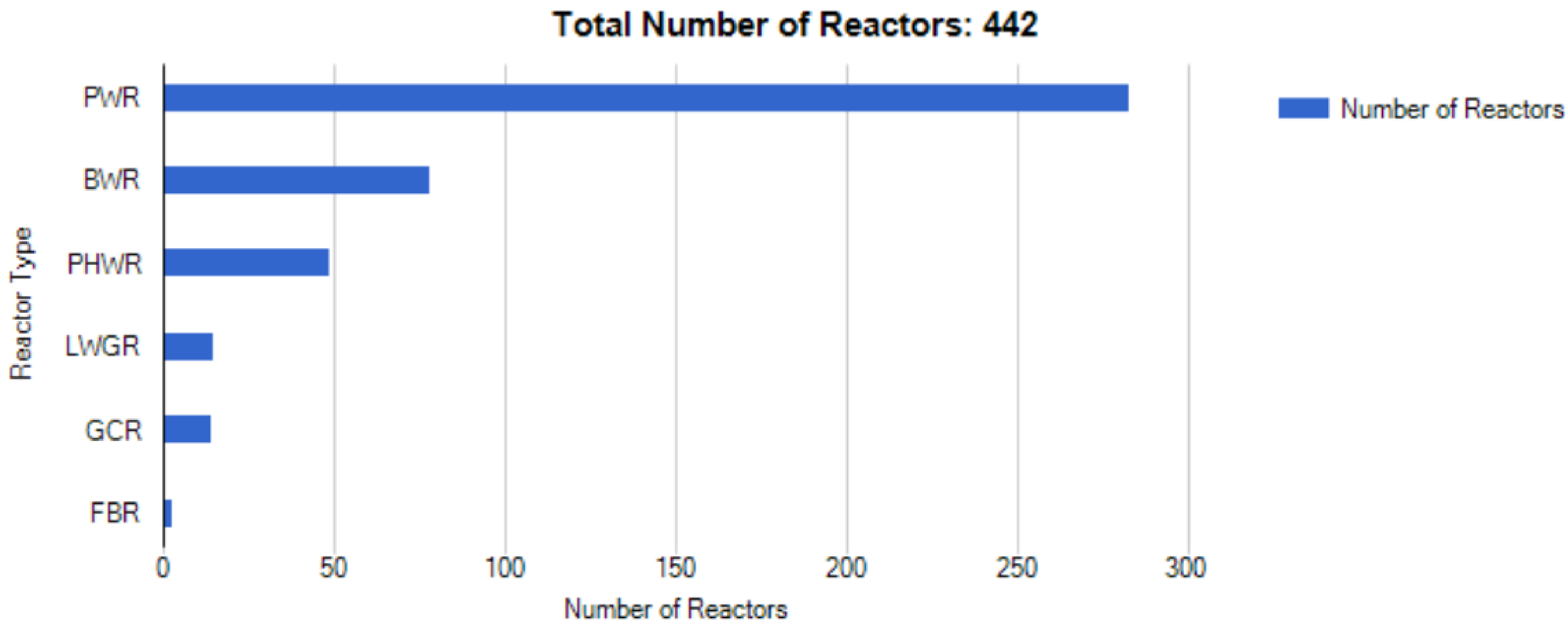
Tecnologías nucleares

Antonio González Fernández
Departamento de Física Aplicada III
Universidad de Sevilla

Parte 4: Otros tipos de reactores nucleares

Diferentes tipos de reactores en el mundo



Reactor Type	Reactor Type Descriptive Name	Nr of Reactors	Capacity (MW)
PWR	Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor	283	265020
BWR	Boiling Light-Water-Cooled and Moderated Reactor	78	75208
PHWR	Pressurized Heavy-Water-Moderated and Cooled Reactor	49	24592
LWGR	Light-Water-Cooled, Graphite-Moderated Reactor	15	10219
GCR	Gas-Cooled, Graphite-Moderated Reactor	14	7685
FBR	Fast Breeder Reactor	3	1369
Total		**442**	**384093**

El reactor de agua pesada (HWCR o CANDU)

Es un PWR

Usa uranio natural (0.72%)

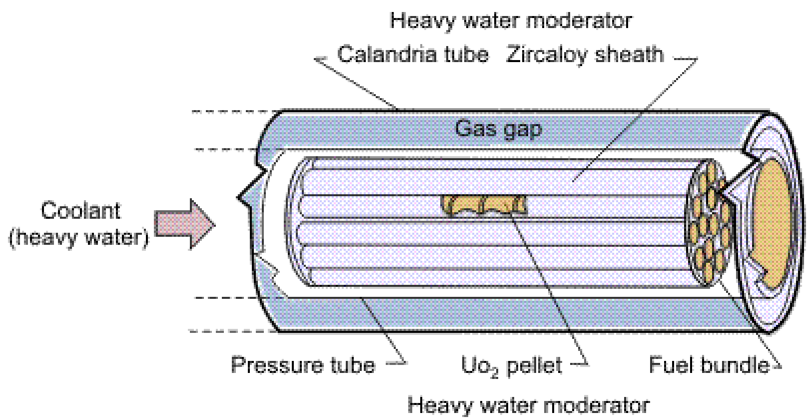
No puede usar H_2O por la absorción

Usa agua pesada D_2O

Menor moderación

Núcleo más grande

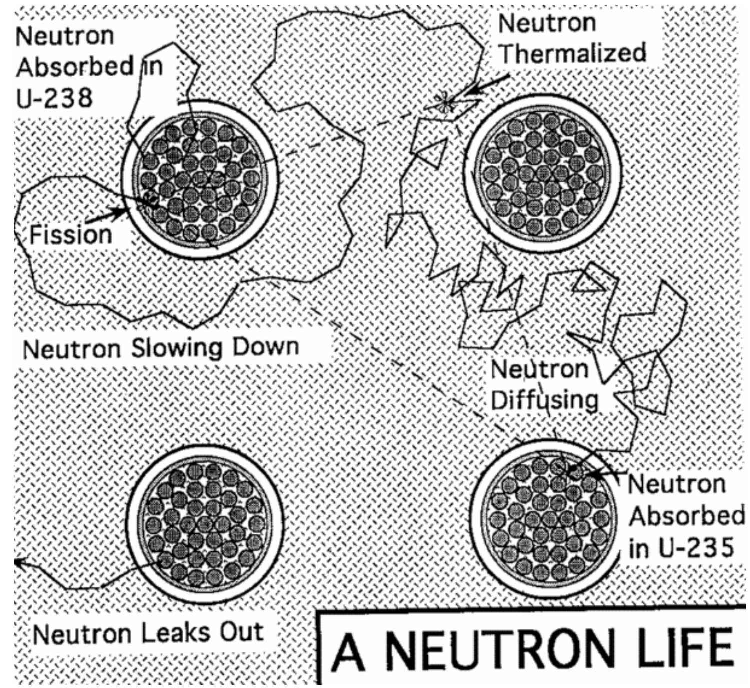
En lugar de una sola vasija, cada elemento combustible (*fuel bundle*) está rodeado por un tubo a presión

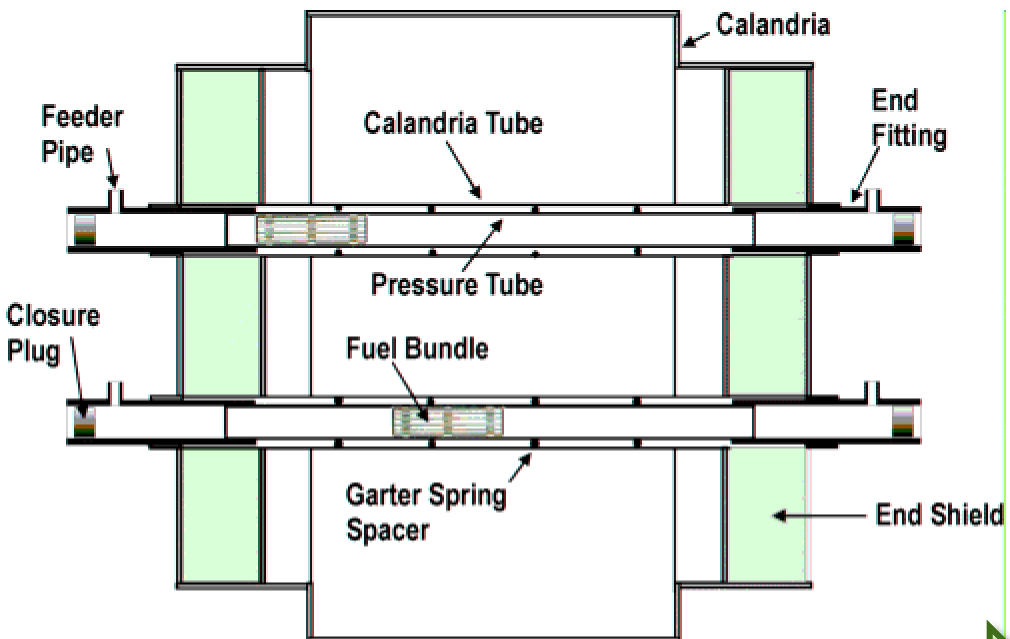


Fuel bundle

Los tubos a presión están inmersos en la *calandria*

La calandria es un tanque de agua pesada que actúa como moderador, pero no refrigerante

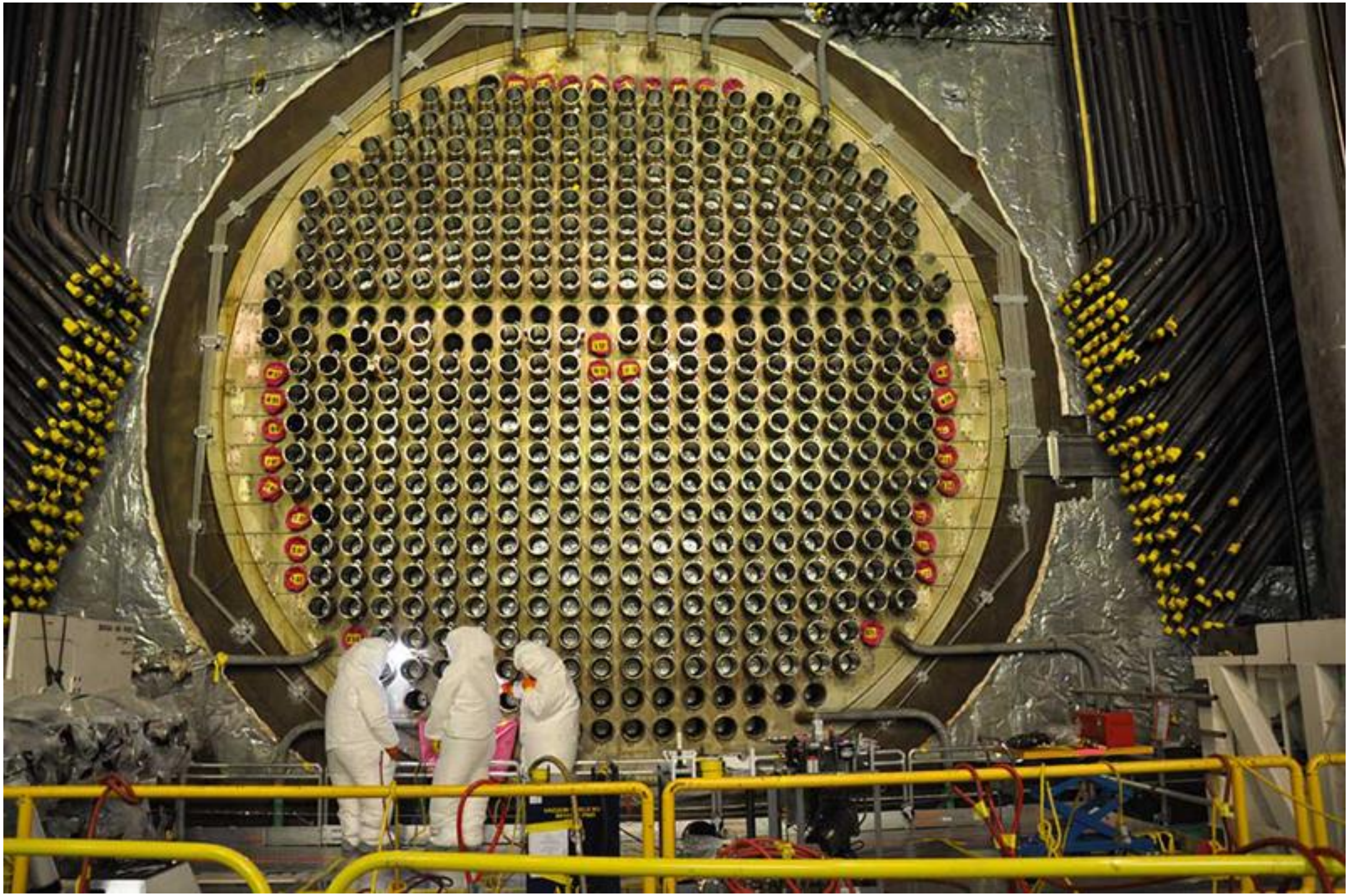




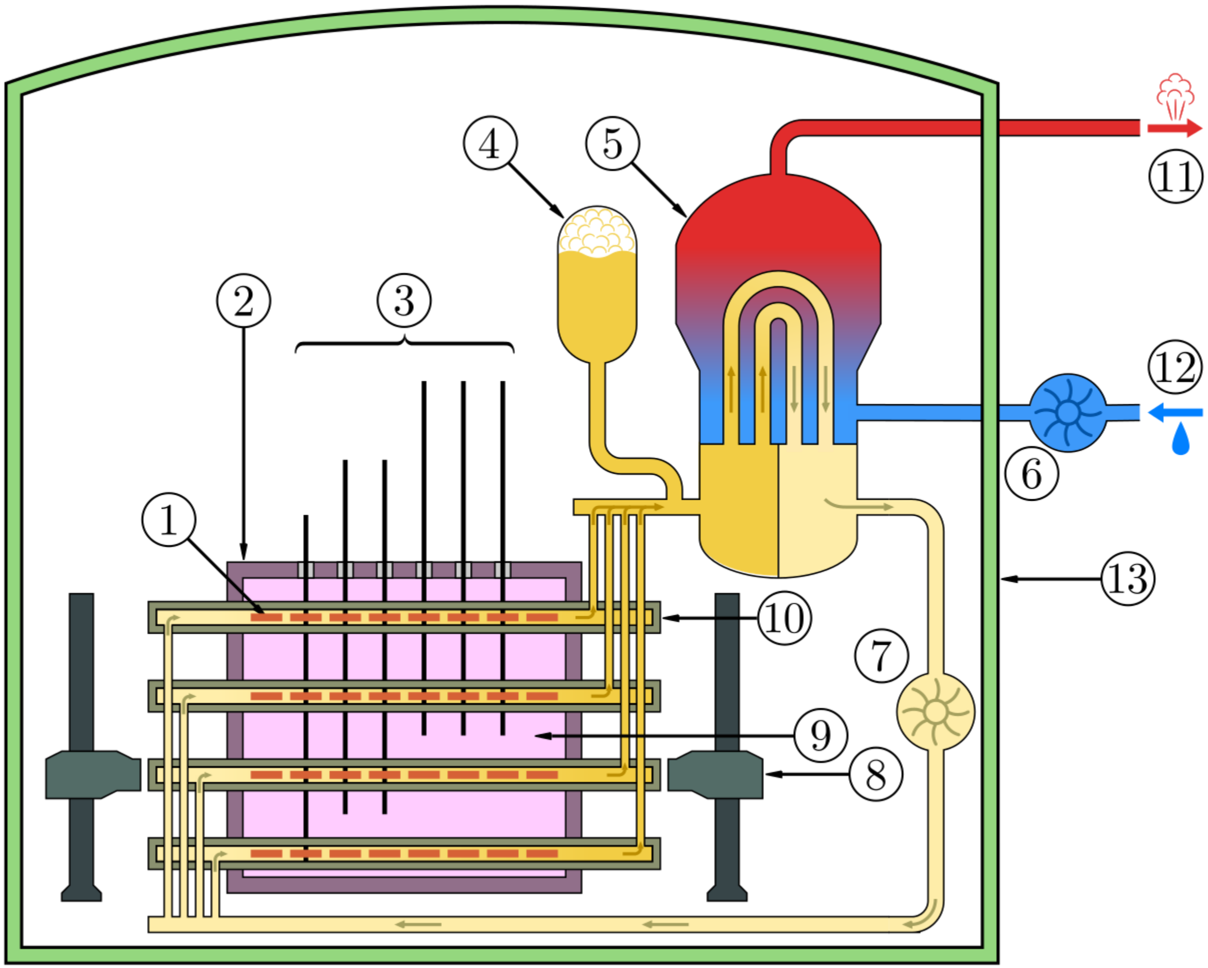
En un CANDU la recarga puede hacerse en marcha

Mayor disponibilidad

Aspecto de un reactor CANDU



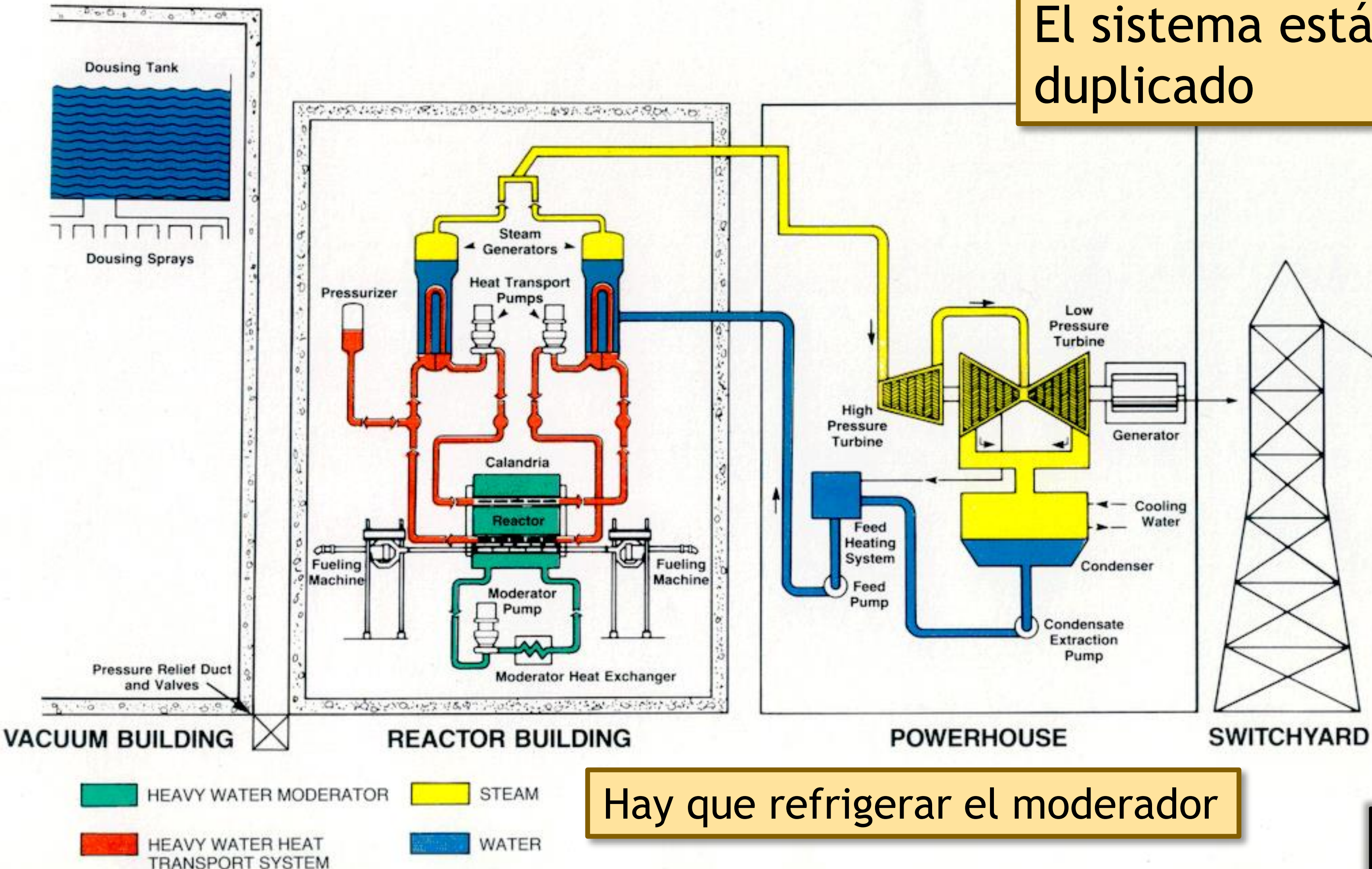
Partes de un reactor CANDU



1. Fuel bundle
2. Calandria (reactor core)
3. Adjuster rods
4. Heavy water pressure reservoir
5. Steam generator
6. Light water pump
7. Heavy water pump
8. Fueling machines
9. Heavy water moderator
10. Pressure tube
11. Steam going to steam turbine
12. Cold water returning from turbine
13. Containment building

El refrigerante hace un recorrido de ida y vuelta

El sistema está duplicado



Hay que refrigerar el moderador

Características de los reactores de agua pesada CANDU

Parte de los neutrones procede de la división del deuterio por incidencia de rayos γ

El tiempo de vida media es de segundos o incluso horas

Hay más neutrones diferidos

Mejora el control

Baja radiactividad del uranio natural

Puede recargarse en marcha

Se empuja el *bundle*

- Entra combustible
- Sale residuo

El coeficiente de vacío en un reactor CANDU

Si se forman burbujas en el refrigerante (D_2O)

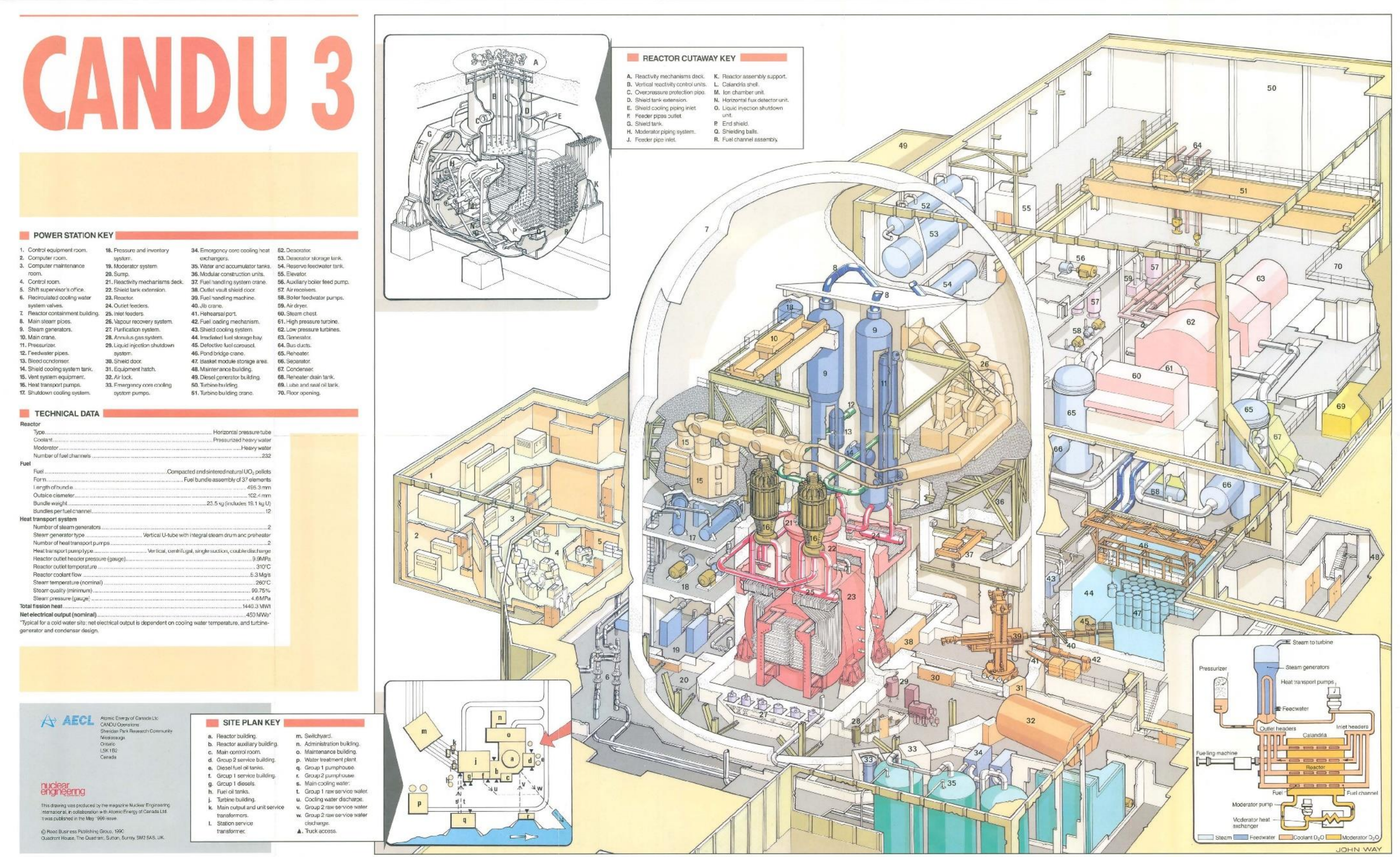
Disminuye la absorción

Se mantiene la moderación (que ocurre en el D_2O de la calandria)

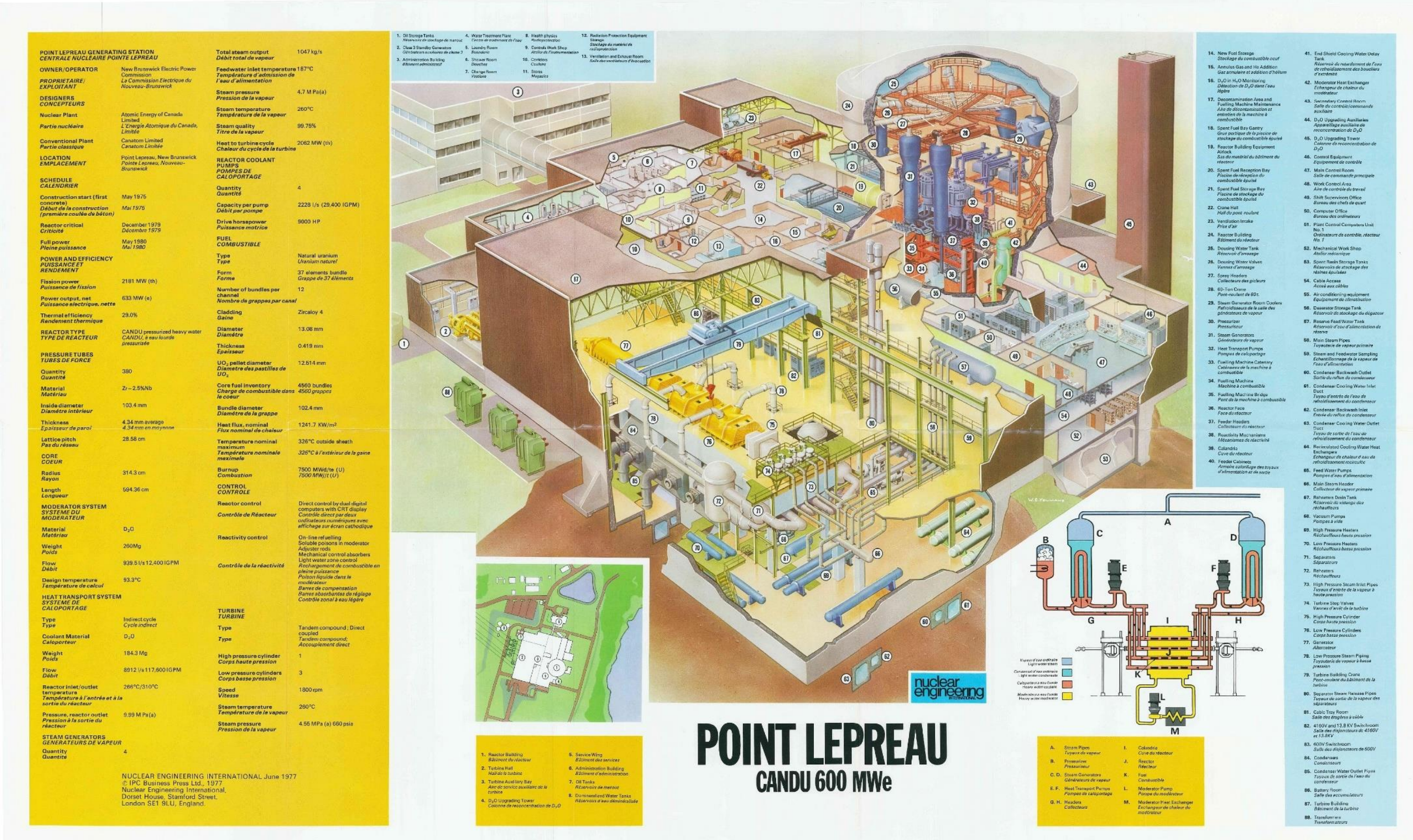
→ Tiene un coeficiente de vacío positivo → Inestabilidad

Su efecto es pequeño por el mayor control

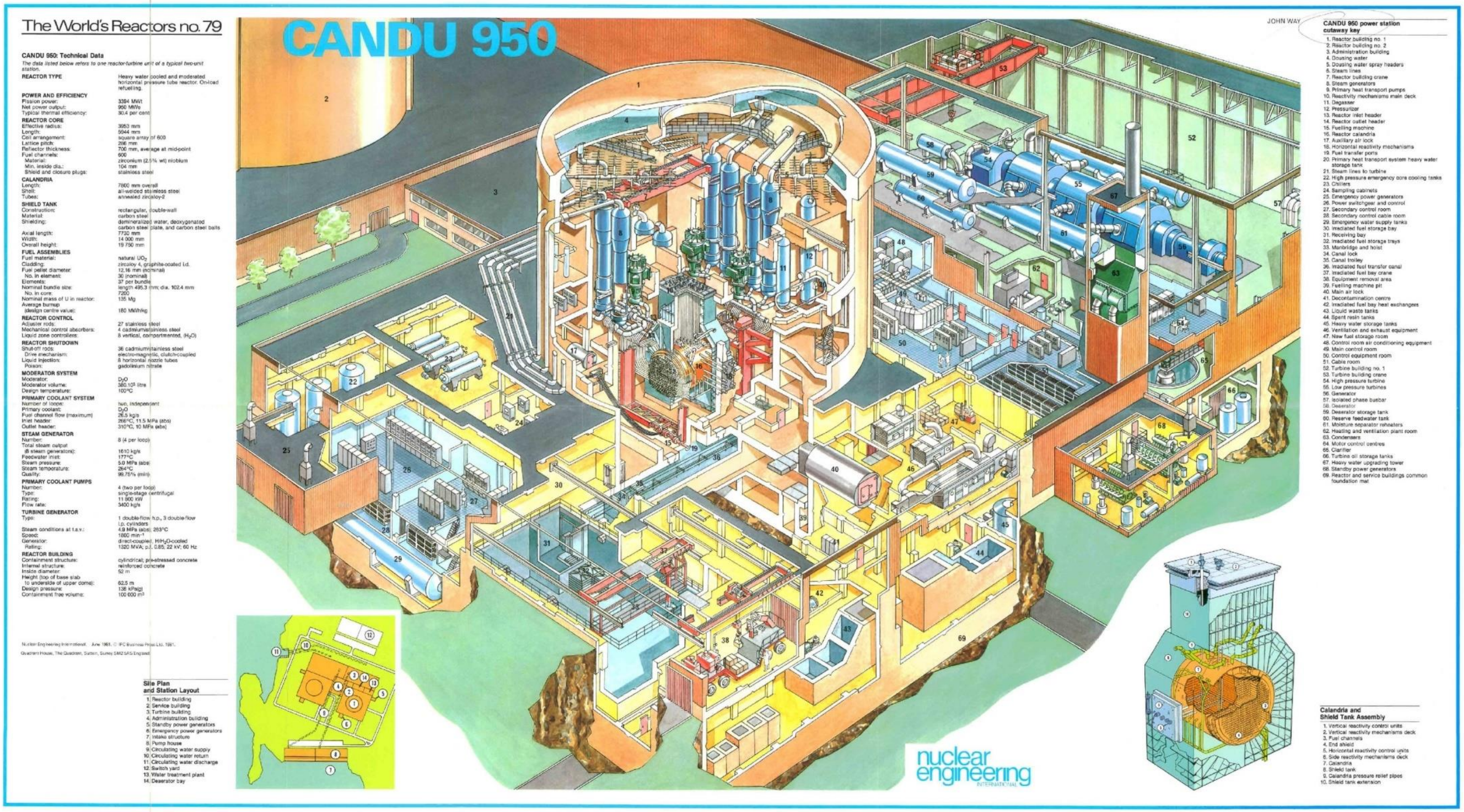
Ejemplo de reactor CANDU



Ejemplo de reactor CANDU



Ejemplo de reactor CANDU



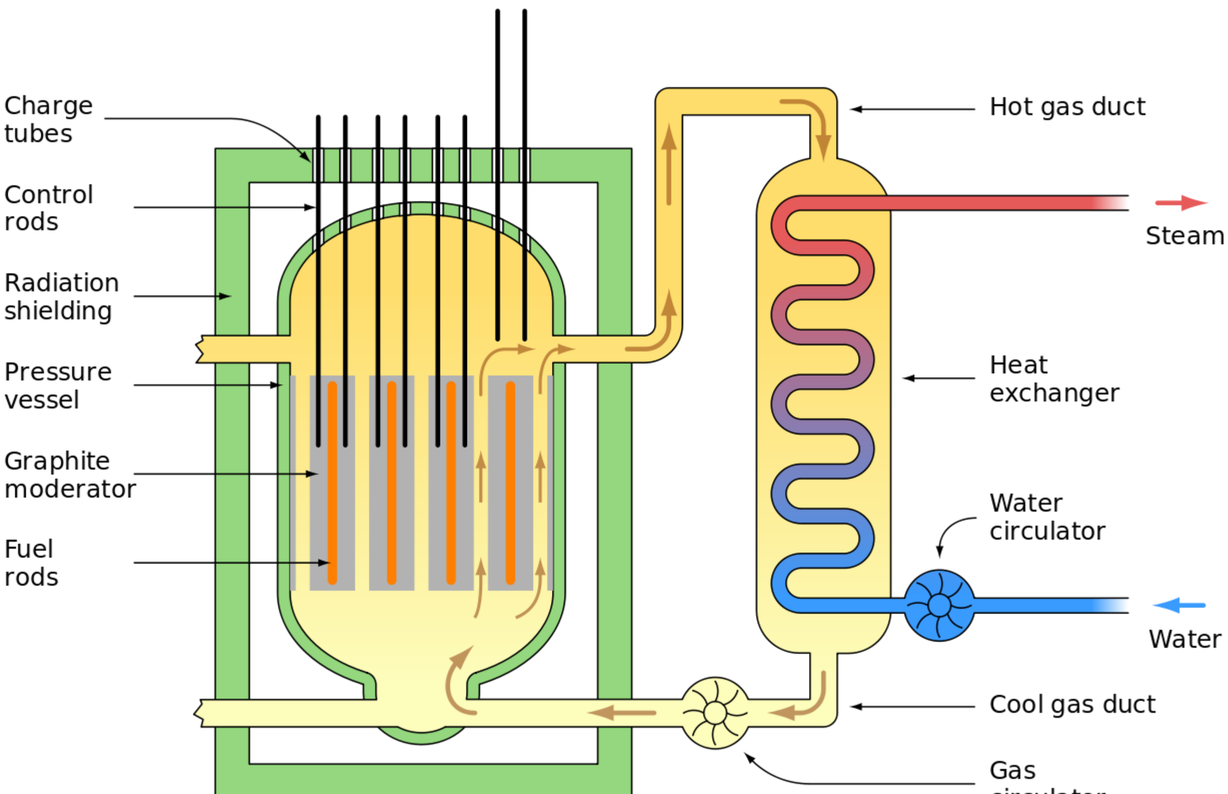
Reactores refrigerados por gas (GCR)

Refrigerante: CO_2

Moderador: Grafito

Existen varios diseños

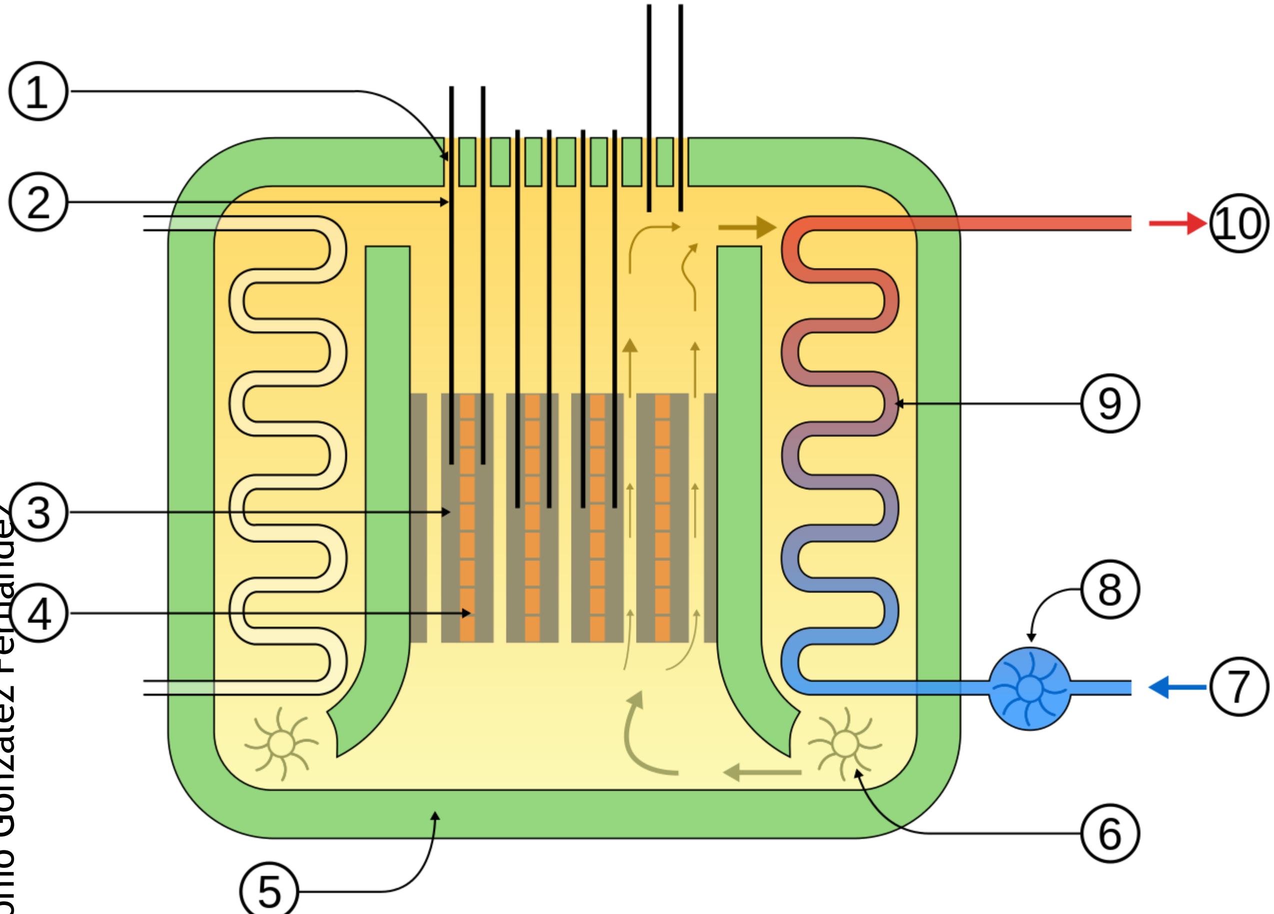
- MAGNOX (UK)
- UNGG (Fr)
- AGCR (UK)



El reactor es refrigerado por gas que va a un intercambiador de calor

Vandellós-1 era un UNGG

Reactores refrigerados por gas avanzados (AGCR o AGR)

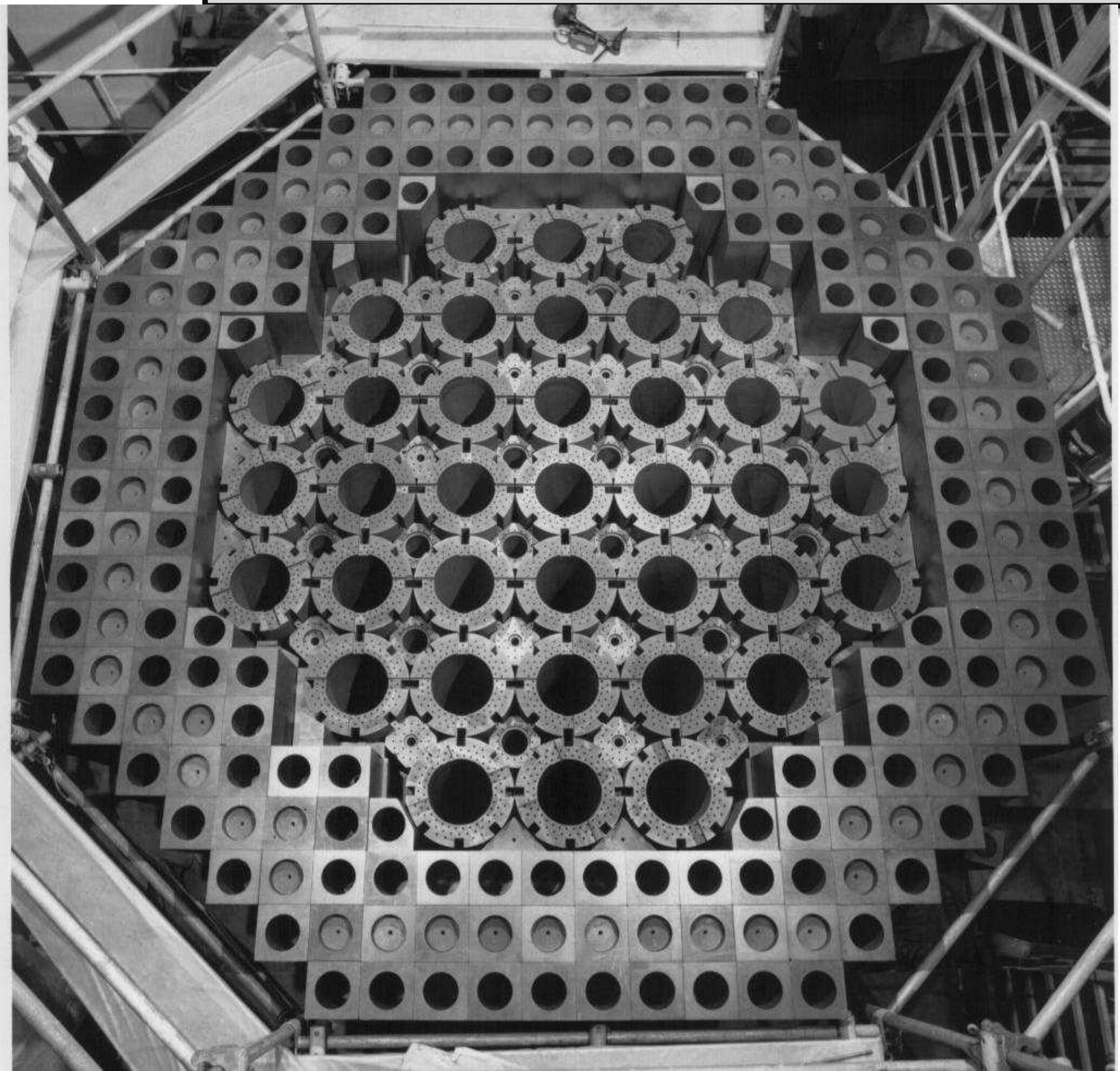


AGR

1. Charge tubes
2. Control rods
3. Graphite moderator
4. Fuel assemblies
5. Concrete pressure vessel and radiation shielding
6. Gas circulator
7. Water
8. Water circulator
9. Heat exchanger
10. Steam

Diseñado para ser compatible con las turbinas de una central de carbón

Núcleo y elemento combustible de un reactor AGR



Ventajas e inconvenientes de los AGR

Ventajas

- Mayor temperatura del refrigerante (~900K) → Mayor rendimiento (41%)
- Puede recargarse en marcha → Mayor disponibilidad

Inconvenientes

- Mayor tamaño del reactor
- Menor aprovechamiento del combustible
- Problemas mecánicos en la recarga → Menor disponibilidad

Ejemplo de reactor AGCR: Dungeness

The World's Reactors
No. 41 DUNGENESS B

DESIGNER AND CONTRACTOR: Atomic Power Constructions Limited.

OWNER AND OPERATOR: Central Electricity Generating Board.

LOCATION: Dungeness, Kent, England.

TYPE: Advanced Gas-cooled Reactor.

PROGRAMME: Site entry, preliminary work: October, 1965.
Main excavation commenced: January, 1966.
First reactor commissioned: July, 1970.
Second reactor commissioned: July, 1971.

CAPACITY: Nett electrical output 1,213 MW.
Gross generation: 1,320 MW.
Number of reactors: Two
Heat output per reactor: 1,450 MW.
Overall station efficiency: 41·8%.

All figures given below are for one reactor.

FUEL: Material: Uranium dioxide.
Pellet diameter: 0·57 in (1·45 cm).
Cladding: stainless steel.
Type of element: 36 pin 3 ring cluster in graphite sleeve.
Internal sleeve diameter: 7 in (17·8 cm).
Elements in one stringer, per channel: Eight.
Average initial enrichment: 1·6% U^{235}.
Average feed enrichment: 2·3% U^{235}.
Mean fuel rating at equilibrium: 9·5 MW/te U.
Channel reject irradiation: 18,000 MWD/te.
Initial weight of fuel: 163 te U

FUEL HANDLING: Refuelling cycle: Axial and radial shuffling.
Fuel and control rod handling: on load.
Fuelling machine utilisation: one machine using common charge face for both reactors.
Type of fuel decay store: pond.

REACTOR CORE: Moderator material: isotropic graphite.
Side shields: carbon and steel.
Weight of graphite in core and reflector: 1,123 tons.
Lattice geometry: square.
Lattice pitch: 15·5 in (39·5 cm).
Total number of fuel channels: 408.
Diameter of core channel: 9·6 in (24·4 cm).
Number of control channels: 57.
Active core diameter: 31 ft (9·45 m).
Active core height: 27 ft (8·25 m).

REACTOR CORE CONTROL: Coarse shut-down control: boron control rods.
Fine control: stainless steel control rods.
Number of control rods at equilibrium: 57.
Diameter of rods: 5·25 in (13·3 cm).
Active length: 23 ft (7·0 m).

PRESSURE VESSEL: Type: right cylinder, prestressed concrete.
Internal diameter: 65·5 ft (20 m).
Internal height 58 ft (17·7 m).
Top cap thickness: 20·9 ft (6·4 m).
Bottom slab thickness: 19·6 ft (6·0 m).
Side wall thickness: 12·6 ft (3·8 m).
Membrane thickness: 0·5 in (1·3 cm).
Prestressing method: B.B.R.V., 975 ton minimum ultimate.
Number of horizontal tendons: 582.
No. of vertical tendons: 384.
Tendon size: 163 wires of 7 mm dia.
Vessel coolant: demineralised water.
Internal insulation: stainless steel foil.

COOLANT: Gas: carbon dioxide.
Reactor gas inlet temperature: 292°C.
Channel gas outlet temperature: 675°C.
Circulator outlet gas pressure: 488 lb/sq in abs (34·3 kgf/cm²).
Core gas mass flow: 7,450 lb/sec (3,380 kg/sec).

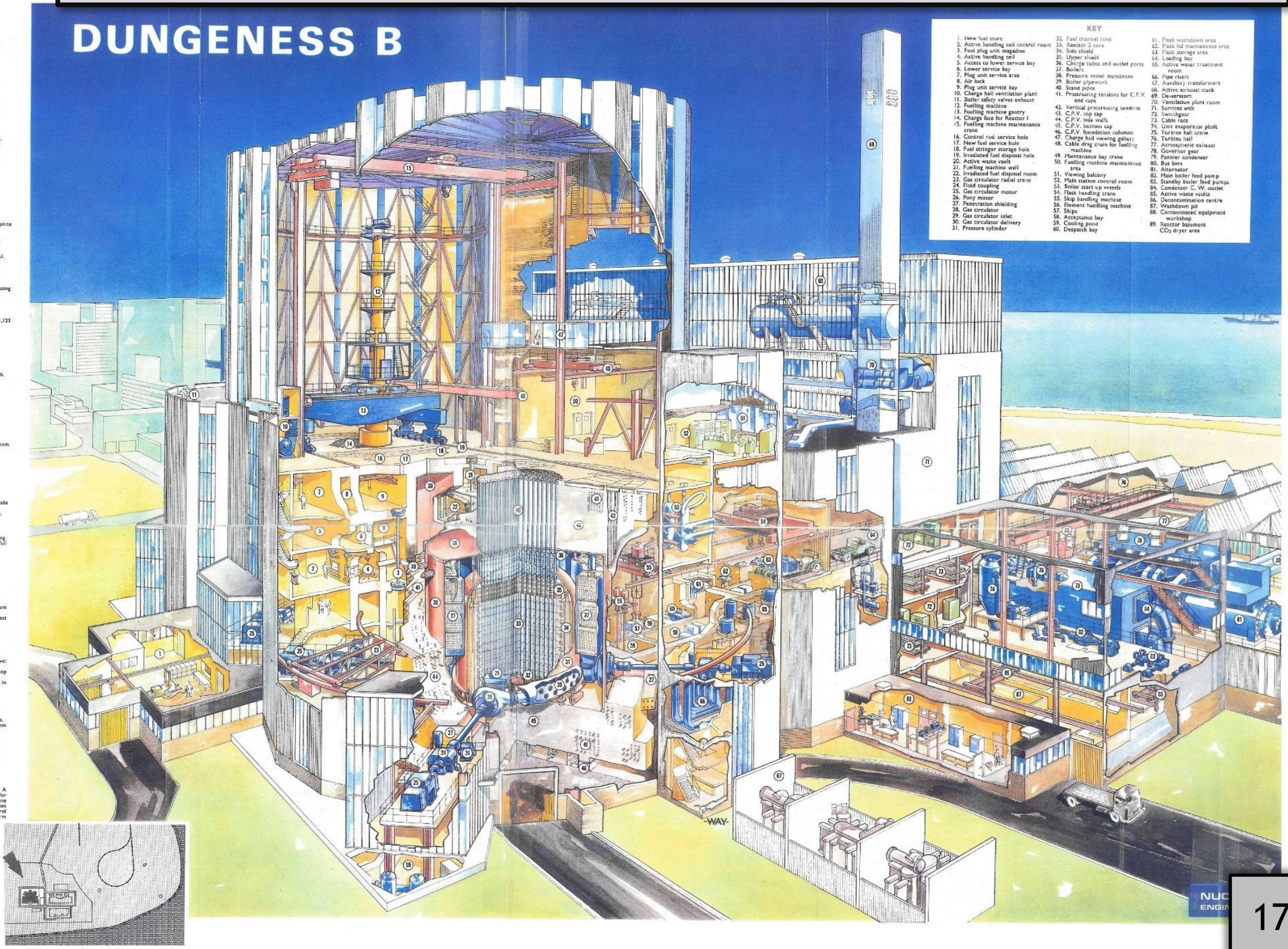
GAS CIRCULATORS: Number: Four.
Type of circulator: centrifugal, single stage.
Rotating speed at full load: 1,424 rev/min.
Flow variation: speed variation by fluid coupling.
Normal operating control range: 20% to full speed.
Main drive motor: induction motor.
Installed motor rating: 14,600 hp.
Auxiliary drive: AC pony motor.

BOILERS: Number: Four.
Type: once through.
Main steam flow: 3,714 klb/hr (1,690 te/hr).
Reheat steam flow: 3,433 klb/hr (1,560 te/hr).
Feed temperature: 163°C.
Lower section tube material: Carbon steel.
Middle section tube material: 9% chromium steel.
Upper section tube material: EN 316 stainless steel.
Base tube diameter: 1·5 in (3·8 cm).
External tube surface: low fin.

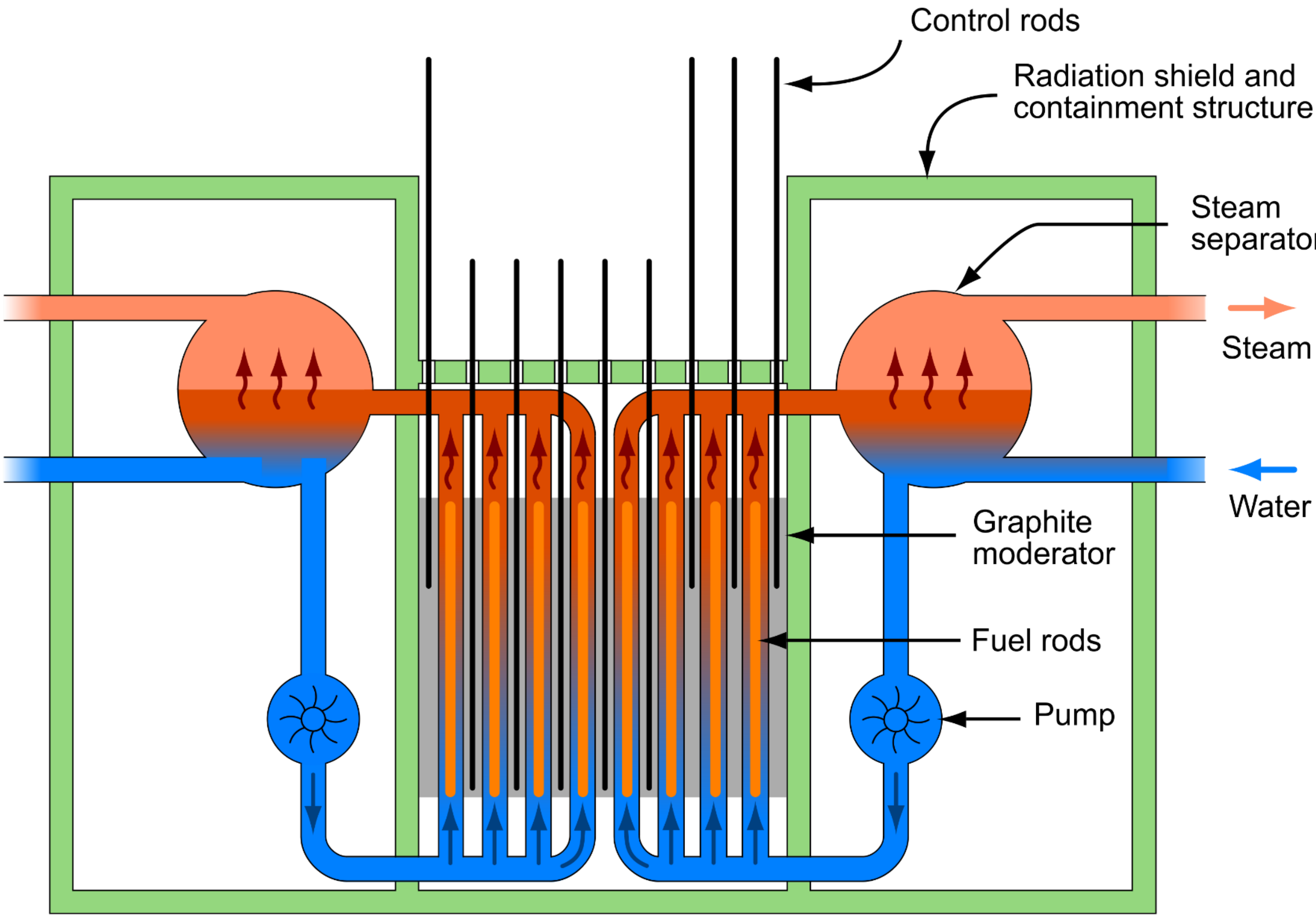
TURBINE: Number: One
Type: single shaft.
Number of cylinders: Five.
Superheat steam pressure at turbine stop valve: 2,315 lb/sq in abs (163 kg/cm²).
Superheat steam temperature at turbine stop valve: 566°C.
Reheat steam pressure at IP cylinder: 549 lb/sq in abs (38·6 kg/cm²).
Reheat steam temperature: 566°C.
Final feed temperature: 159°C.
Number of feed heaters: Four.
Boiler feed pump drive: turbine.
Boiler feed pump drive rating: 21,600 BHP.
Condenser type: axial twin pannier, single pass.
Turbine exhaust pressure: 1·1 in Hg (28 mm Hg).
CW inlet temperature: 13°C.
CW flow: 255,000 gal/min (4·5×10⁴ m³/min).

ALTERNATOR: Output at max. continuous rating: 660 MW.
Rating at MCR: 776 MVA.
Power factor: 0·85.
Terminal voltage: 23·5 kV.
Cooling—stator windings: water cooled.
—rotor: hydrogen cooled.

STATION CONTROL: Centralised control of the station is provided. A comprehensive computer system is used for direct digital control of the reactor, turbine run-up and other functions. Cathode ray tubes display all the plant variables in the control room and the computers are also used for alarm analysis.



Reactor tipo canal (*Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy*, RBMK)

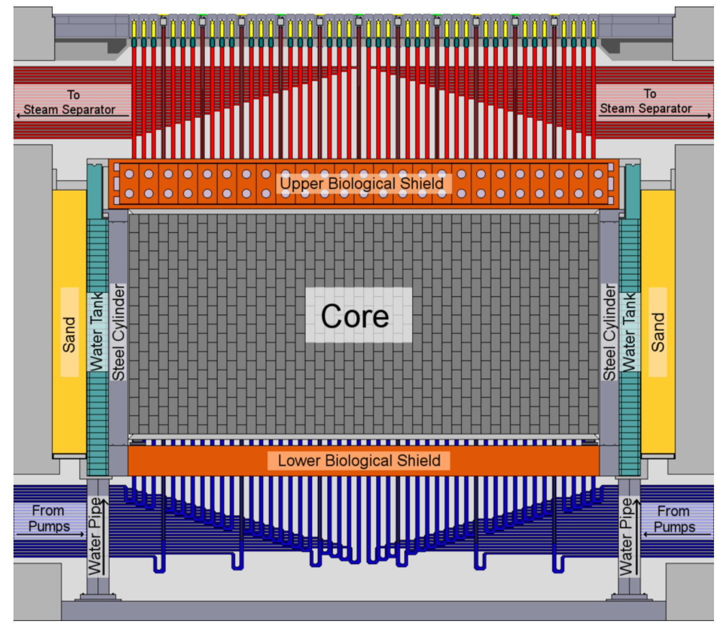


Propiedades de un RBMK

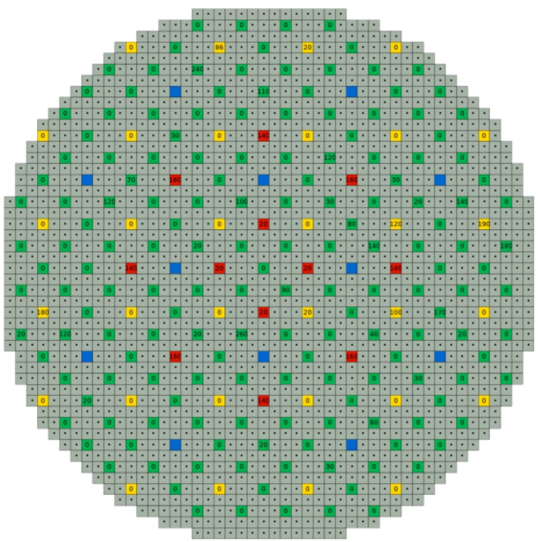
Moderador: grafito

Refrigerante: agua (dos circuitos)

El agua a presión pasa por los tubos que atraviesan un bloque de grafito



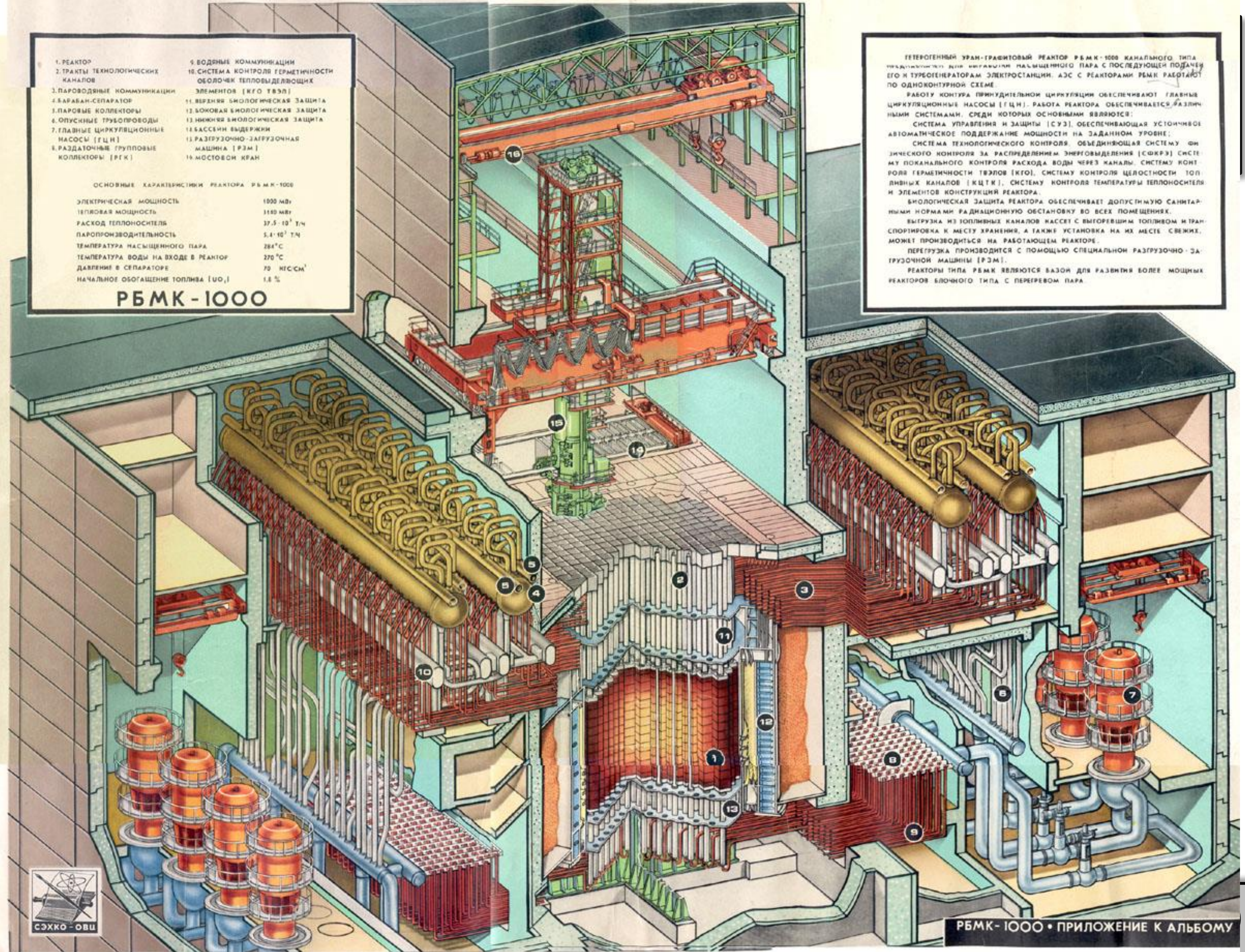
Permite recarga en operación



Las varillas de control entran desde arriba

Hay varillas permanentes

El coeficiente de vacío es positivo



1. РЕАКТОР
2. ТРАКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛОВ
3. ПАРОВОДЯНЫЕ КОММУНИКАЦИИ
4. БАРАБАН-СЕПАРАТОР
5. ПАРОВЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ
6. ОПУСКНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ
7. ГЛАВНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ НАСОСЫ [ГЦН]
8. РАЗДАТОЧНЫЕ ГРУППОВЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ [РГК]
9. ВОДЯНЫЕ КОММУНИКАЦИИ
10. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ [КГО ТВЭЛ]
11. ВЕРХНЯЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА
12. БОКОВАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА
13. НИЖНЯЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА
14. БАССЕЙН ВЫДЕРЖКИ
15. РАЗГРУЗОЧНО-ЗАГРУЗОЧНАЯ МАШИНА [РЗМ]
16. МОСТОВОЙ КРАН

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА РБМК-1000

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ	1000 МВт
ТЕПЛОВАЯ МОЩНОСТЬ	3140 МВт
РАСХОД ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ	$37.5 \cdot 10^3$ Т/Ч
ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ	$5.4 \cdot 10^3$ Т/Ч
ТЕМПЕРАТУРА НАСЫЩЕННОГО ПАРА	284 °С
ТЕМПЕРАТУРА ВОДЫ НА ВХОДЕ В РЕАКТОР	270 °С
ДАВЛЕНИЕ В СЕПАРАТОРЕ	70 КГС/СМ^2
НАЧАЛЬНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ ТОПЛИВА [UO_2]	1,8 %

РБМК-1000

ГЕТЕРОГЕННЫЙ УРАН-ГРАФИТОВЫЙ РЕАКТОР РБМК-1000 КАНАЛЬНОГО ТИПА ПРЕДНАЗНАЧЕН ДЛЯ ВЫРАБОТКИ НАСЫЩЕННОГО ПАРА С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПОДАЧЕЙ ЕГО К ТУРБОГЕНЕРАТОРАМ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ. АЭС С РЕАКТОРАМИ РБМК РАБОТАЮТ ПО ОДНОКОНТУРНОЙ СХЕМЕ.

РАБОТУ КОНТУРА ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ОБЕСПЕЧИВАЮТ ГЛАВНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ НАСОСЫ [ГЦН]. РАБОТА РЕАКТОРА ОБЕСПЕЧИВАЕТСЯ РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ, СРЕДИ КОТОРЫХ ОСНОВНЫМИ ЯВЛЯЮТСЯ:

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ [СУЗ], ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ УСТОЙЧИВОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОДДЕРЖАНИЕ МОЩНОСТИ НА ЗАДАННОМ УРОВНЕ;

СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, ОБЪЕДИНЯЮЩАЯ СИСТЕМУ ФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ [СФКРЭ] СИСТЕМУ ПОКАНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ РАСХОДА ВОДЫ ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ, СИСТЕМУ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ТВЭЛОВ [КГО], СИСТЕМУ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ТОПЛИВНЫХ КАНАЛОВ [КЦТК], СИСТЕМУ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РЕАКТОРА.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА РЕАКТОРА ОБЕСПЕЧИВАЕТ ДОПУСТИМУЮ САНИТАРНЫМИ НОРМАМИ РАДИАЦИОННУЮ ОБСТАНОВКУ ВО ВСЕХ ПОМЕЩЕНИЯХ.

ВЫГРУЗКА ИЗ ТОПЛИВНЫХ КАНАЛОВ КАССЕТ С ВЫГОРЕВШИМ ТОПЛИВОМ И ТРАНСПОРТИРОВКА К МЕСТУ ХРАНЕНИЯ, А ТАКЖЕ УСТАНОВКА НА ИХ МЕСТЕ СВЕЖИХ, МОЖЕТ ПРОИЗВОДИТЬСЯ НА РАБОТАЮЩЕМ РЕАКТОРЕ.

ПЕРЕГРУЗКА ПРОИЗВОДИТСЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНОЙ РАЗГРУЗОЧНО-ЗАГРУЗОЧНОЙ МАШИНЫ [РЗМ].

РЕАКТОРЫ ТИПА РБМК ЯВЛЯЮТСЯ БАЗОЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ БОЛЕЕ МОЩНЫХ РЕАКТОРОВ БЛОЧНОГО ТИПА С ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА.

РБМК-1000 • ПРИЛОЖЕНИЕ К АЛЬБОМУ

Los RMBK tras el accidente de Chernobyl

Siguen funcionando 11 RBMK en el mundo (todos en Rusia)

Se instalaron varillas de control permanentes

Se aumento el número de varillas de control móviles

Se han sustituido todos los tubos de presión

Se actualizó la electrónica y se impidió la desconexión de los sistemas de seguridad

Reactores reproductores (*liquid metal fast breeder reactors*, LMFBR)

El ^{238}U es un material fértil

$$^{238}_{92}U + n \rightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{94}Pu$$

Si una manta (*blanket*) de ^{238}U es bombardeada con neutrones rápidos, se transforma parcialmente en ^{239}Pu

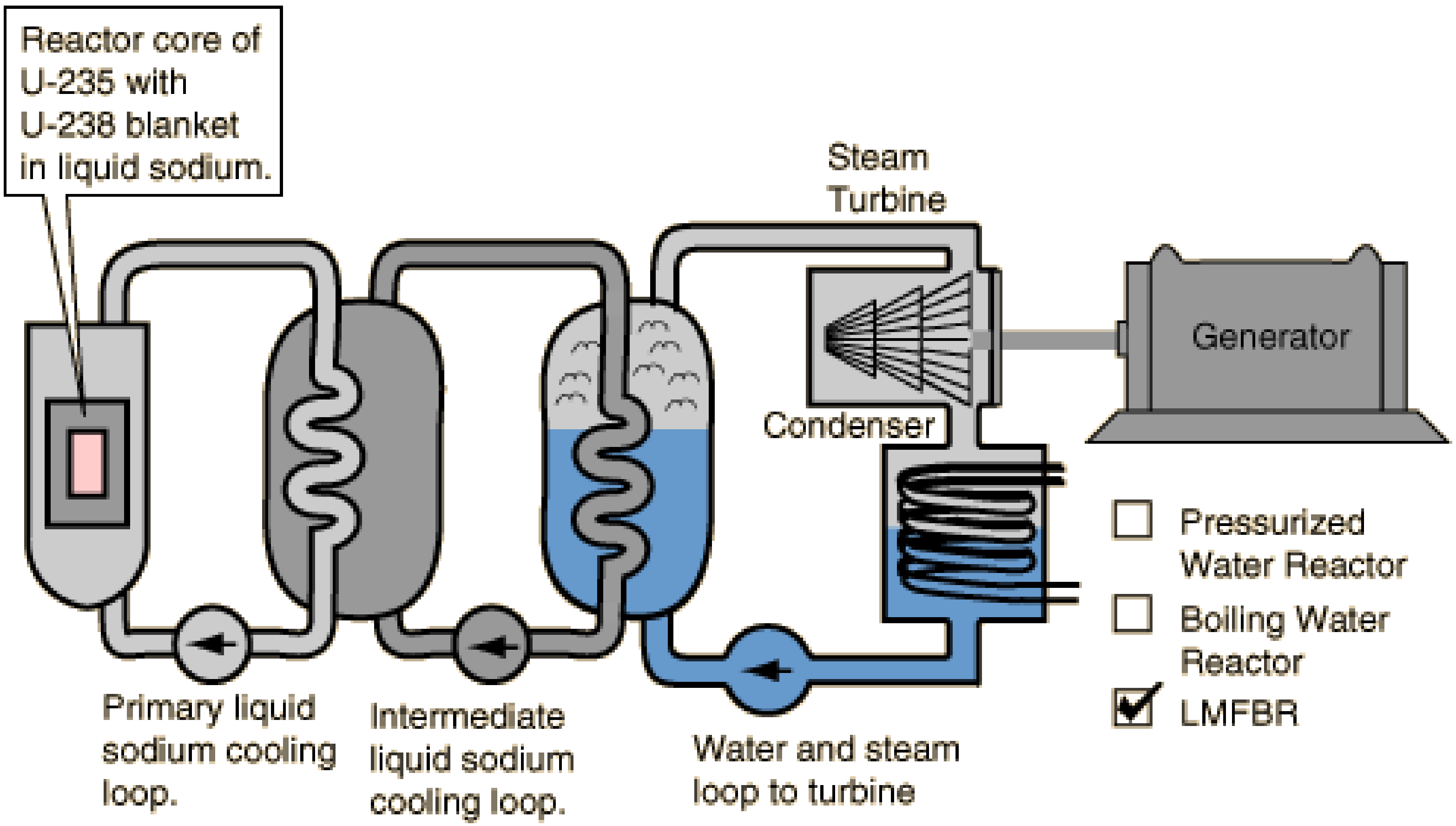
Después puede separarse químicamente (Pu ≠ U)

No puede tener moderador, y absorber lo menos posible

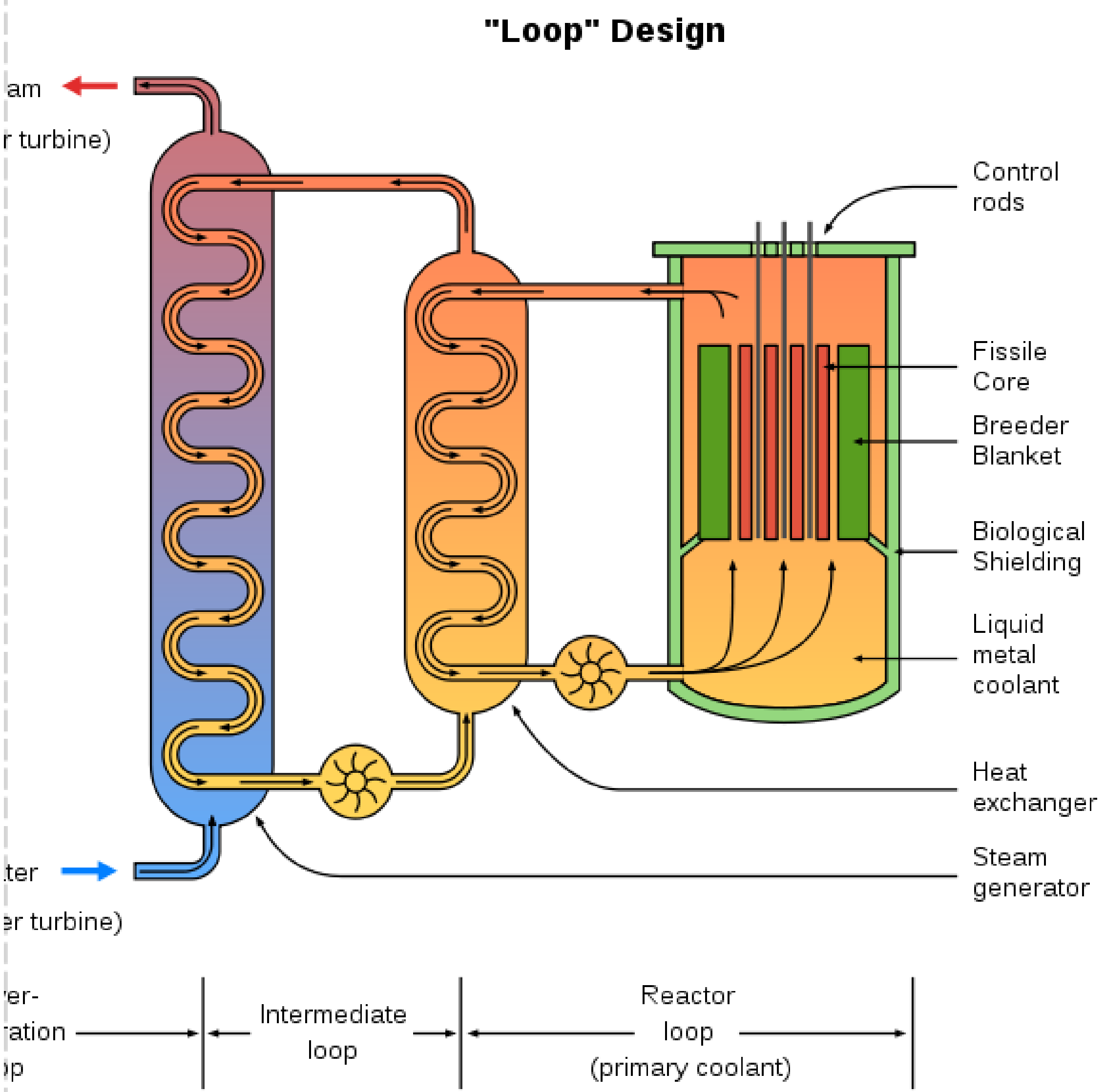
→ No puede usar agua como refrigerante

Se usa sodio líquido

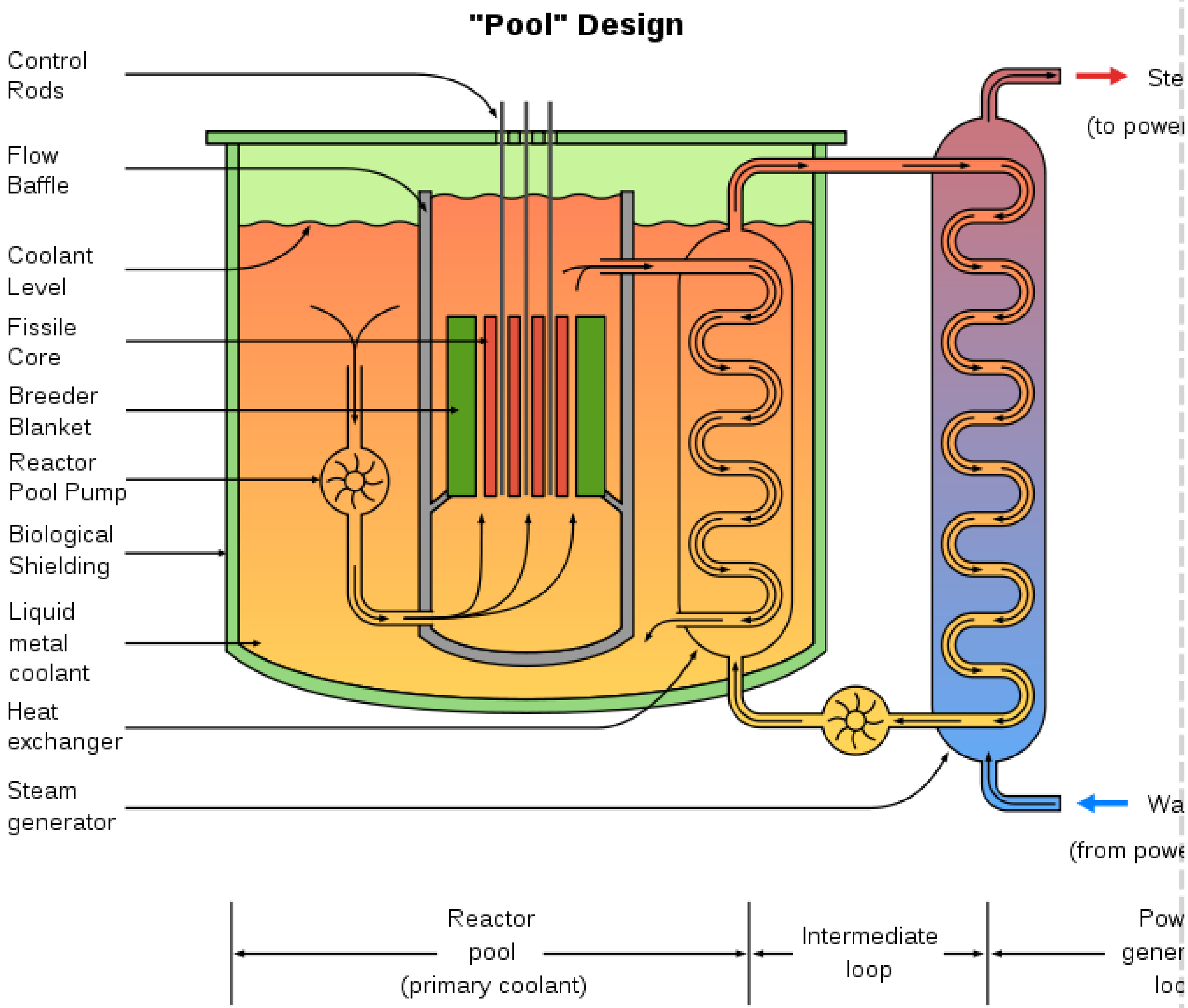
Esquema básico de un LMFBR



Reactores reproductores (diseño *loop*)



Reactores reproductores (diseño en *pool*)



Usa ^{239}Pu como combustible

Ventajas e inconvenientes de los reactores reproductores

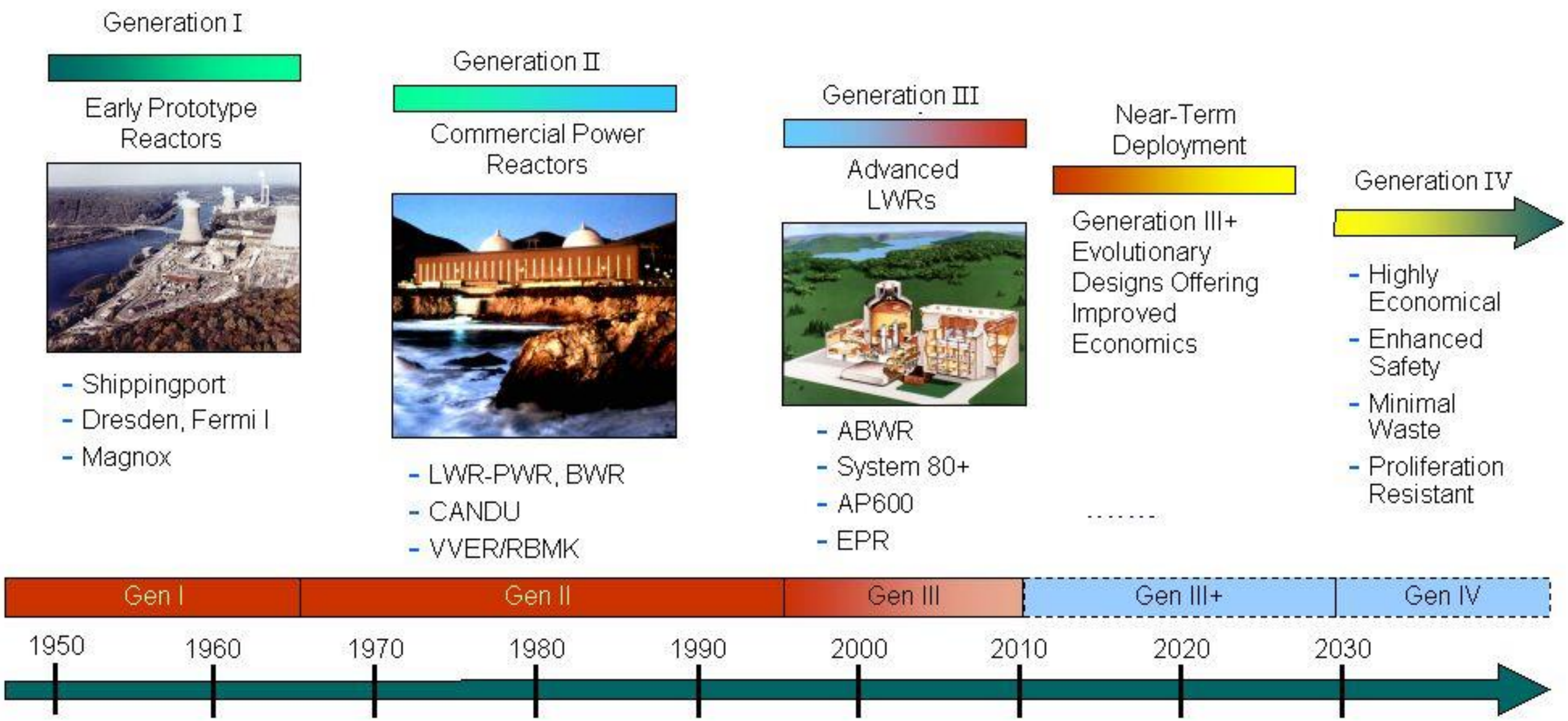
Ventajas

- Producen energía y combustible
- Permiten aprovechar el ^{238}U
- De décadas se pasa a siglos de reservas

Inconvenientes

- El sodio líquido requiere que todo el circuito sea calentado a >98ºC
- El uso de sodio líquido es peligroso (reactivo)
- Usan y generan plutonio
  - Impopular
  - Riesgo de proliferación nuclear
- No es rentable mientras el ^{235}U sea barato

Las generaciones de los reactores



El cambio en el mercado nuclear requiere nuevos diseños más seguros y más eficientes

Estamos en la generación II y parte de la III

Reactores evolucionarios (Generación III)

Evoluciones de los ya existentes

- APWR: Advanced Pressurized Water Reactor
- ABWR: Advanced Boiling Water Reactor
- CANDU mejorado
- AP600 (de Westinghouse, sustituido por la AP1000)
- System 80+ (otra variante de APWR)
- Advanced Heavy Water Reactor (India): Similar a CANDU, pero usa torio

Más en ARIS (IAEA)

Generación III+ y Generación IV

Generación III+: Cambios sustanciales en los diseños

- CANDU avanzado
- AP1000
- EPR: European Pressurized Reactor
- Economic Simplified Boiling Water Reactor: evolución del ABWR

Generación IV: nuevos diseños

- VHTR: Very High Temperature reactor
- MSR: Molten Salt Reactor
- Varios reactores reproductores

Mejoras en los PWR

APWR (Mitsubishi):

Incluye reflector

1700MWe

CANCELADO

Más medidas de seguridad

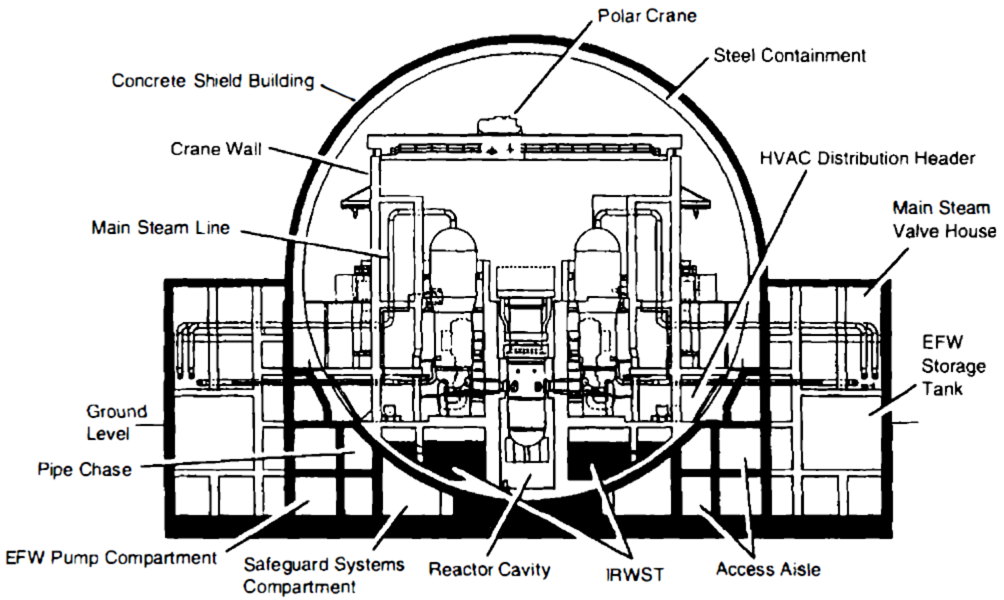
System 80+

Edificio esférico

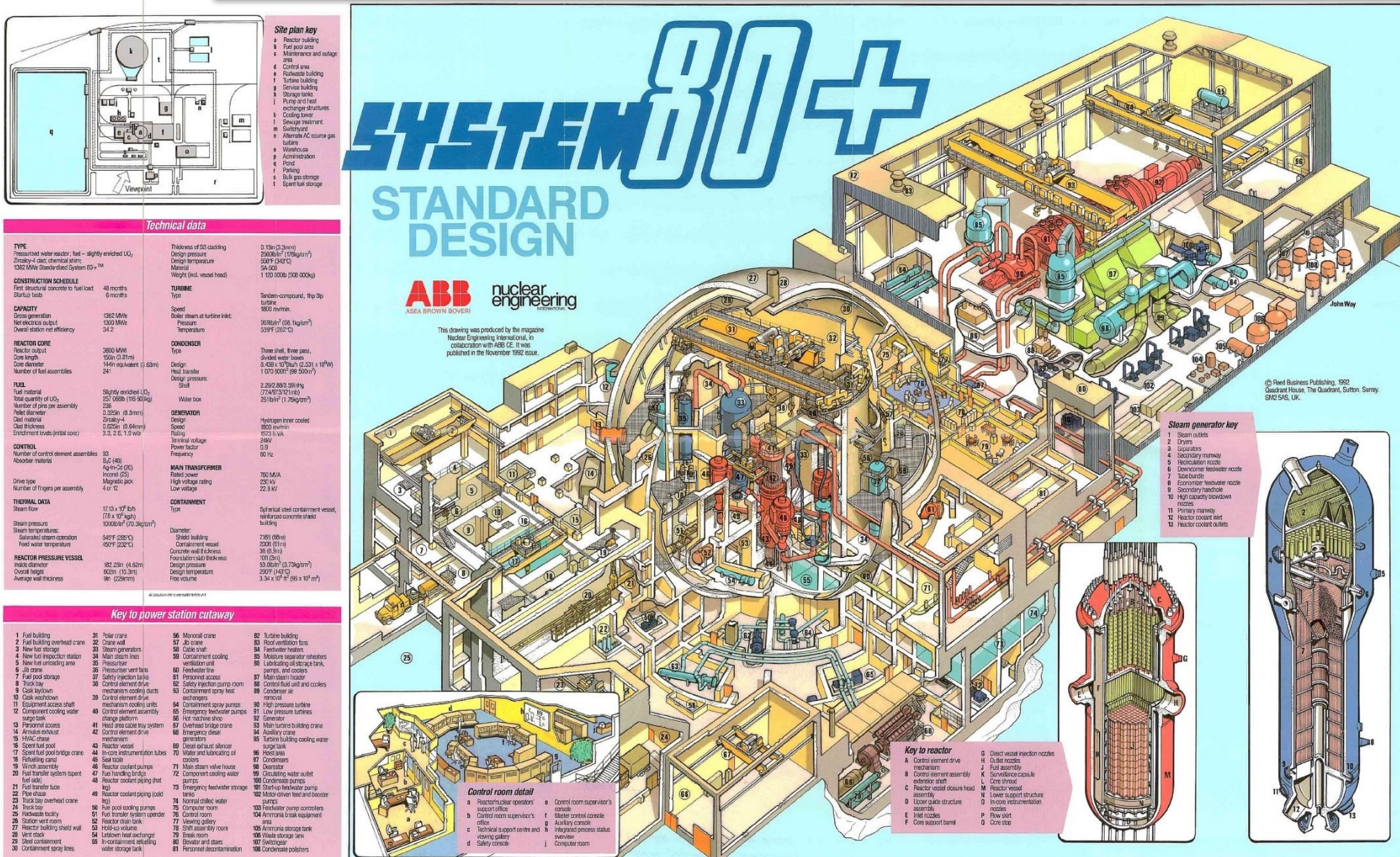
Más agua en el primario

Varillas de control parciales

Hay en EEUU y Corea



Sistema 80+


SYSTEM 80+
STANDARD DESIGN
ABB
ASEA BROWN BOVERI
nuclear engineering
INTERNATIONAL
This drawing was produced by the magazine Nuclear Engineering International, in collaboration with ABB CE. It was published in the November 1992 issue.
Site plan key
Technical data
Key to power station cutaway
Steam generator key
Key to reactor
Control room detail
John Way
© Reed Business Publishing, 1992 Quadrant House, The Quadrant, Sutton, Surrey. SM2 5AS, UK.

El EPR (*European Pressurized Reactor*)

4 sistemas de refrigeración

17% menos U

1650MWe

Varios en construcción

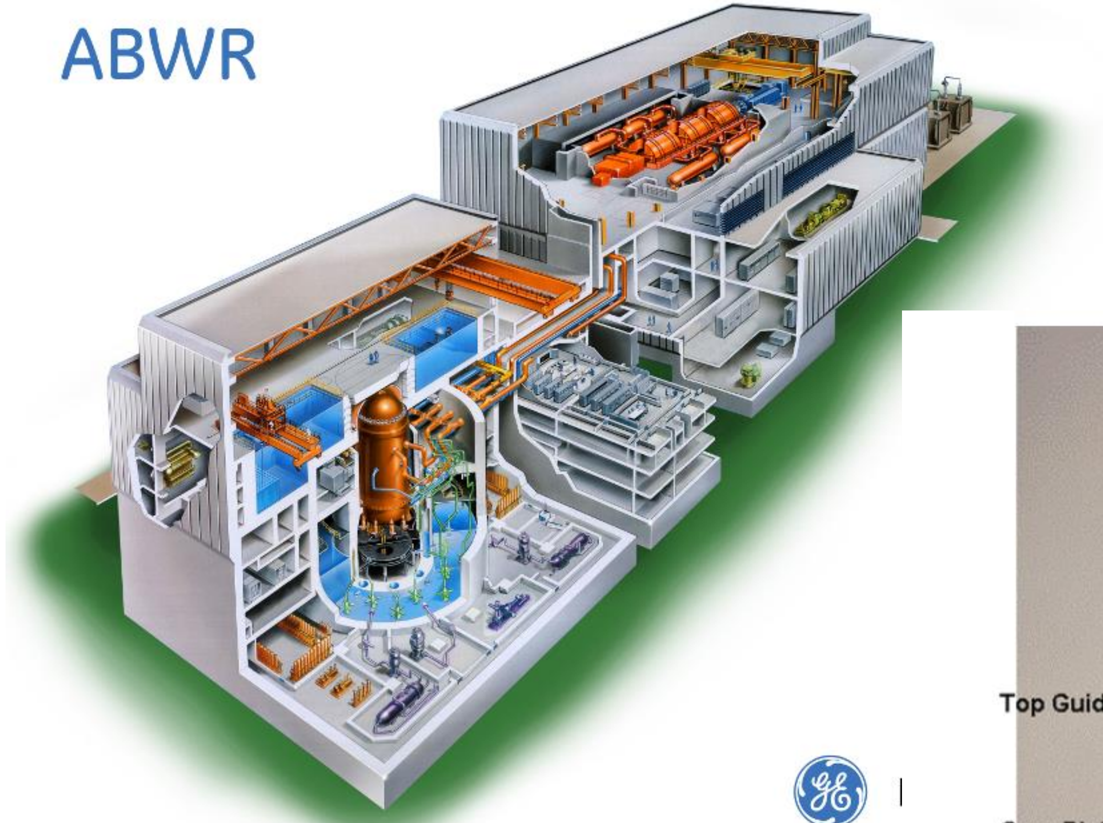
Costes desorbitados

Retrasos

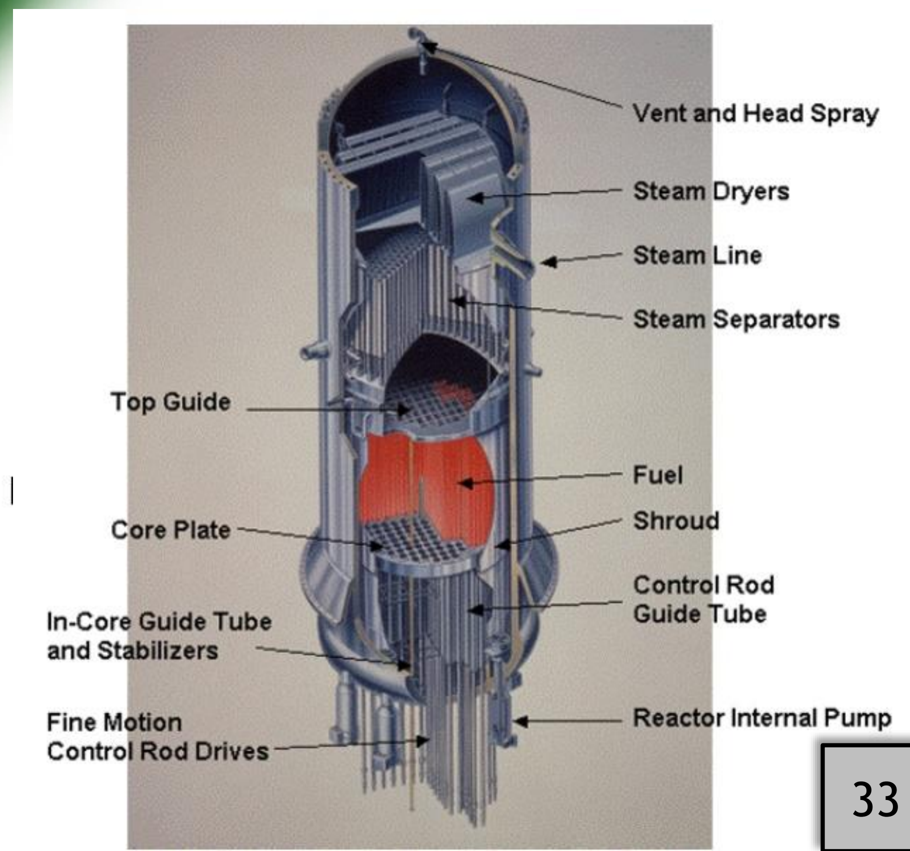
Sin certificación en EEUU

El Advanced Boiling Water Reactor

ABWR



Más en ARIS



Incluye bombas dentro de la vasija

Evita la recirculación

El reactor CANDU Avanzado (ACR-1000)

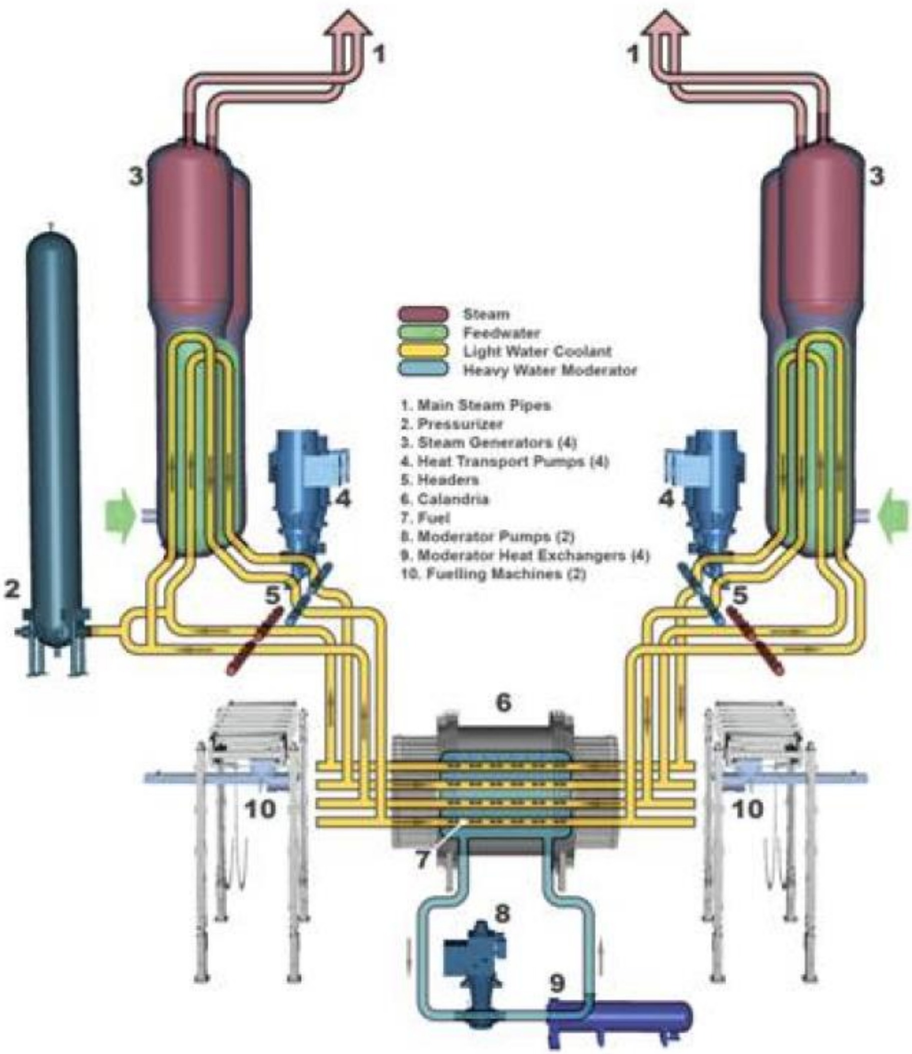
Usa agua ligera como refrigerante

Usa agua pesada como moderador

Requiere uranio enriquecido

Permite un núcleo más pequeño

Añade nuevos sistemas de seguridad



El Advanced Heavy Water Reactor

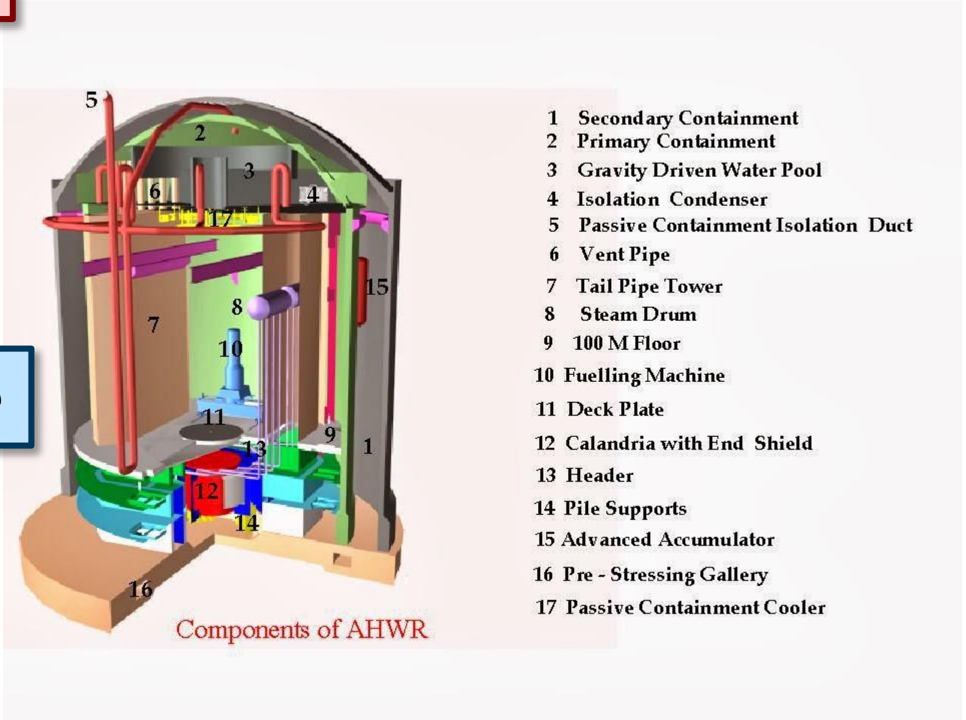
Diseñado por la empresa india BARC

Similar en diseño al CANDU

- Con tubos verticales
- Tiene un depósito de agua en la parte superior

Usa torio como combustible

- Más abundante que el uranio



Components of AHWR