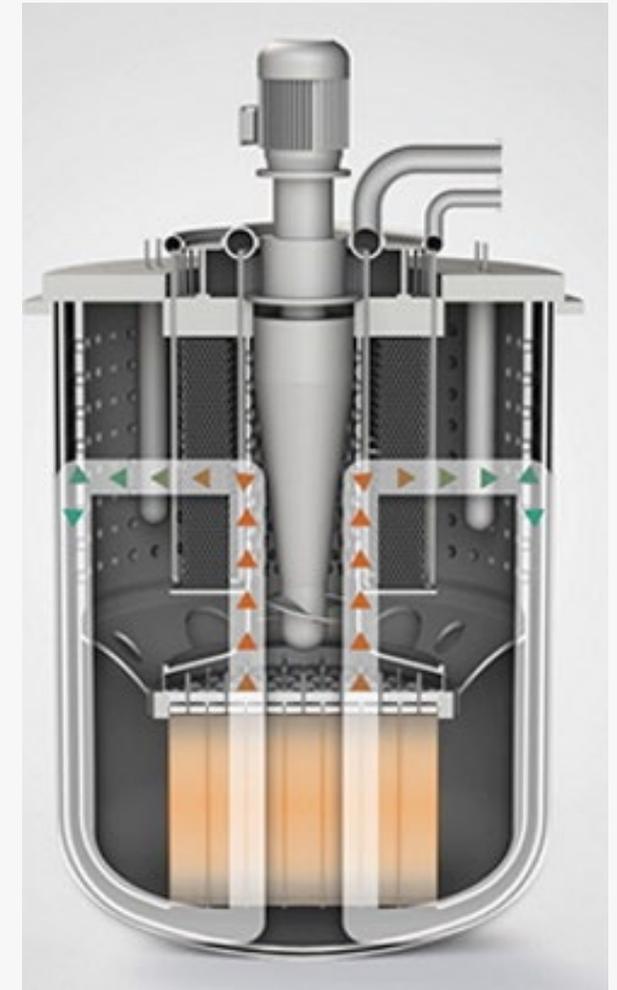
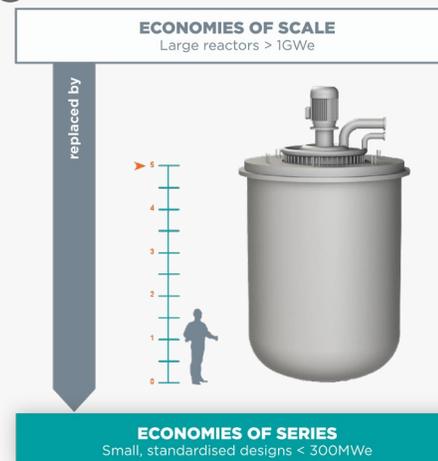
30MWe

Recarga cada 10-15 años

Mantenimiento muy limitado

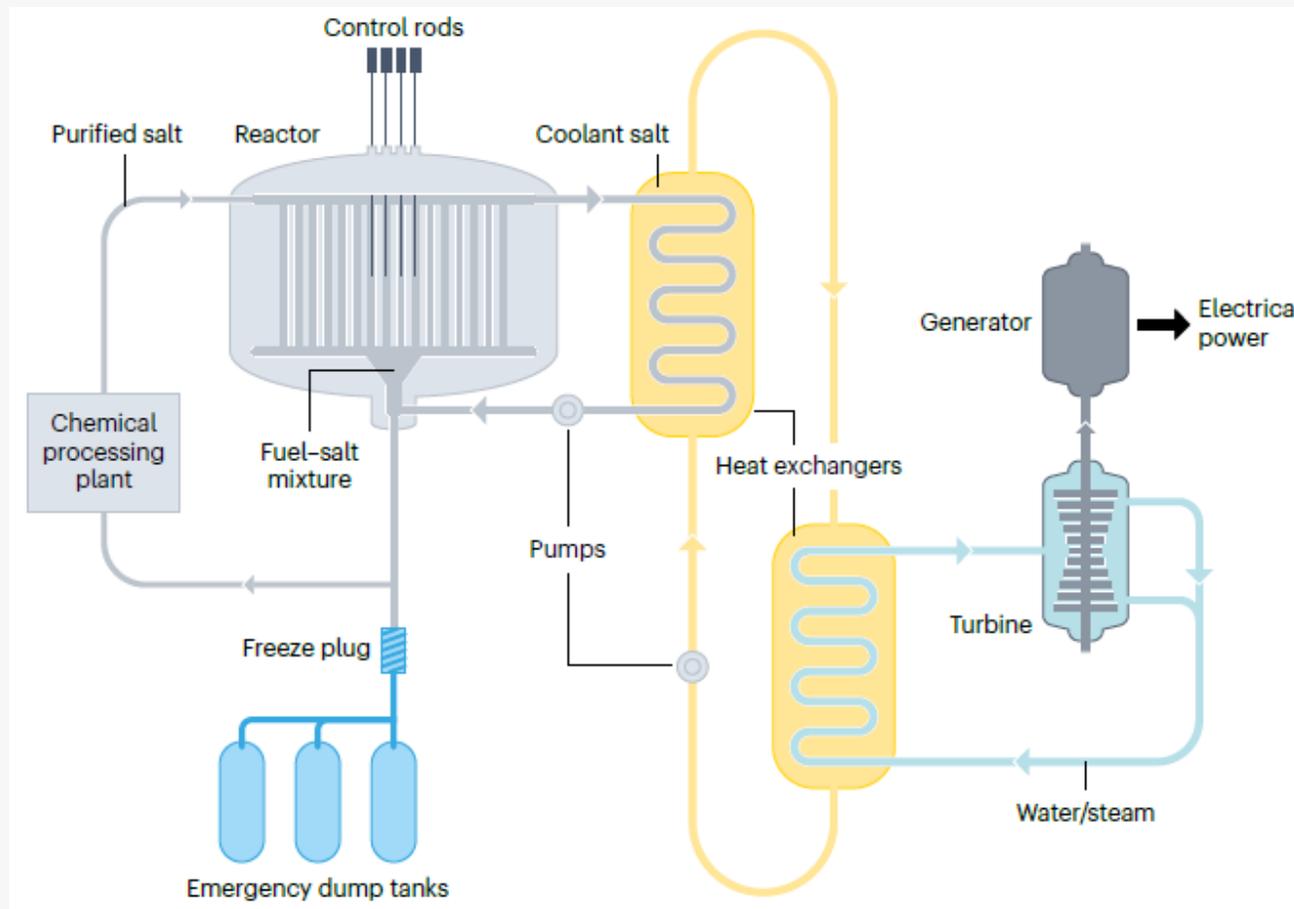
Circulación natural

Fecha prevista: 2030



Fuente: Newcleo

Thorium Molten Salt Reactor (THMSR)



Fuente: GEN IV International Forum GIF

Thorium Molten Salt Reactor (THMSR)

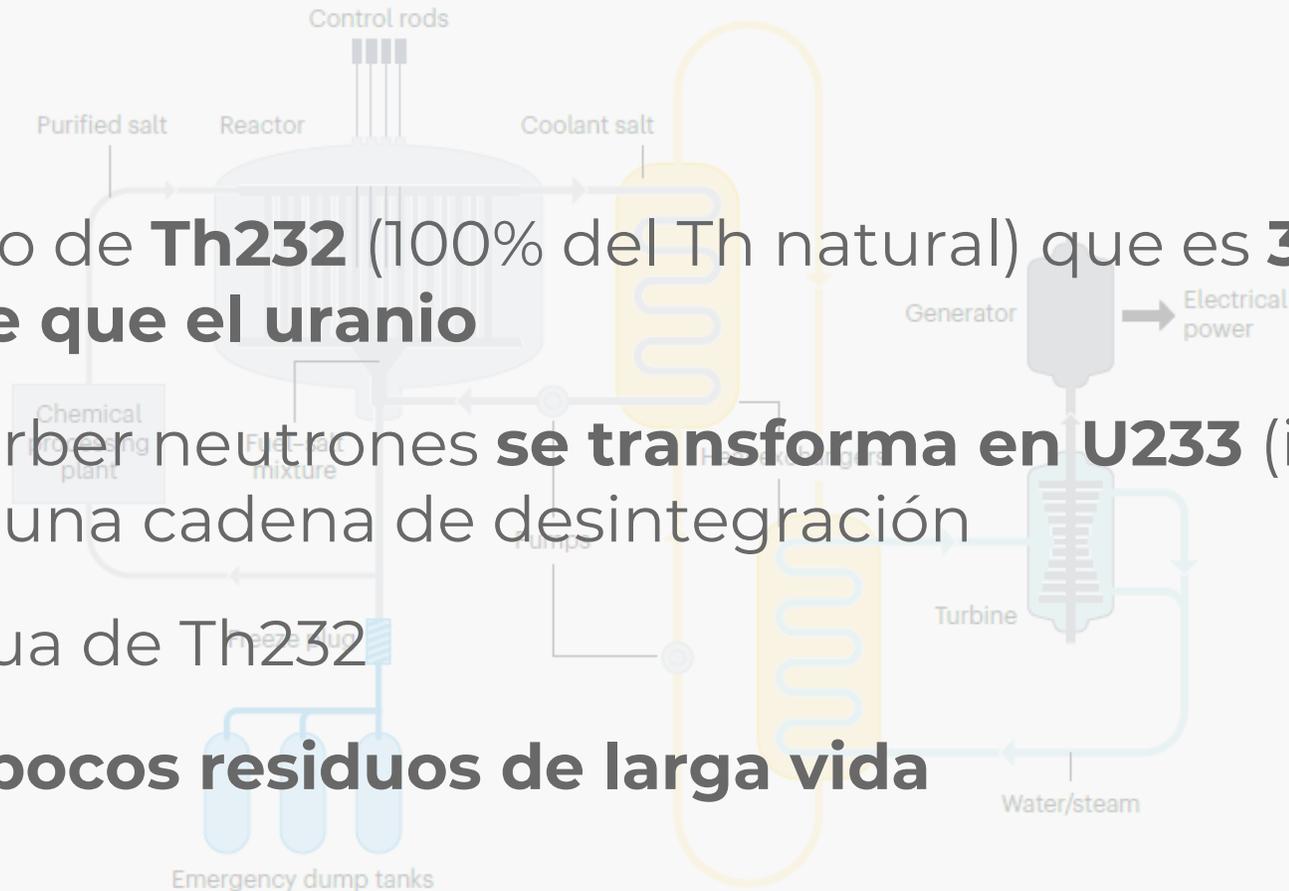
Características

Basado en el uso de **Th232** (100% del Th natural) que es **3 veces más abundante que el uranio**

El Th232 al absorber neutrones **se transforma en U233** (isótopo físil) a través de una cadena de desintegración

Recarga continua de Th232

Producción de **pocos residuos de larga vida**



Thorium Molten Salt Reactor (THMSR)

Propuesta **China State Shipbuilding Corporation** (China)

Portacontenedores de 24.000 TEU



Fuente: Jiangnan Shipyard

Thorium Molten Salt Reactor (THMSR)

Propuesta **Ulstein Shipyards**
(Noruega)

Buque de rescate, investigación
y recarga de buques eléctricos



Fuente: Ulstein shipyards

En la actualidad están apareciendo estudios con propuestas del uso de reactores para el transporte marítimo



Estos estudios están impulsados por el interés del sector marítimo en conocer las posibilidades del uso de esta tecnología en el mar



Conclusiones

- ▶ Desarrollo de **nuevos diseños**
- ▶ Búsqueda de
 - ✓ Eliminación de **residuos**
 - ✓ Mejora de la **seguridad**
 - ✓ Reducción de **costes**
- ▶ Algunos de ellos son buenos **candidatos** para su **implementación en buques de transporte**



Fuente: Newcleo

UPM

Muchas gracias

d.cuervo@upm.es



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
INGENIEROS NAVALES



POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID