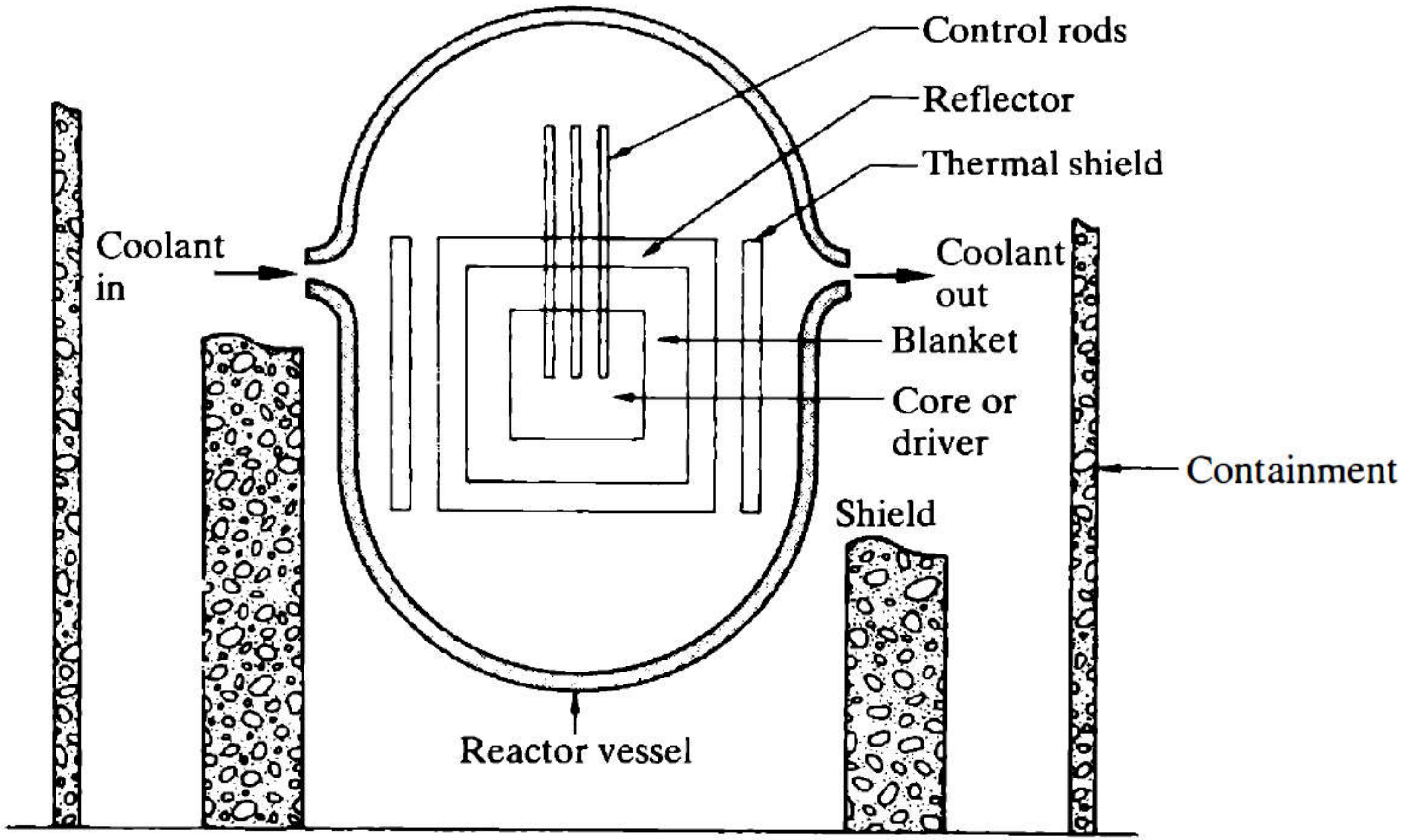
Tecnologías nucleares

Antonio González Fernández
Departamento de Física Aplicada III
Universidad de Sevilla

Parte 3. Reactores de agua ligera (PWR, BWR y VVER)

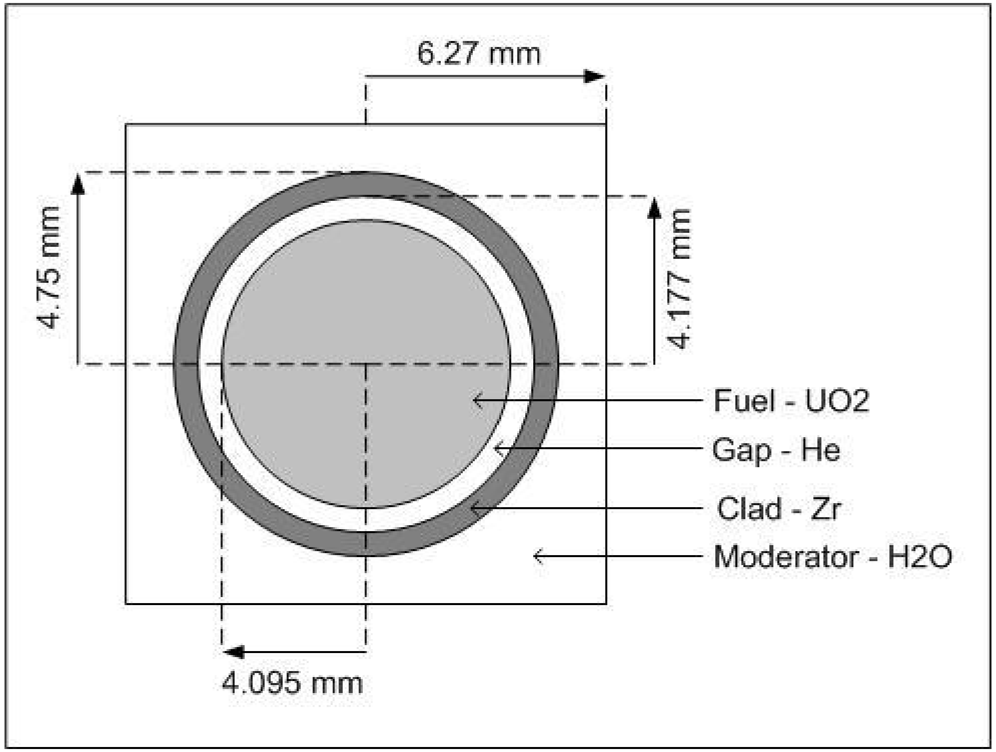
Esquema general de la parte nuclear de un reactor



El fuel va en *pellets* o pastillas

El uranio se almacena en forma de dióxido de uranio (UO_2)

Se forman pequeñas piezas (*pellets*)



Cada pellet contiene energía para una casa en un mes

Si contiene plutonio se llama MOX (*mixed oxide*)

Distribución de temperaturas dentro de un *pellet*

El calor se genera en todo el volumen del *pellet*

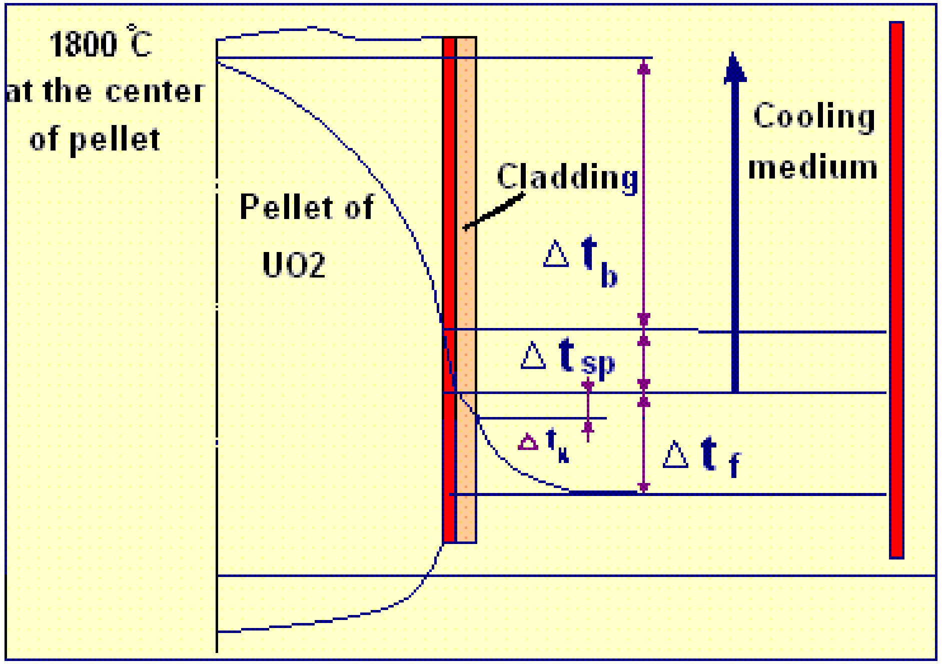
$$-\kappa \nabla^2 T = S$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right) = -\frac{S}{\kappa}$$

El refrigerante solo pasa por el exterior

$$-\kappa \vec{n} \cdot \nabla T = \frac{T - T_{\text{ext}}}{R}$$

Se genera una distribución parabólica de temperaturas con el máximo en el centro



El radio de los pellets está acotado (aumenta $T_{\max}$)

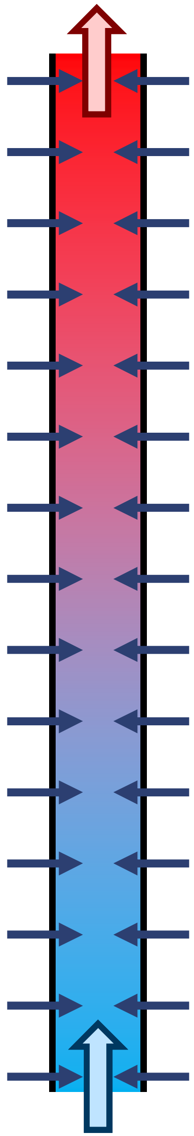
Distribución de temperaturas en el refrigerante (*coolant*)

En los reactores de agua ligera el refrigerante es el mismo que el moderador: el agua que fluye entre las *fuel rods*.

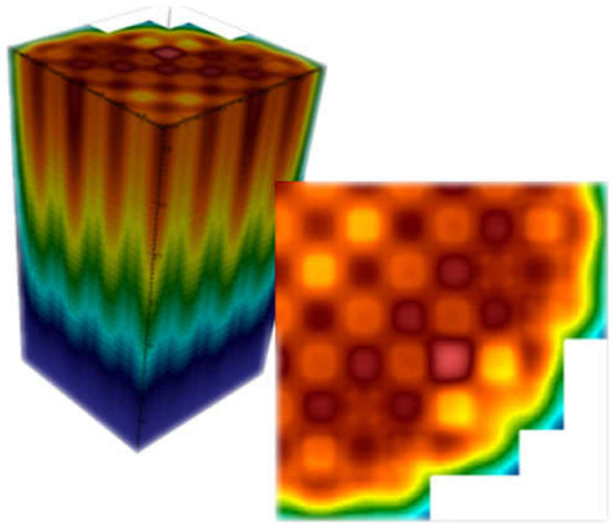
Matemáticamente es un problema de difusión de con entrada de calor por la frontera

Dependencia en r y z (y t)

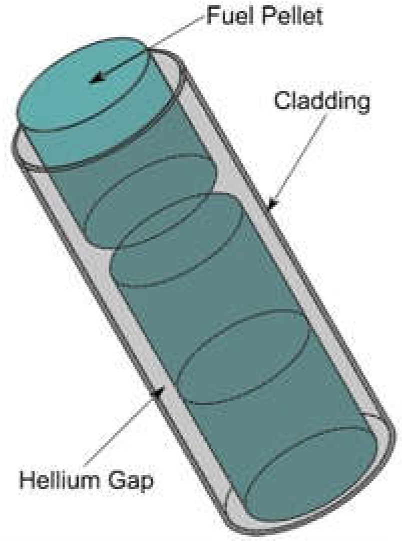
En un BWR además hay un cambio de fase



El problema real debe resolverse numéricamente



Ensamblado en una varilla (*fuel rod*)

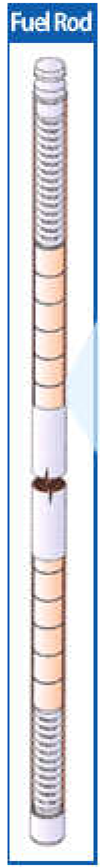


Los *pellets* se introducen en una varilla de zircalloy, resistente a la corrosión

Impide que se liberen los fragmentos

Una varilla mide unos 4m y contiene unos 300 *pellets*

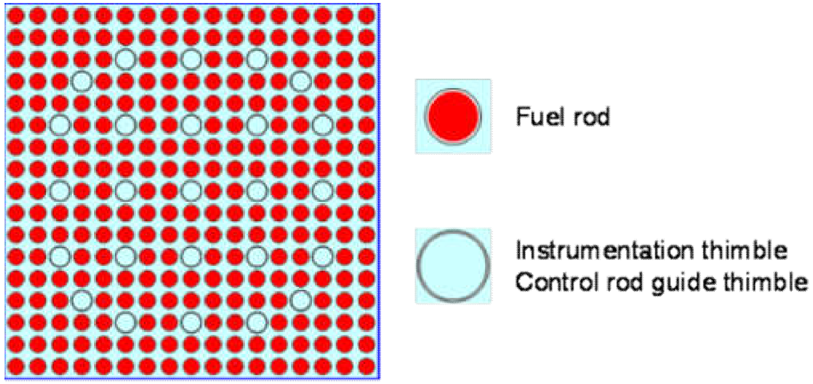
Entre los pellets y el recubrimiento se introduce helio a 3.4MPa, para permitir la dilatación o densificación del UO_2



La posición se fija con resortes y separadores (*spacers*)

En el momento de la recarga se saca la varilla entera (que contiene combustible y residuos)

La varillas se disponen en un elemento combustible (*fuel assembly*)



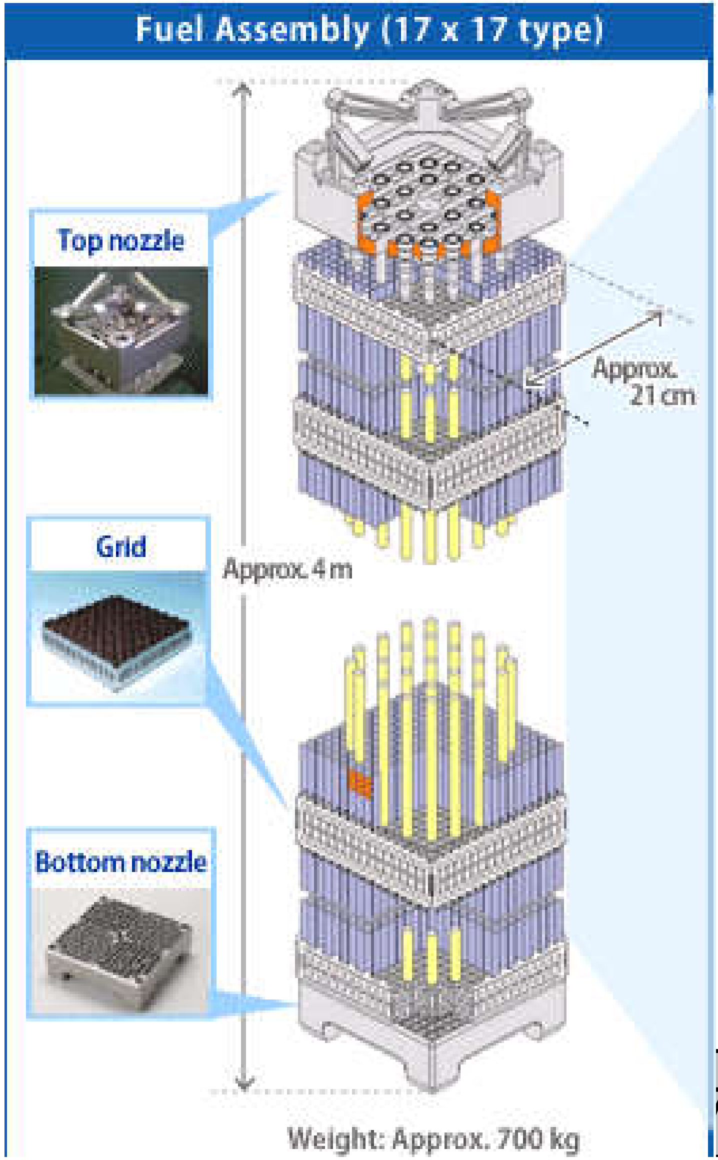
264 varillas de combustible

24 varillas de control

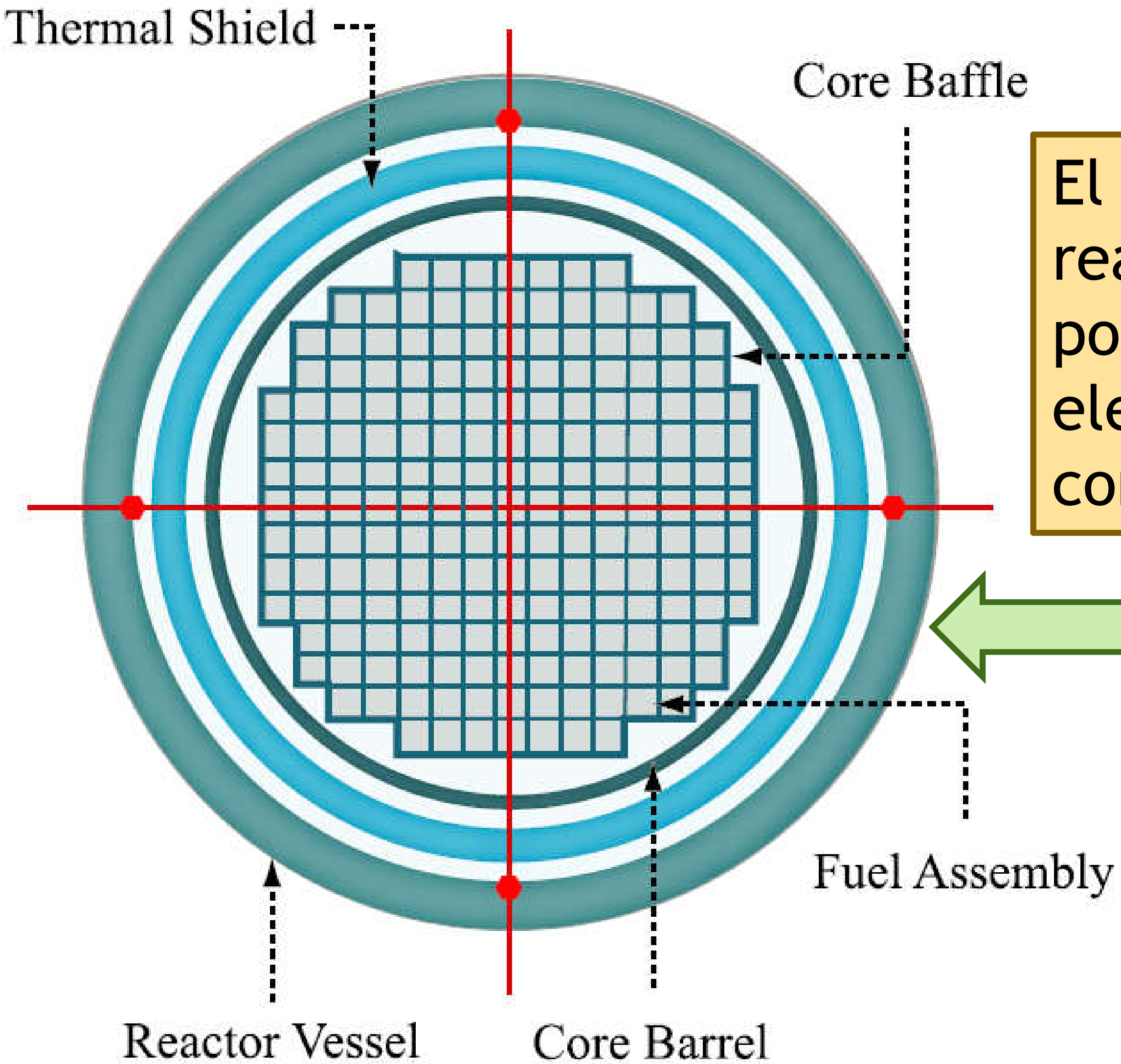
1 varilla de instrumentación

Entre las varillas fluye el moderador y el refrigerante

Los n escapan de una varilla, son moderados y entran en otra



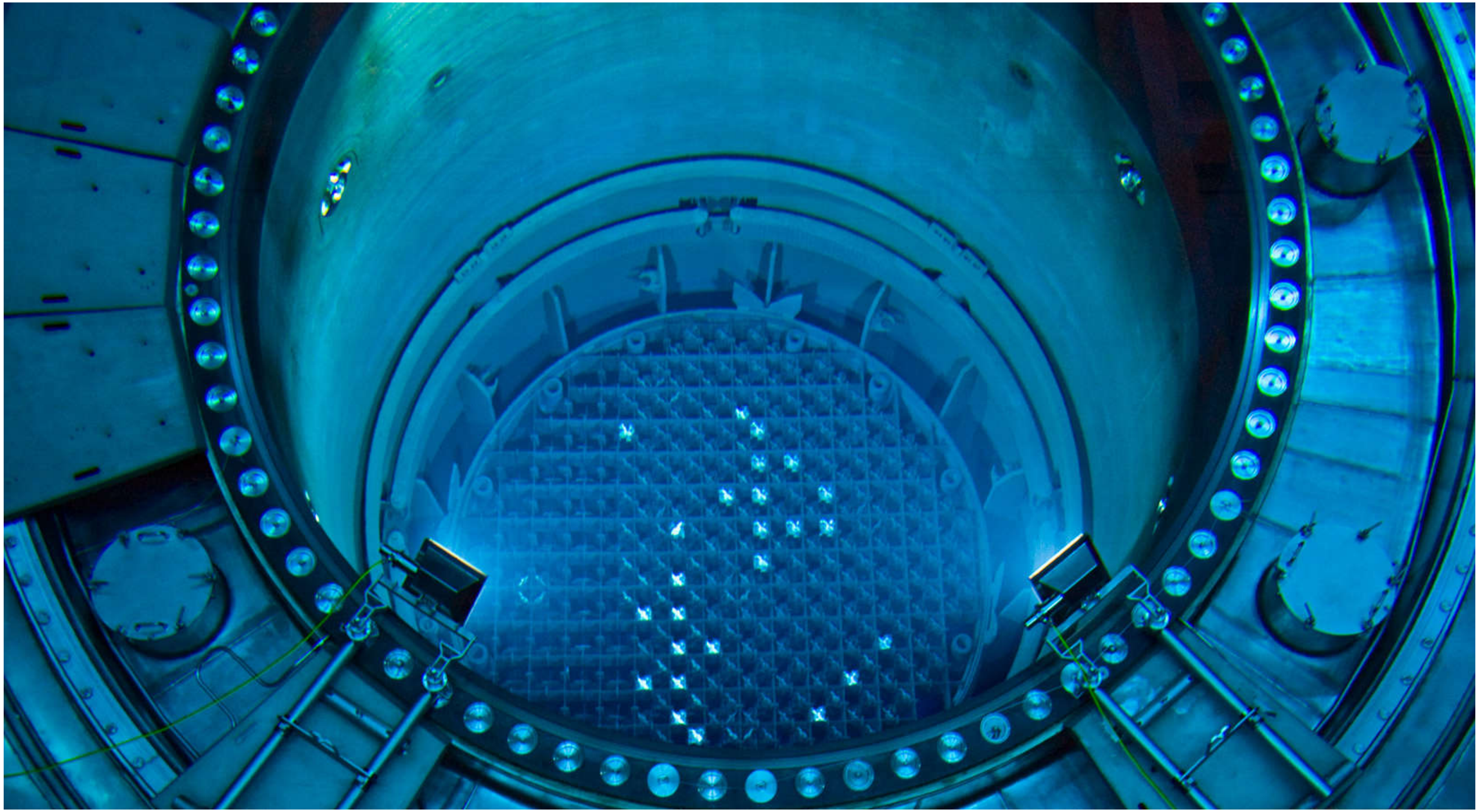
Los *fuel assemblies* se colocan formando racimos (*clusters*)



El núcleo de un reactor está formado por un conjunto de elementos combustibles

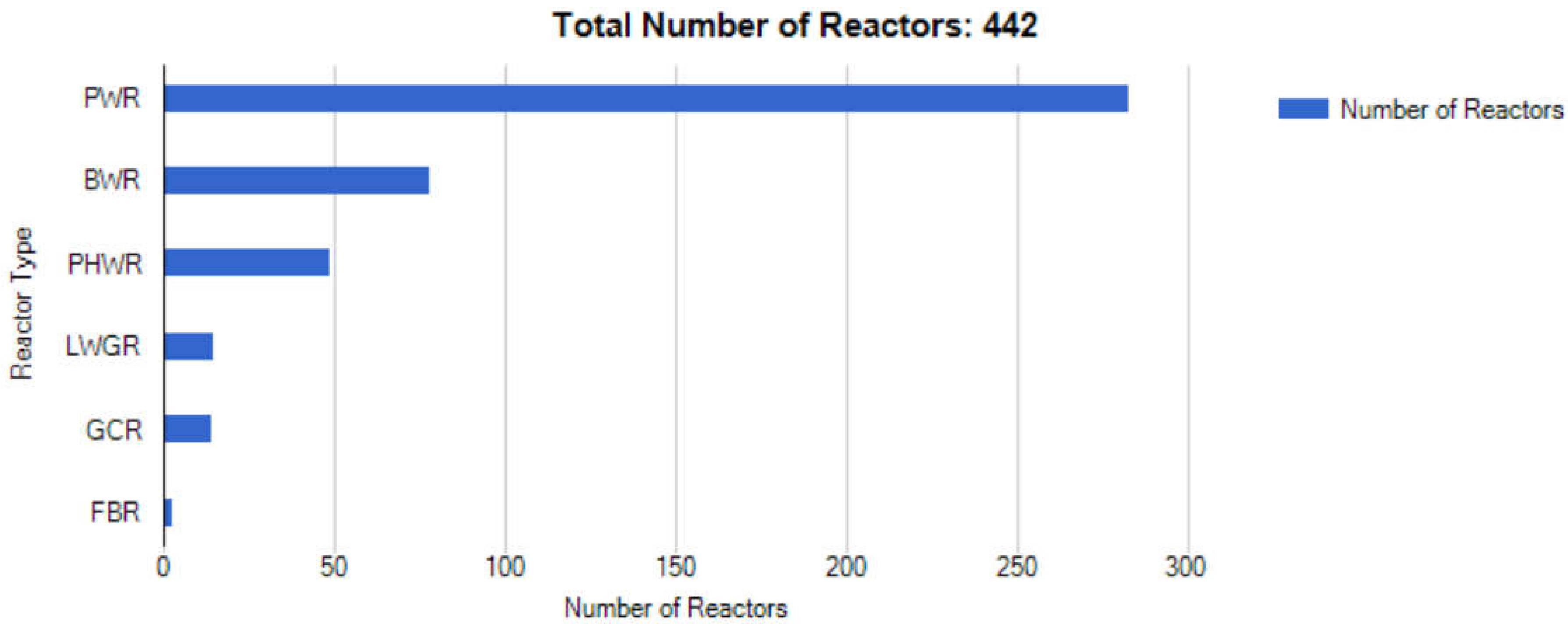
193 elementos

Aspecto real del núcleo de un reactor



El brillo azul se debe a la radiación Cherenkov

Diferentes tipos de reactores en el mundo

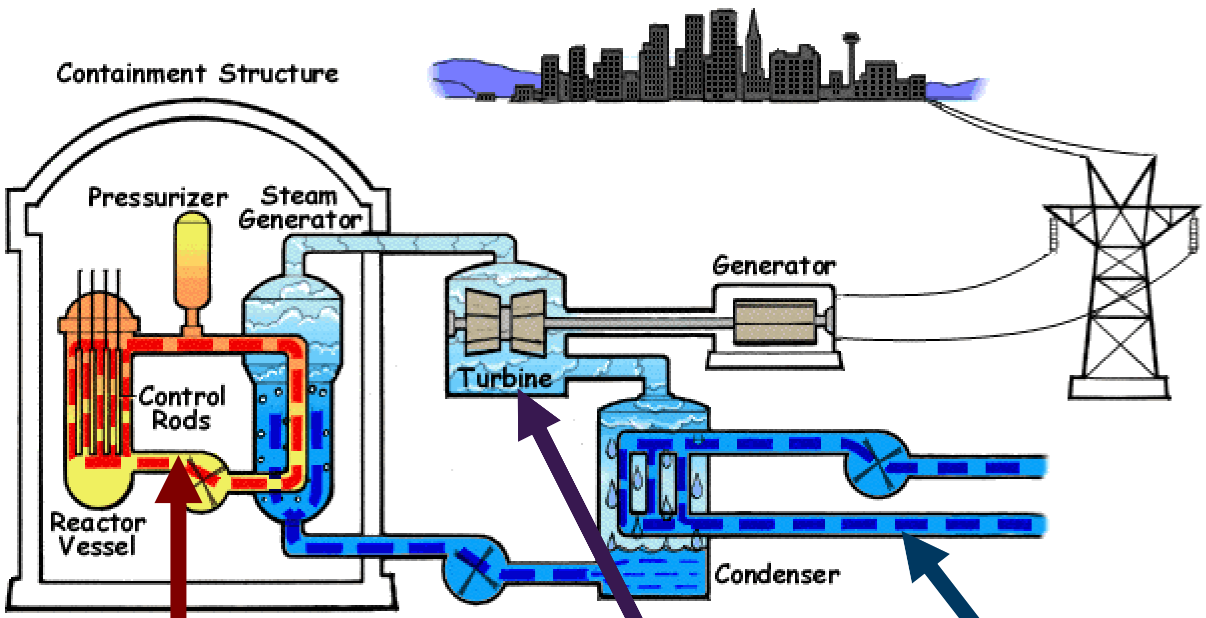


Reactor Type	Reactor Type Descriptive Name	Nr of Reactors	Capacity (MW)
PWR	Pressurized Light-Water-Moderated and Cooled Reactor	283	265020
BWR	Boiling Light-Water-Cooled and Moderated Reactor	78	75208
PHWR	Pressurized Heavy-Water-Moderated and Cooled Reactor	49	24592
LWGR	Light-Water-Cooled, Graphite-Moderated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

Características de los tipos de reactores

	PWR	BWR	PHWR (CANDU)	HTGCR	LMFBR
Combustible	UO_2	UO_2	UO_2	UC, ThC_2	PuO_2
Enriquecimiento	3% U235	2.5% U235	0.7% U235 (natural)	0.7% U235 (natural)	15% Pu239
Moderador	Agua	Agua	Agua pesada	Grafito	-
Refrigerante	Agua	Agua	Agua pesada	CO_2	Sodio líquido
Recubrimiento	zircaloy	zircaloy	zircaloy	grafito	acero
Control	Barras de B_4C	Cruces de B_4C	Nivel de moderador	Barras de B_4C	Barras de B_4C o Ta

El reactor de agua a presión (*Pressurized Water Reactor*, PWR)



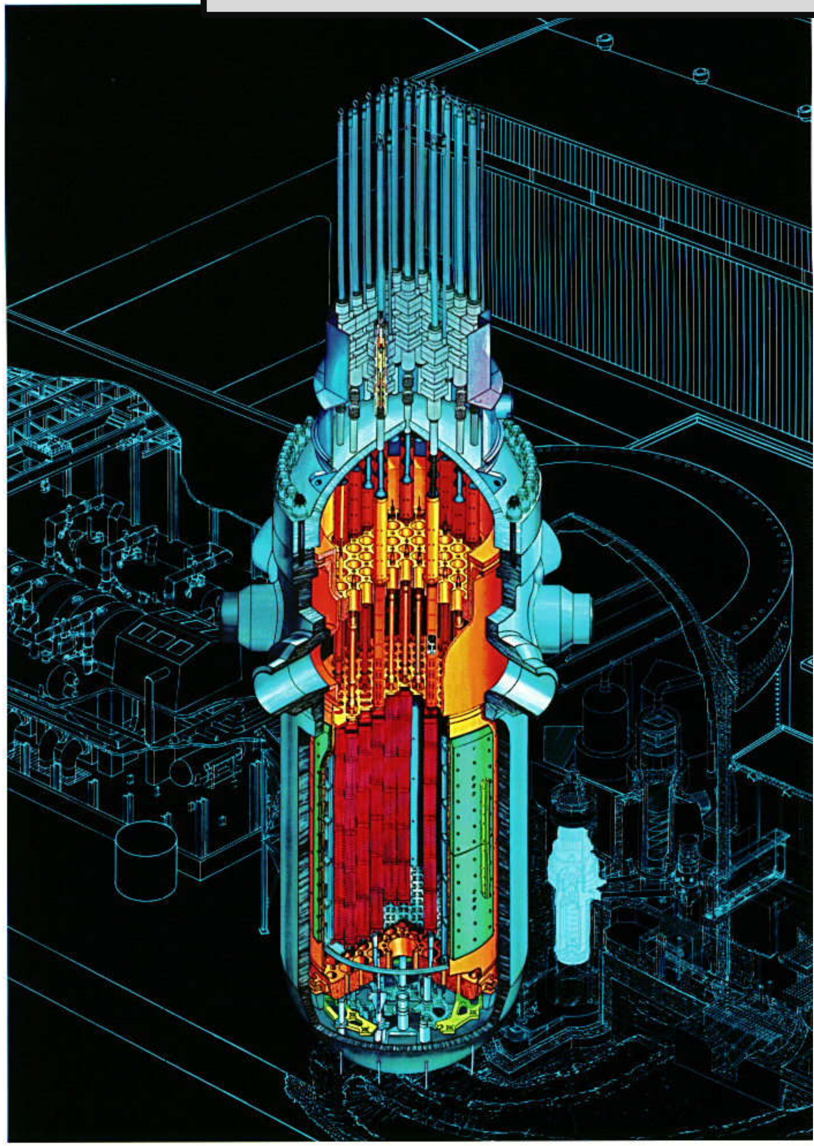
Se basa en tres circuitos de fluido

Agua a presión que pasa por el núcleo y la caldera

Agua-vapor por la caldera y las turbinas

Agua de refrigeración por el condensador

El núcleo de un reactor PWR

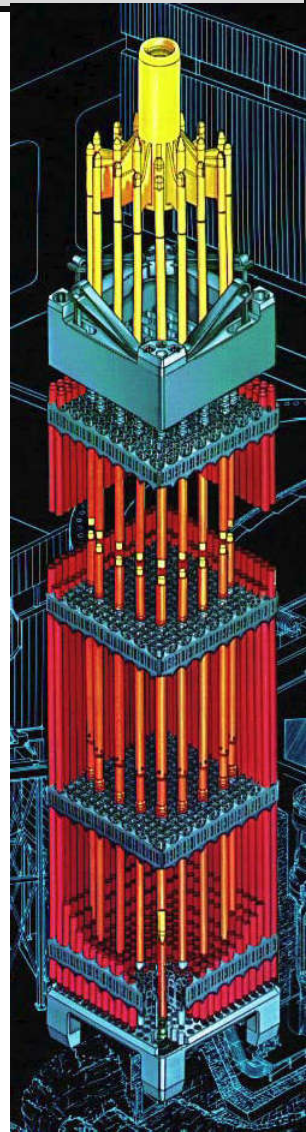


Westinghouse NUCLEAR REACTOR

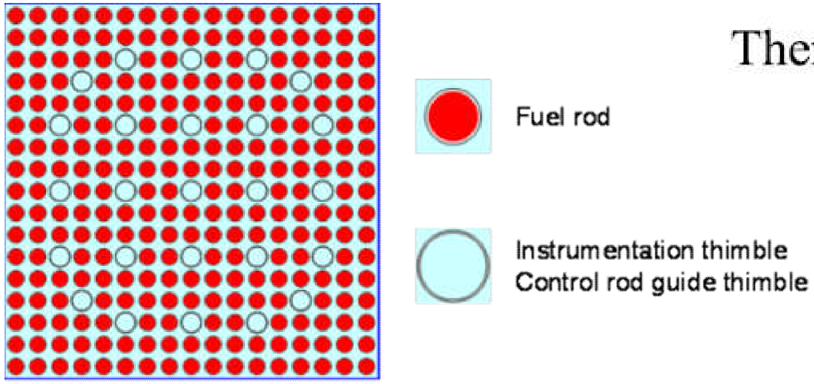
Está formado por cientos de elementos combustibles

Las varillas de control entran desde arriba

La gravedad ayuda



El núcleo de un reactor PWR: sección transversal

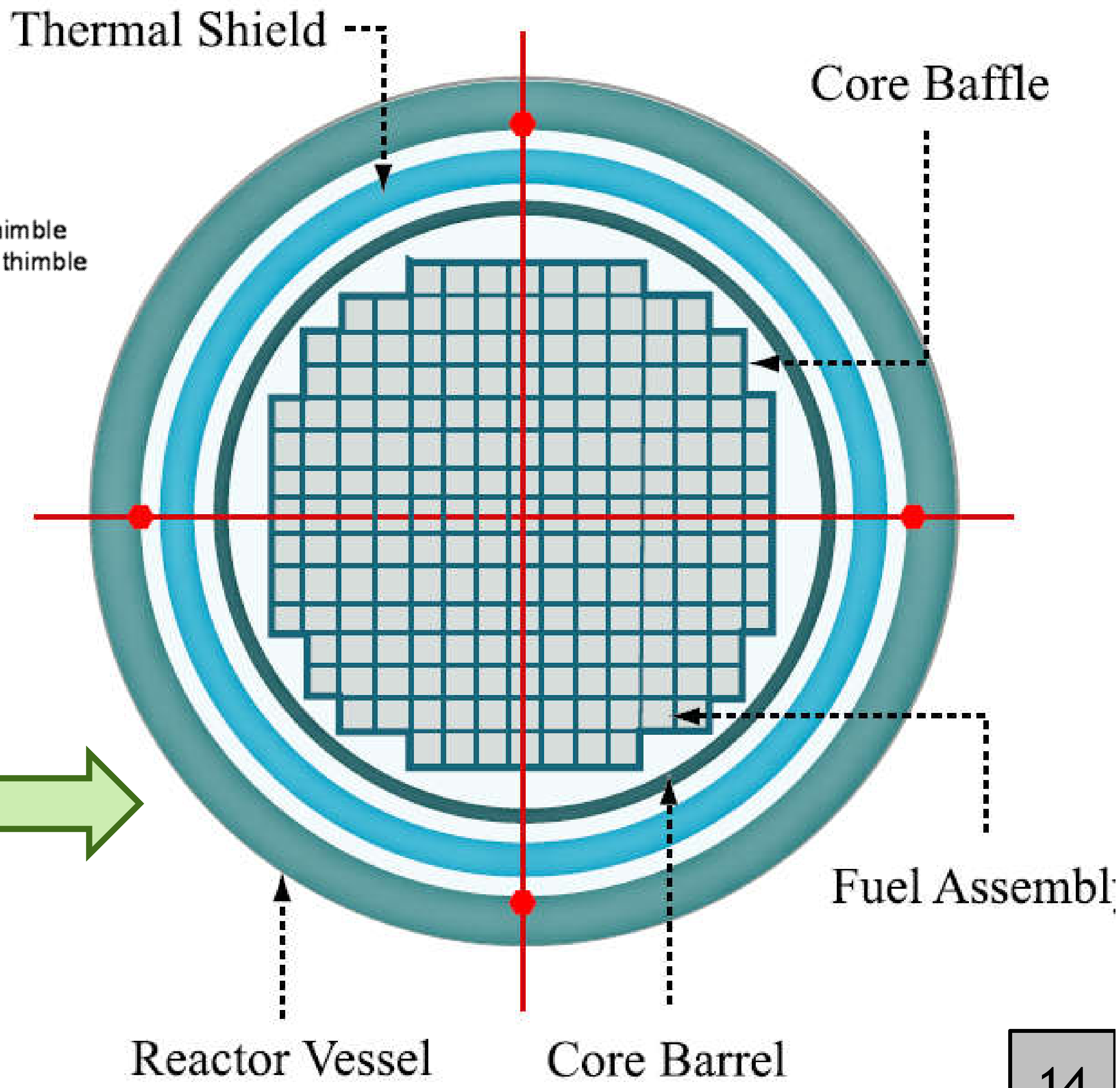


264 varillas de combustible

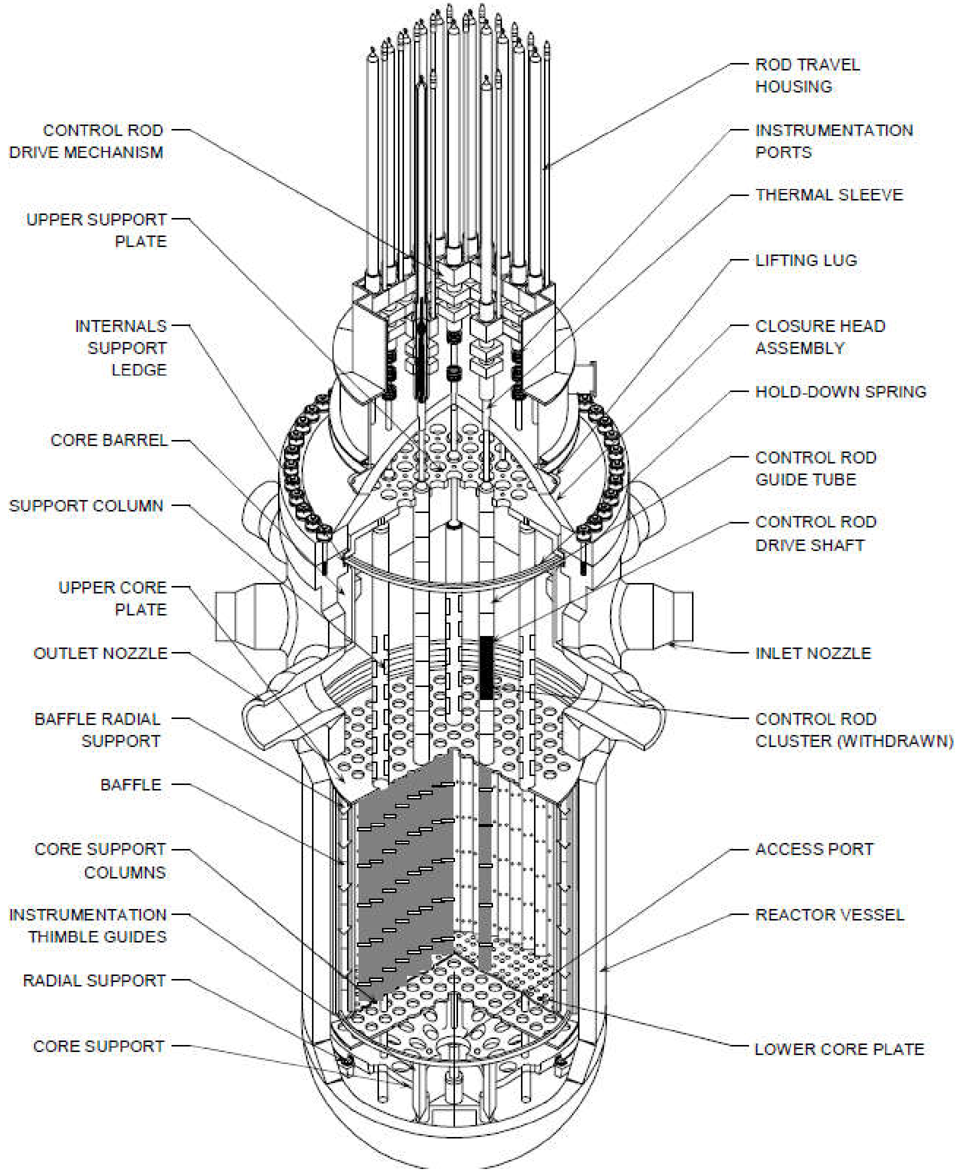
24 varillas de control

1 varilla de instrumentación

193 elementos



Corte del núcleo de un reactor PWR

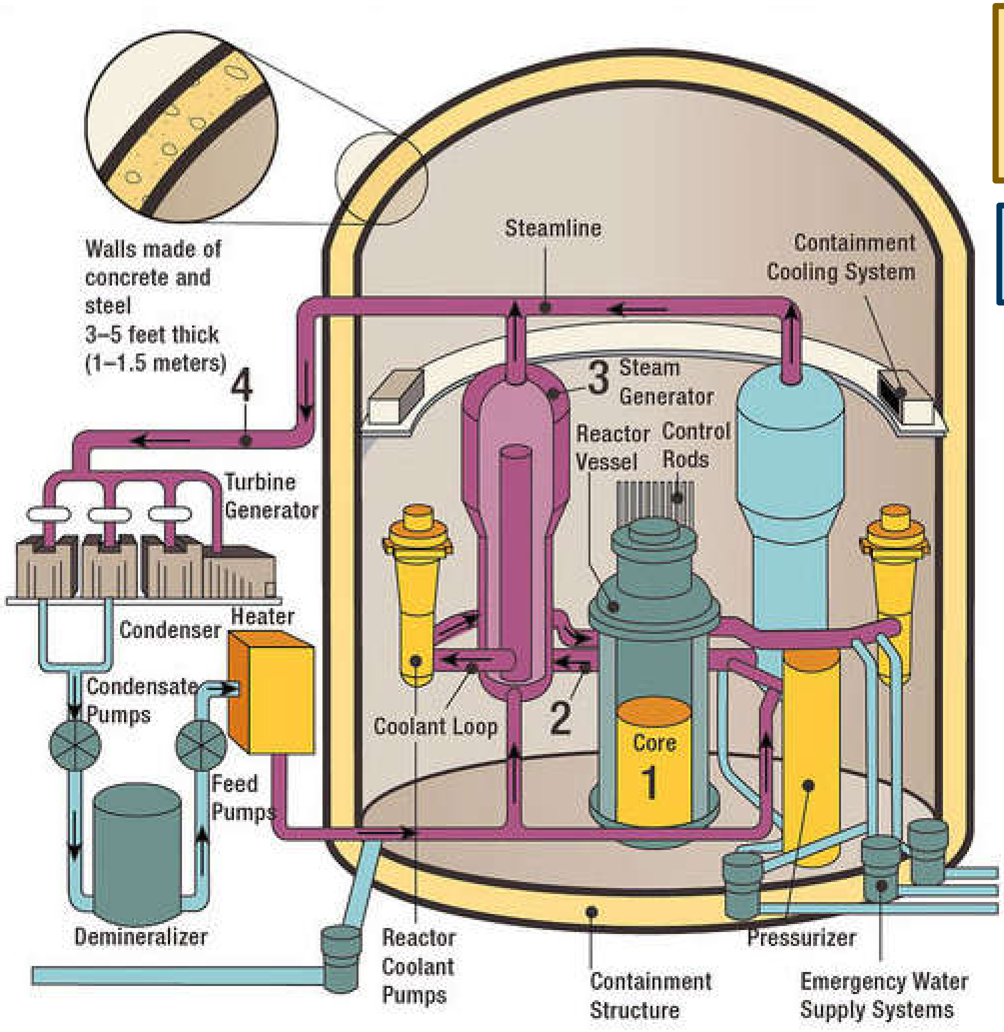


El agua a presión entra por el medio, baja y se va calentando mientras asciende

Así se evita que una fuga en una tubería vacíe la vasija

La capa de agua que baja hace de reflector

El circuito primario de una PWR



El agua entra a 560K y sale a 600K

Muy por encima de 100ºC

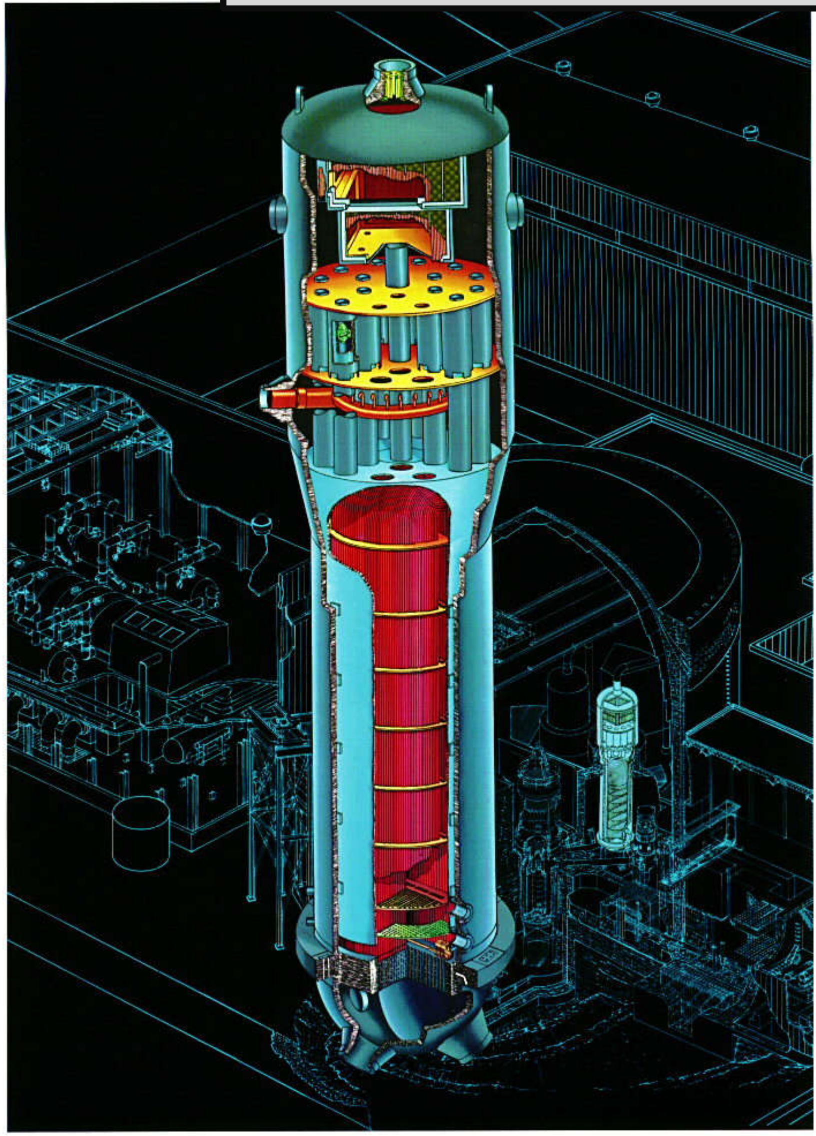
La presión es de 15.2MPa

$T_{sat} = 616.5\text{K}$ a esa p

Para evitar que el agua hierva el sistema tiene un presurizador

Tiene un coeficiente de vacío negativo

El núcleo está conectado a varios generadores de vapor



Westinghouse STEAM GENERATOR

El agua caliente que sale del núcleo se lleva a generadores de vapor (intercambiadores de calor)

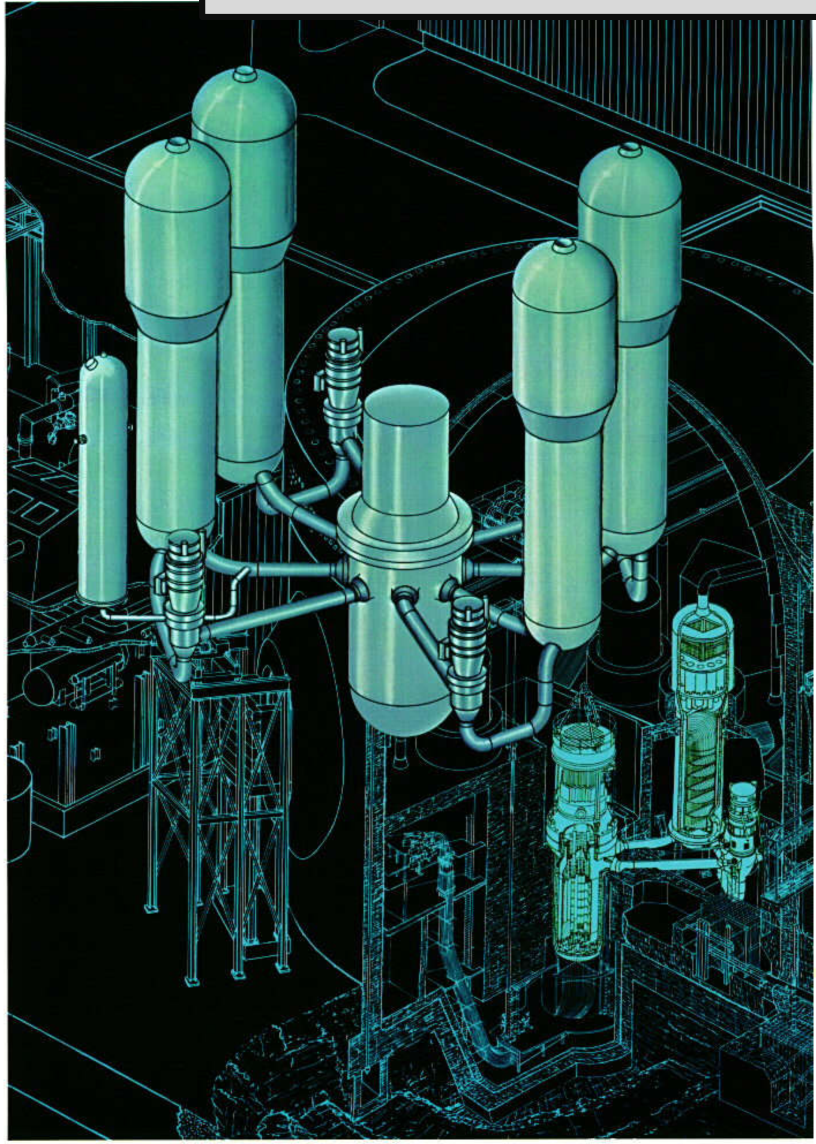
El agua del circuito secundario entra en el generador de vapor a 500K y sale a 558K (T_{sat} a $p = 6.9\mathrm{MPa}$)

Hay producción de entropía: ineficiencia

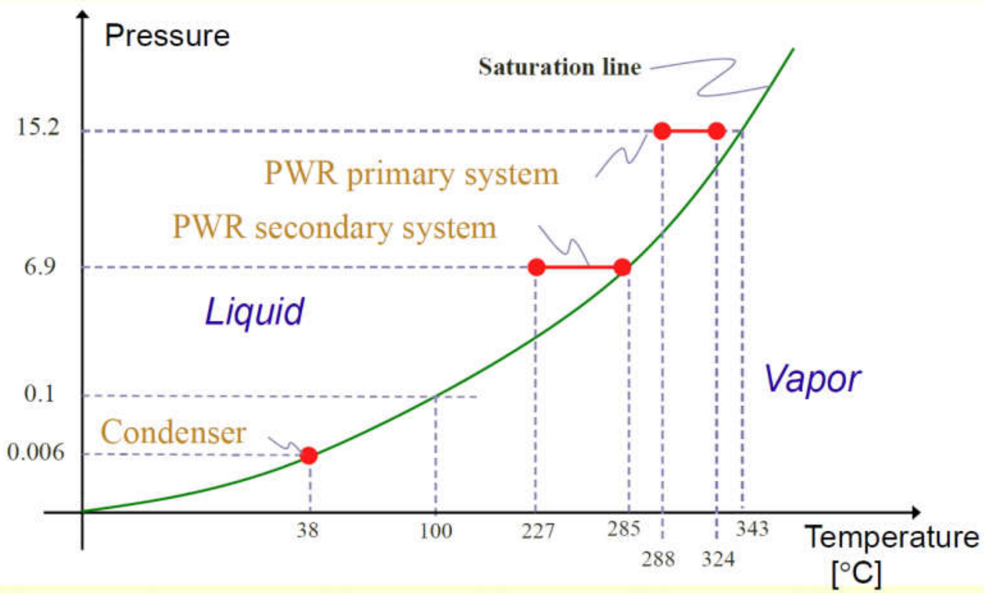
$$\dot{S}_{\mathrm{gen}} = \frac{\dot{Q}}{T_F} - \frac{\dot{Q}}{T_C}$$

Los generadores de vapor son intercambiadores de calor

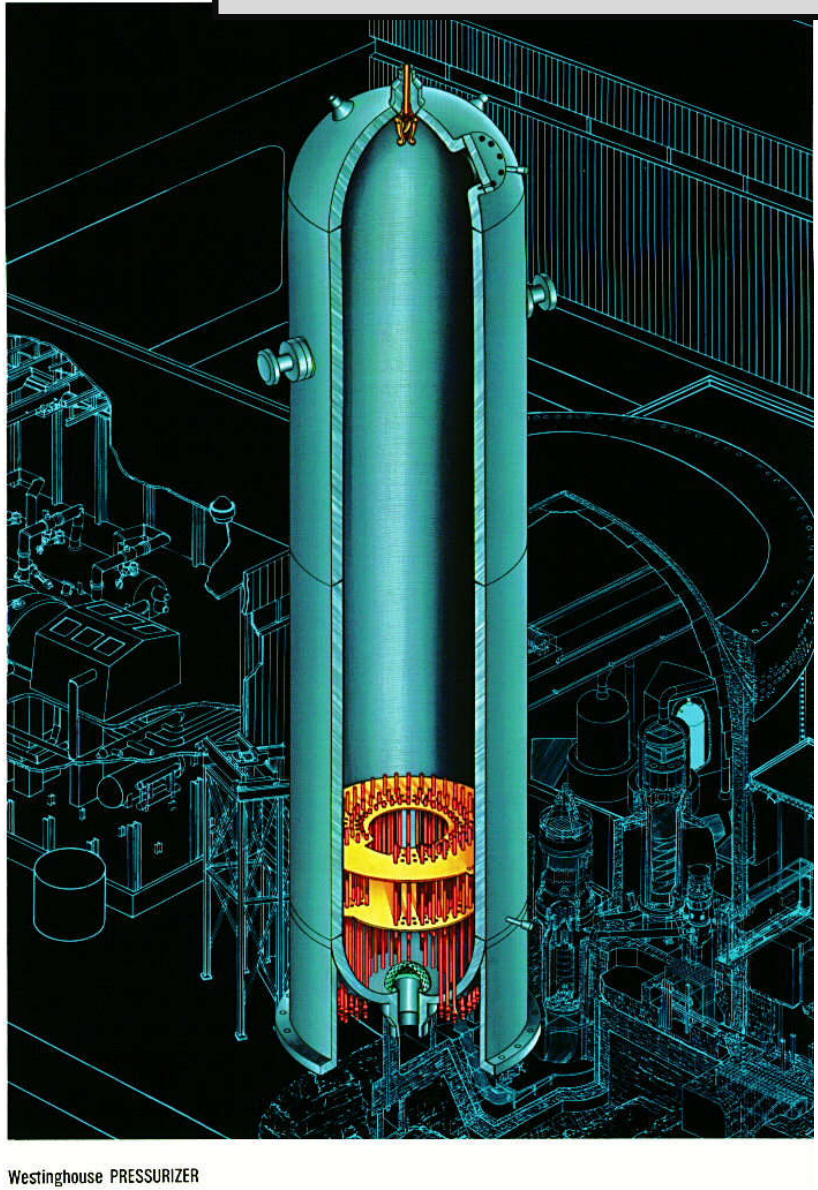
En un PWR típico puede haber 1,2 o 4 generadores de vapor



Westinghouse NUCLEAR STEAM SUPPLY SYSTEM



El circuito primario incluye un presurizador



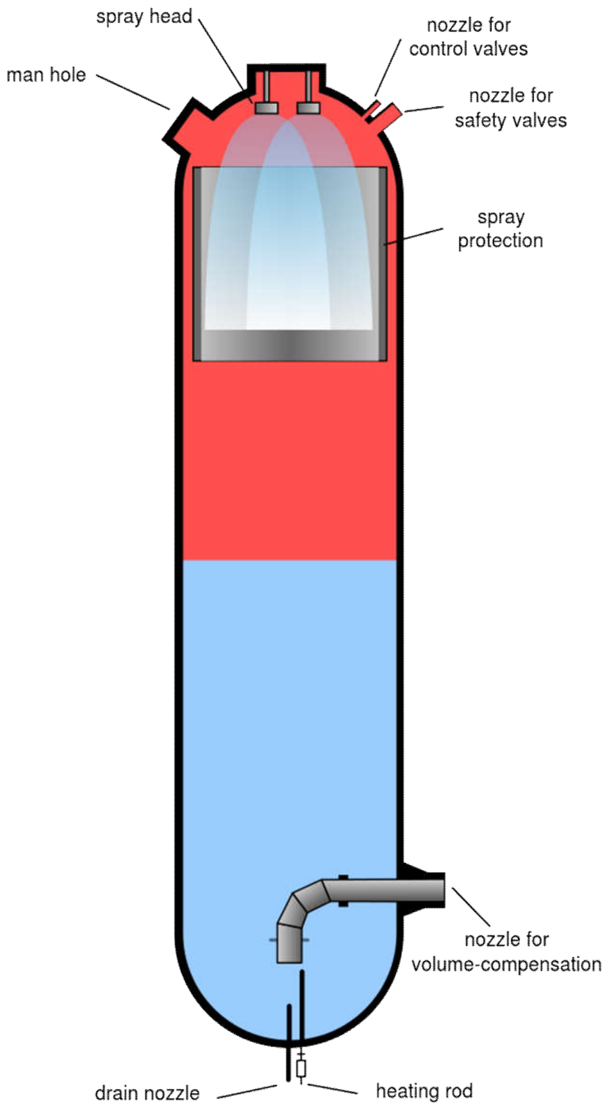
Si se produce un LOCA, la presión baja bruscamente

Se produce ebullición

Acccidente

El presurizador regula la presión por feed-back

El circuito primario incluye un presurizador



Está parcialmente lleno de agua a la temperatura de saturación para esa presión, en equilibrio con vapor

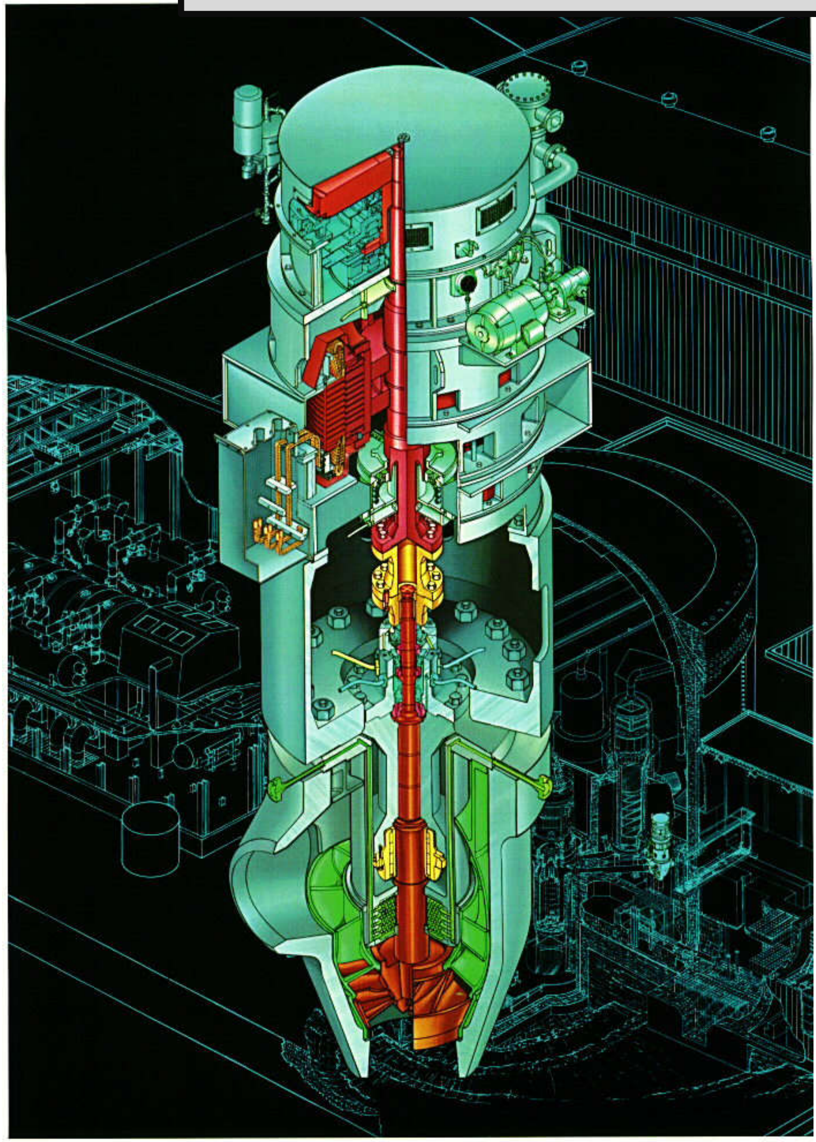
El presurizador regula la temperatura por feed-back

Cambiando T, cambia p

Calentador: $p \uparrow$

Spray de gotas: $p \downarrow$

El circuito primario se completa con bombas



Westinghouse REACTOR COOLANT PUMP

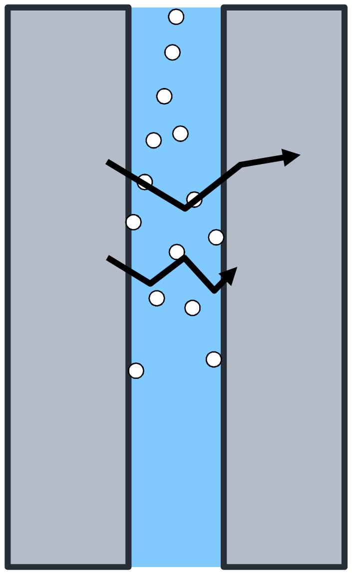
Alimentada eléctricamente desde el exterior

Entre 4500kw y 7500kw

Coeficiente de vacío en un reactor PWR

Un reactor PWR tiene un coeficiente de vacío negativo

Si se forman burbujas



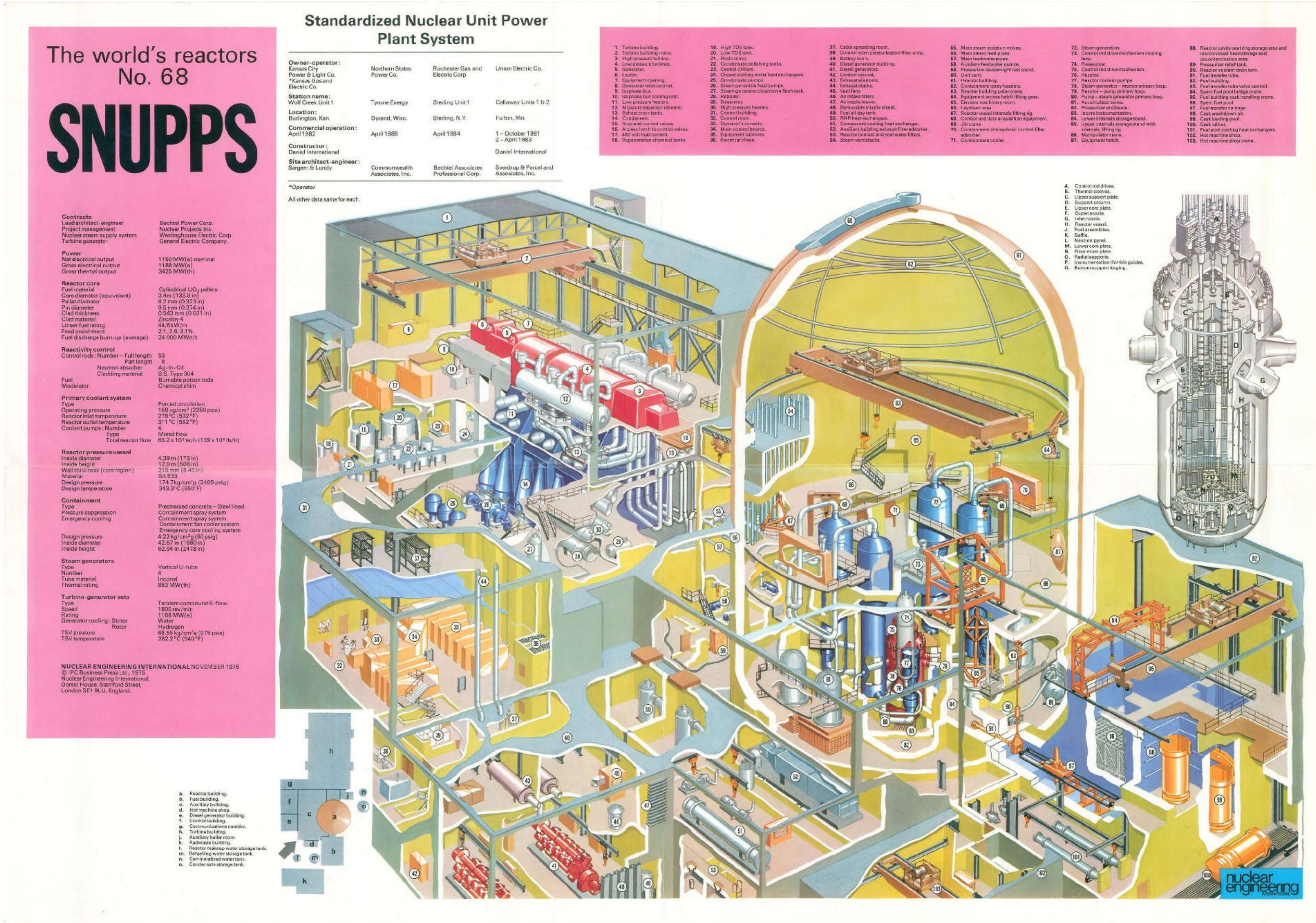
Los neutrones pueden atravesar el moderador sin colisionar

Disminuye la absorción, $\rho \uparrow$

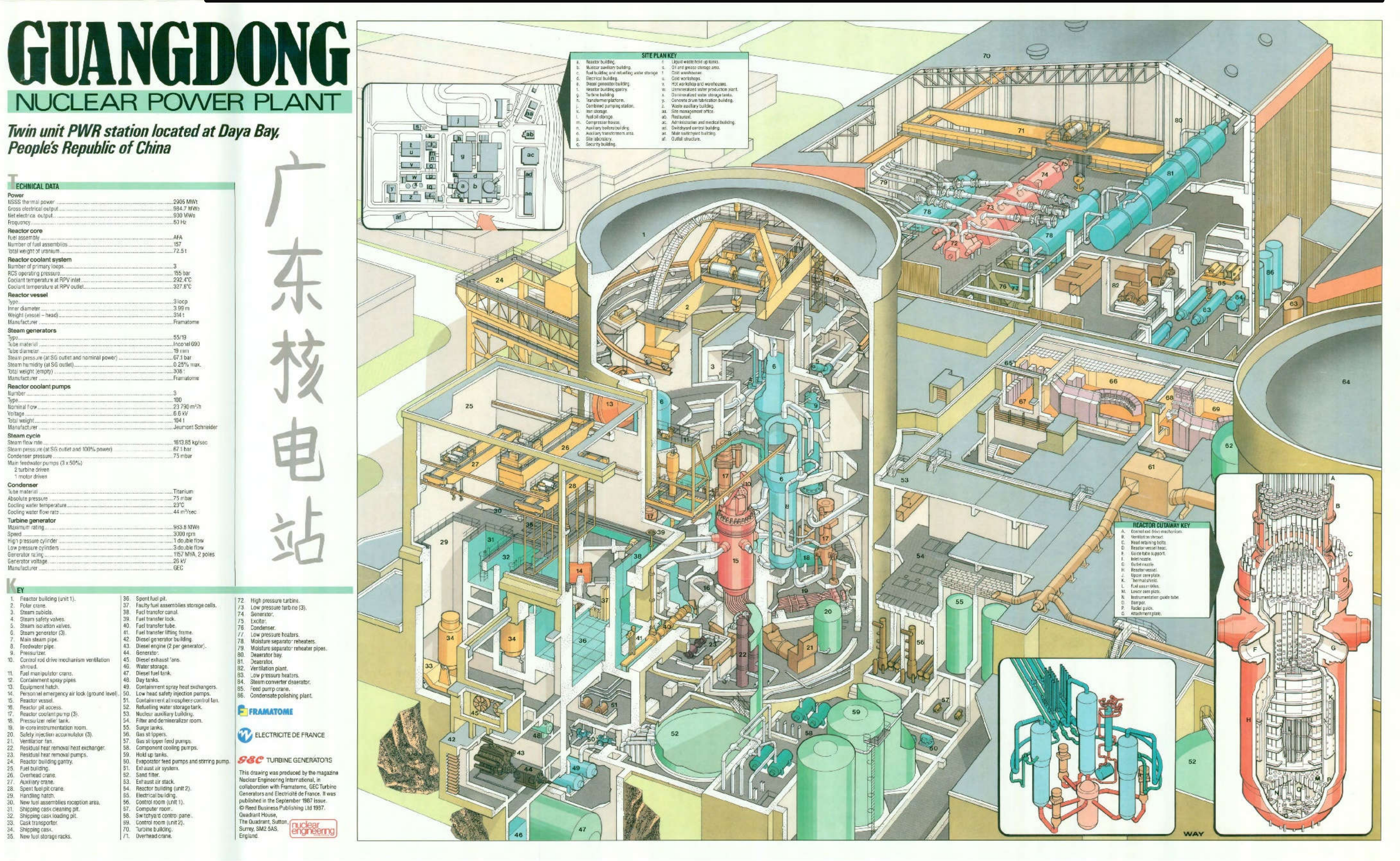
Disminuye la moderación, $\rho \downarrow$

La reducción de la moderación es dominante

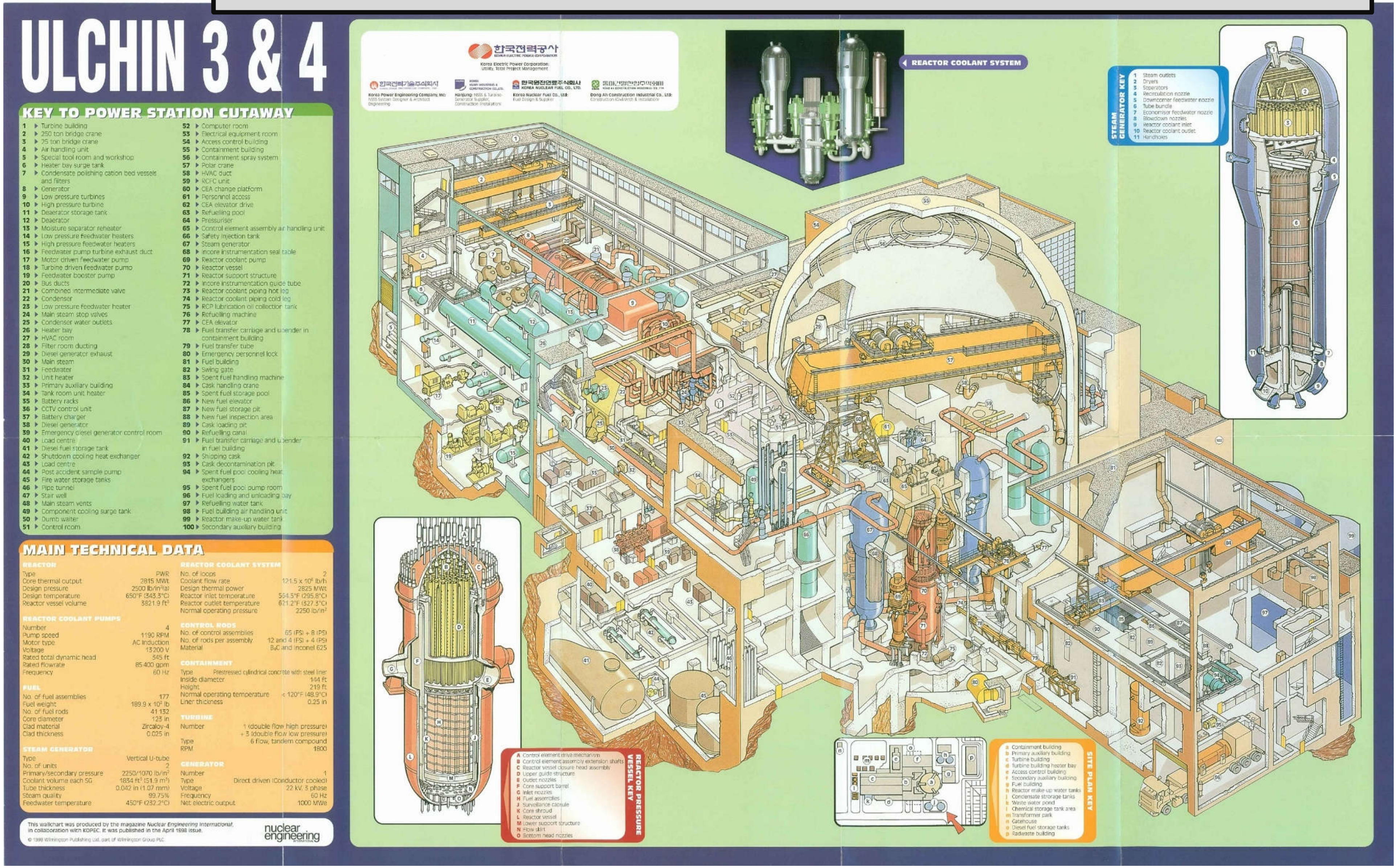
Ejemplo de reactor PWR



Ejemplo de reactor PWR: Guandong



Ejemplo de reactor PWR: Ulchin



Algunos datos técnicos de un reactor PWR típico

Parameter	4-loop PWR
1. Plant	
Number of primary loops	4
Reactor thermal power (MWth)	3411
Total plant thermal efficiency (%)	34
Plant electrical output	1150
Power generated directly in coolant (%)	2.6
Power generated in the fuel (%)	97.4
2. Core	
Core barrel inside diameter/outside diameter (m)	3.76/3.87
Rated power density (kW/L)	104.5
Core volume (m^3)	32.6
Effective core flow area (m^2)	4.747
Active heat transfer surface area (m^2)	5546.3
Average heat flux (kW/m^2)	598.8
Design axial enthalpy rise peaking factor ($F_{\Delta h}$)	1.65
Allowable core total peaking factor (F_Q)	2.5
3. Primary Coolant	
System pressure (MPa)	15.51
Core inlet temperature (°C)	292.7
Average temperature rise in reactor (°C)	33.4
Total core flow rate (Mg/s)	18.63
Effective core flow rate for heat removal (Mg/s)	17.7
Average core inlet mass flux (kg/m^2-s)	3,729
4. Fuel Rods	
Total number	50,952
Fuel density (% of theoretical)	94
Fuel pellet diameter (mm)	8.19
Fuel rod diameter (mm)	9.5
Cladding thickness (mm)	0.57
Cladding material	Zircaloy-4
Active fuel height (m)	3.66

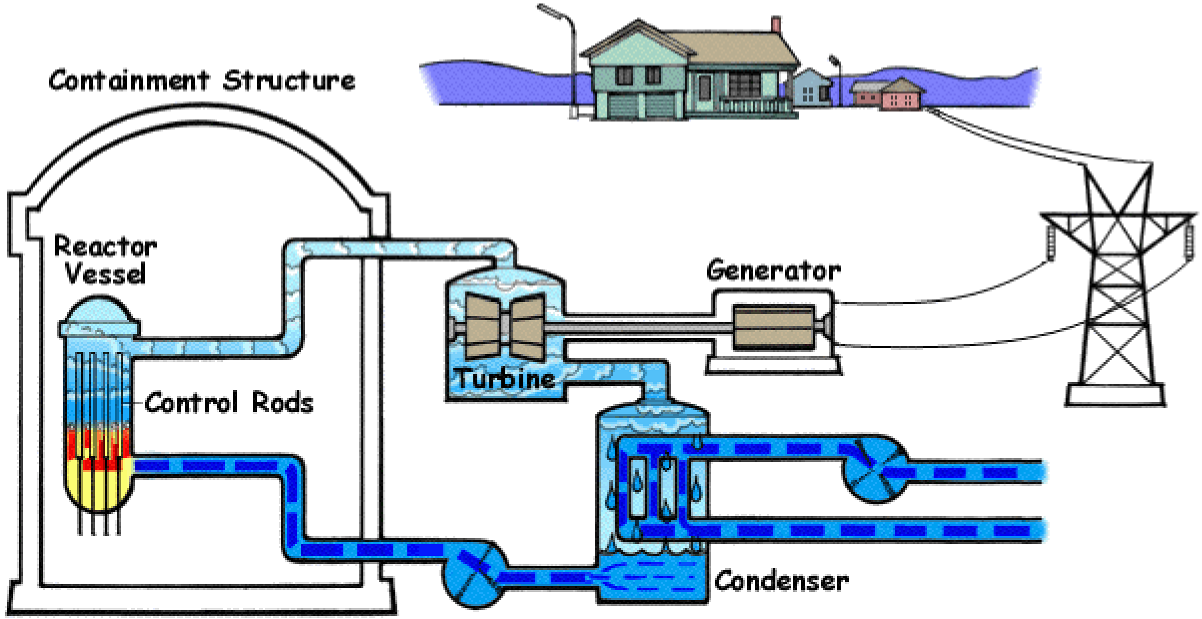
Parameter	4-loop PWR
5. Fuel Assemblies	
Number of assemblies	193
Number of heated rods per assembly	264
Fuel rod pitch (mm)	12.6
Fuel assembly pitch (mm)	215
Number of grids per assembly	7
Fuel assembly effective flow area (m^2)	0.02458
Location of first spacer grid above beginning of heated length (m)	0.3048
Grid spacing (m)	0.508
Grid type	L-grid*
Number of control rod thimbles per assembly	24
Number of instrument tubes	1
Guide tube outer diameter (mm)	12.243
6. Rod Cluster Control Assemblies	
Neutron absorbing material	Ag-In-Cd
Cladding material	Type 304 SS
Cladding thickness (mm)	0.46
Number of clusters Full/Part length	53/8
Number of absorber rods per cluster	24

*Employs mixing vanes

Fabricantes:
Westinghouse
Framatome
Babcock & Wilcox
Combustion Engineering
ABB
Mitsubishi

Fuente: MIT

El reactor de agua en ebullición (*boiling water reactor*, BWR)



Inicialmente, se creyó imposible un reactor que produjera vapor directamente

A alta presión es posible

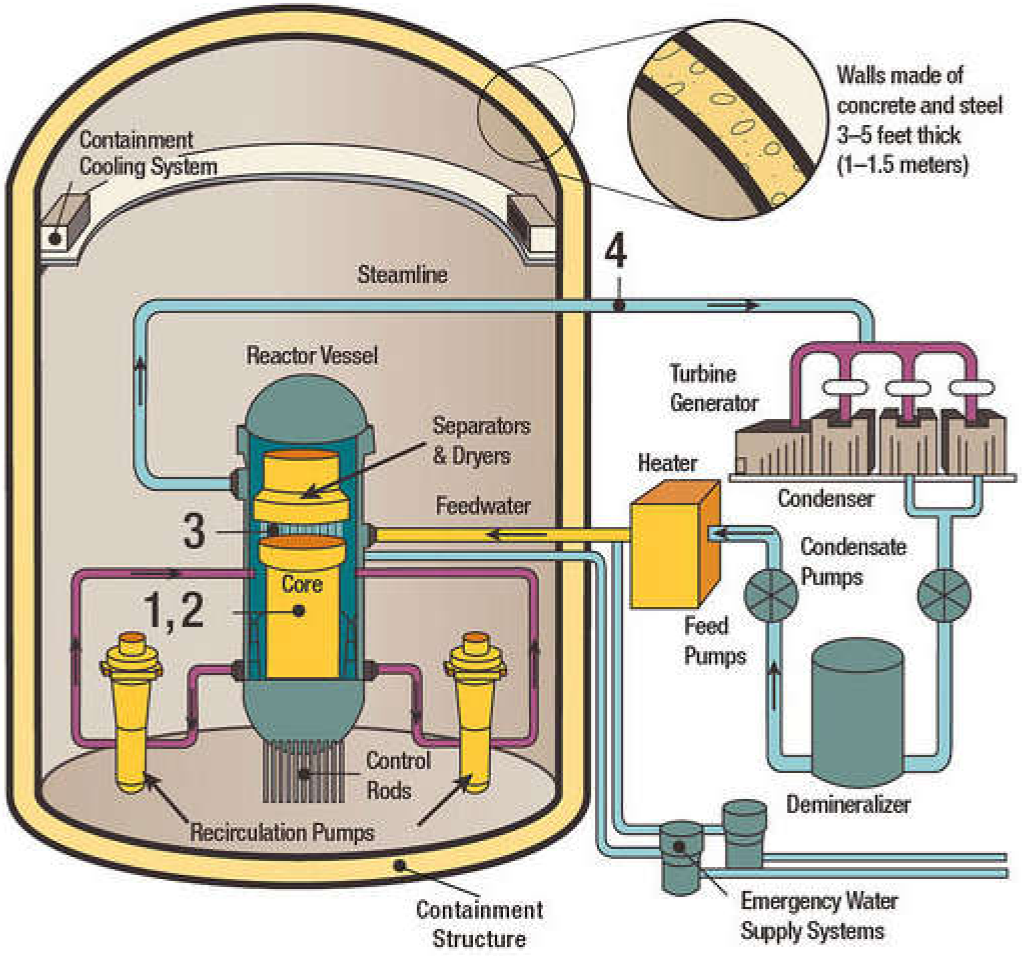
Ventajas:

- Aprovechamiento del calor
- Eficiencia
- Simplicidad
- Presión más baja (1/2 de PWR)

Inconvenientes:

- Debe tener mayor tamaño
- Turbinas deben blindarse

Esquema general de una central BWR



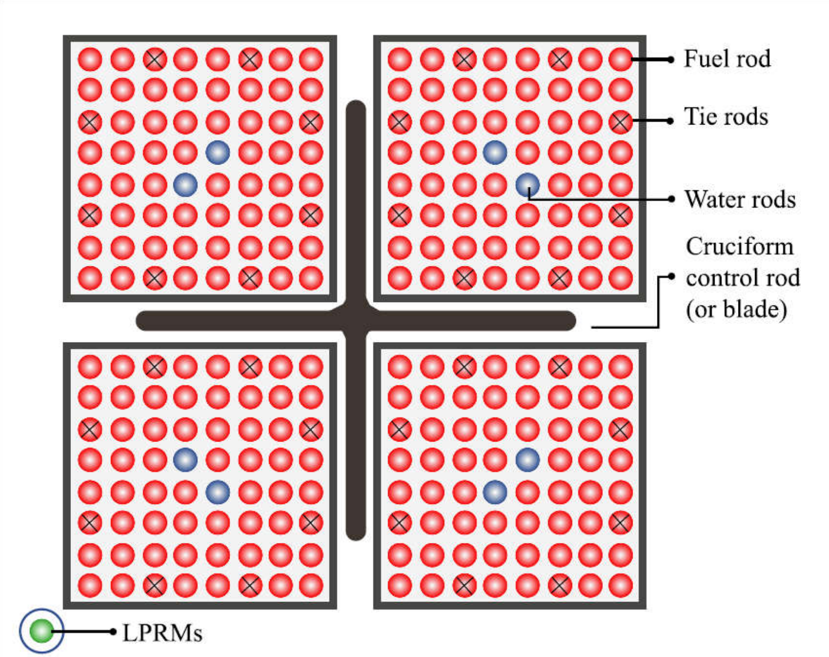
El circuito primario conecta la vasija del reactor con las turbinas

Además hay un circuito refrigerante

las varillas de control entran desde abajo

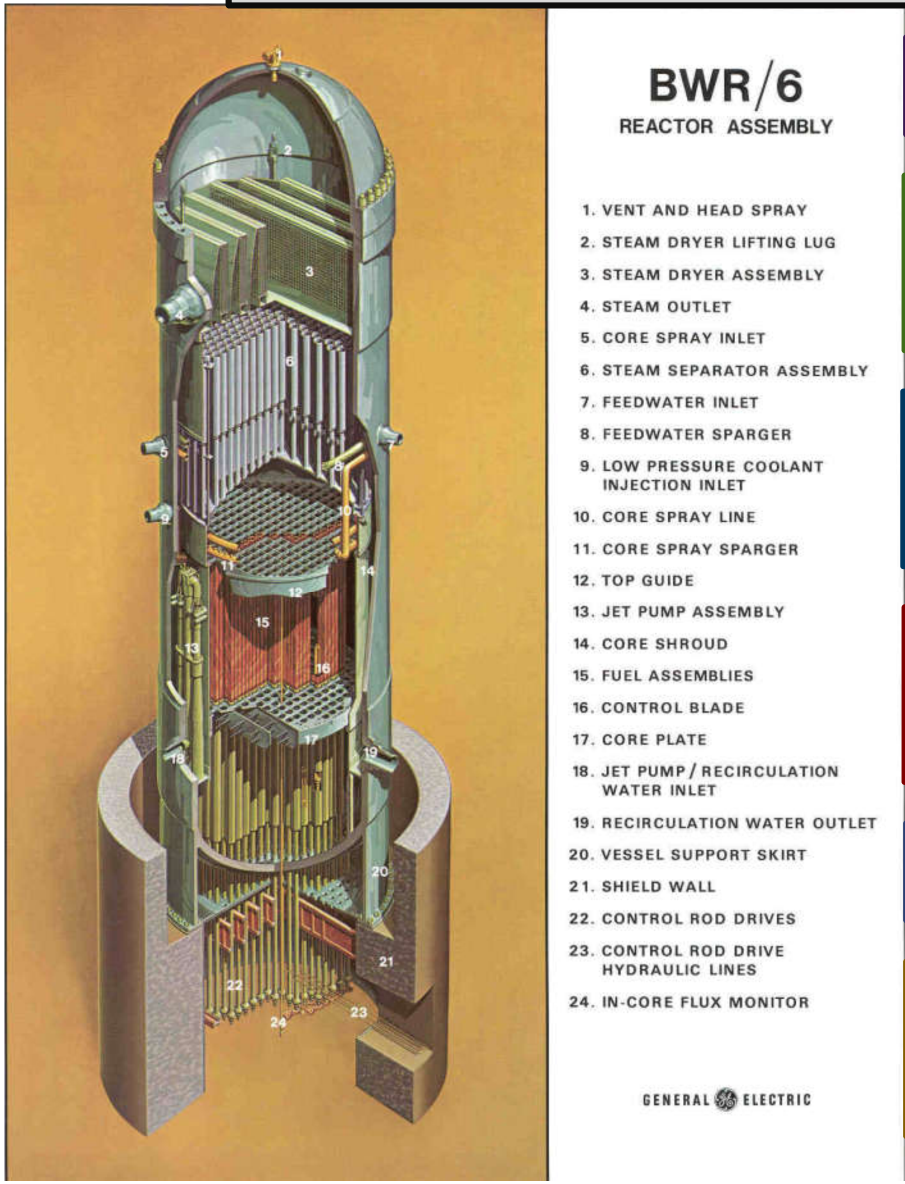
Fuel assembly de un BWR

En un BWR típico hay elementos más pequeños que en un PWR



En lugar de varillas de control pueden tener hojas cruciformes

El núcleo de un reactor BWR



6. El vapor sale por arriba

5. Un secador elimina los restos de agua

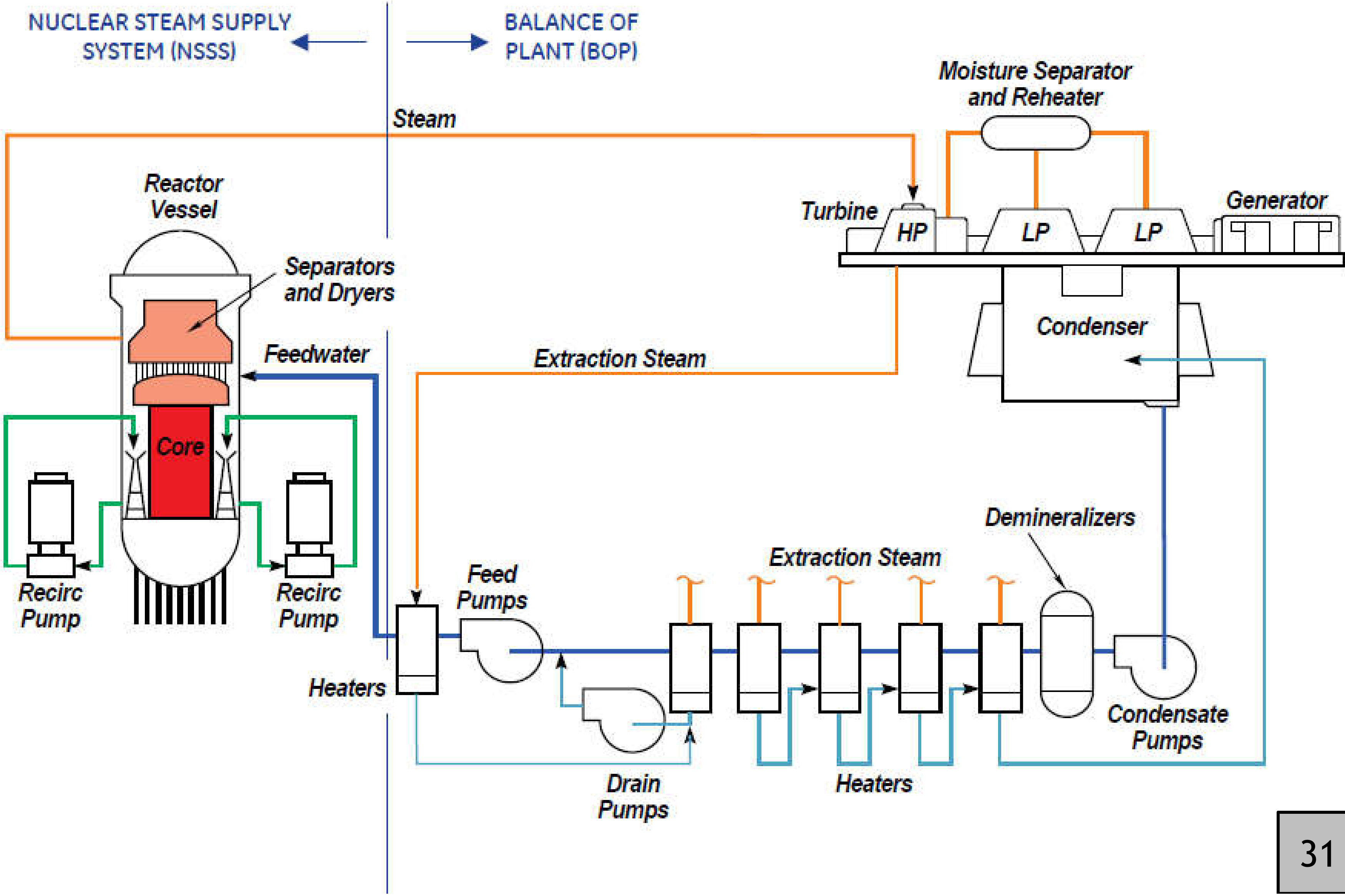
4. Un separador extrae el vapor del líquido

3. Asciende mientras se calienta y evapora

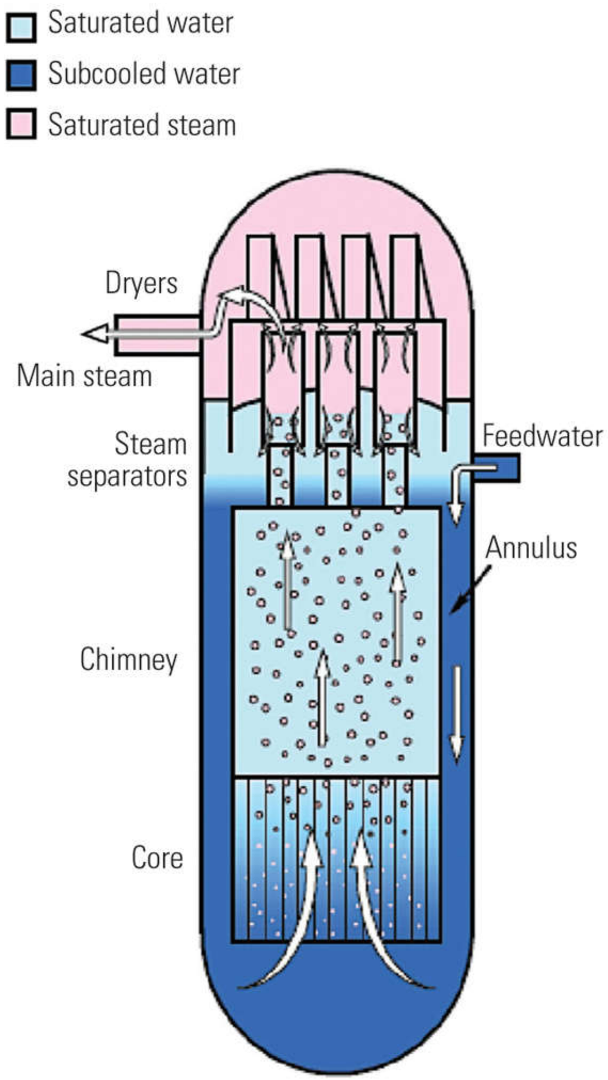
2. desciende y vuelve a subir

1. El agua entra a media altura

Los reactores BWR tienen un *recirculation loop*



Coeficiente de vacío en una central BWR



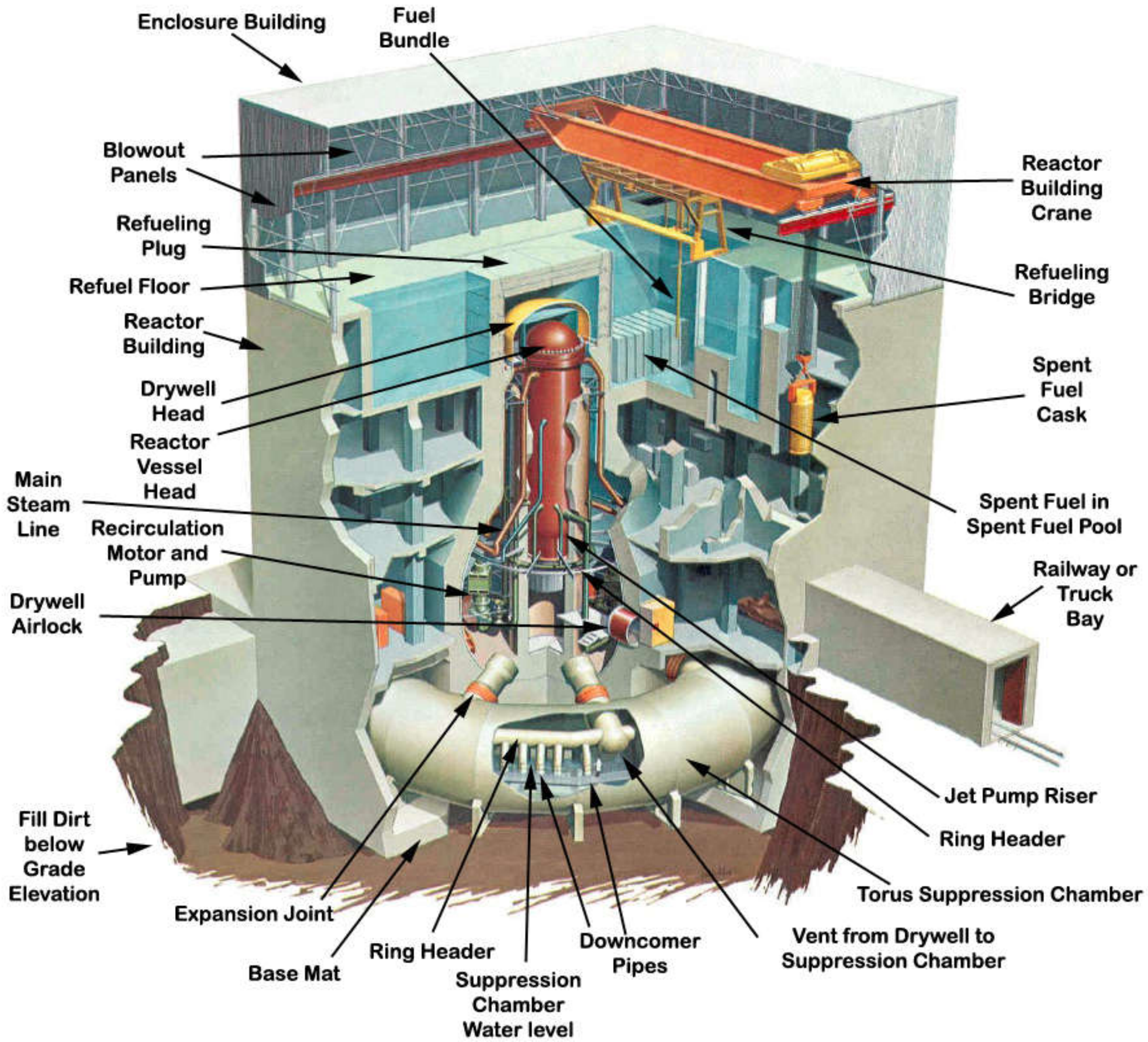
Posee un coeficiente de vacío negativo

Puede ser peligroso

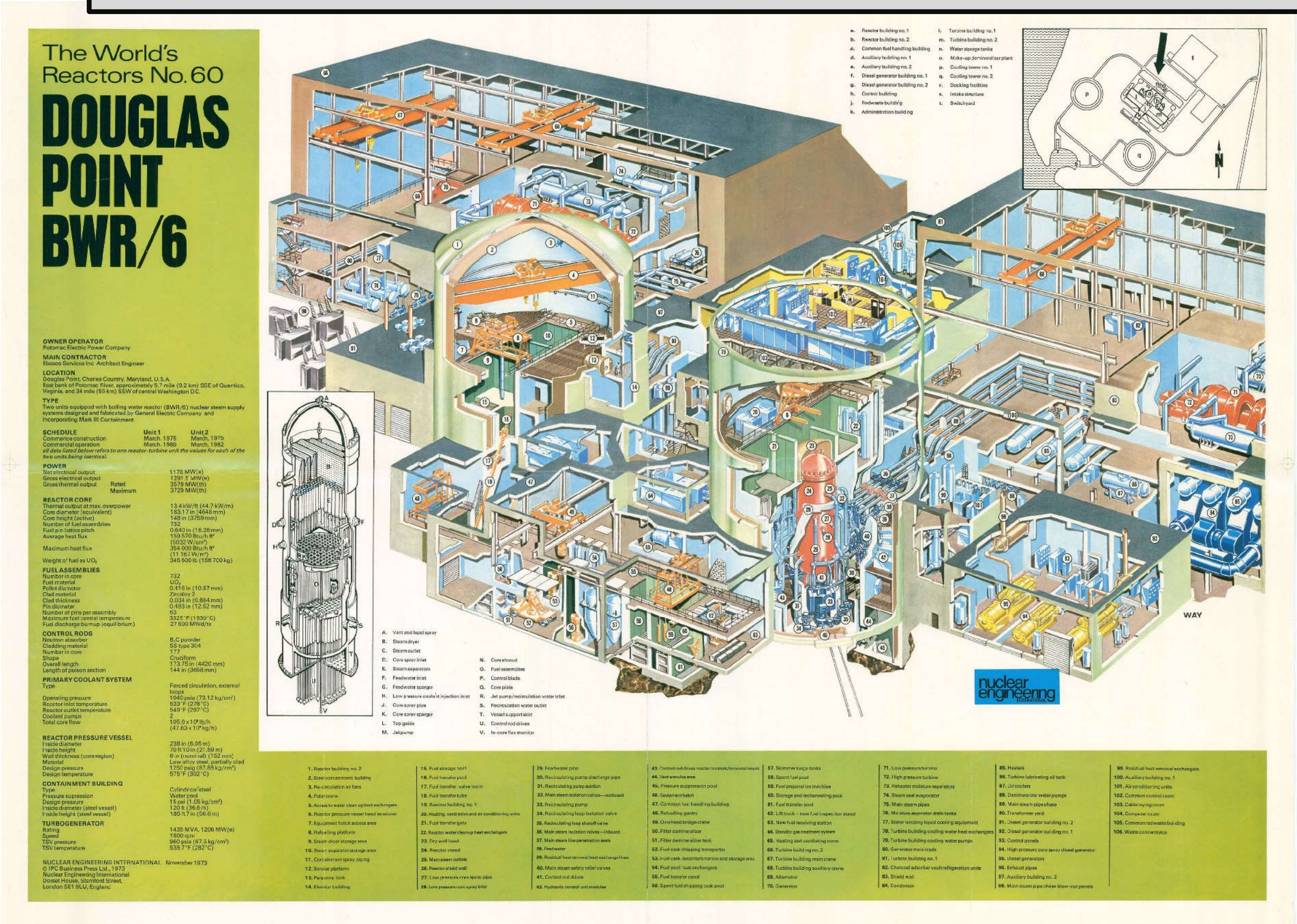
Si por un atasco aumenta la cantidad de líquido o la presión

→ %vacío ↓ reactividad ↑

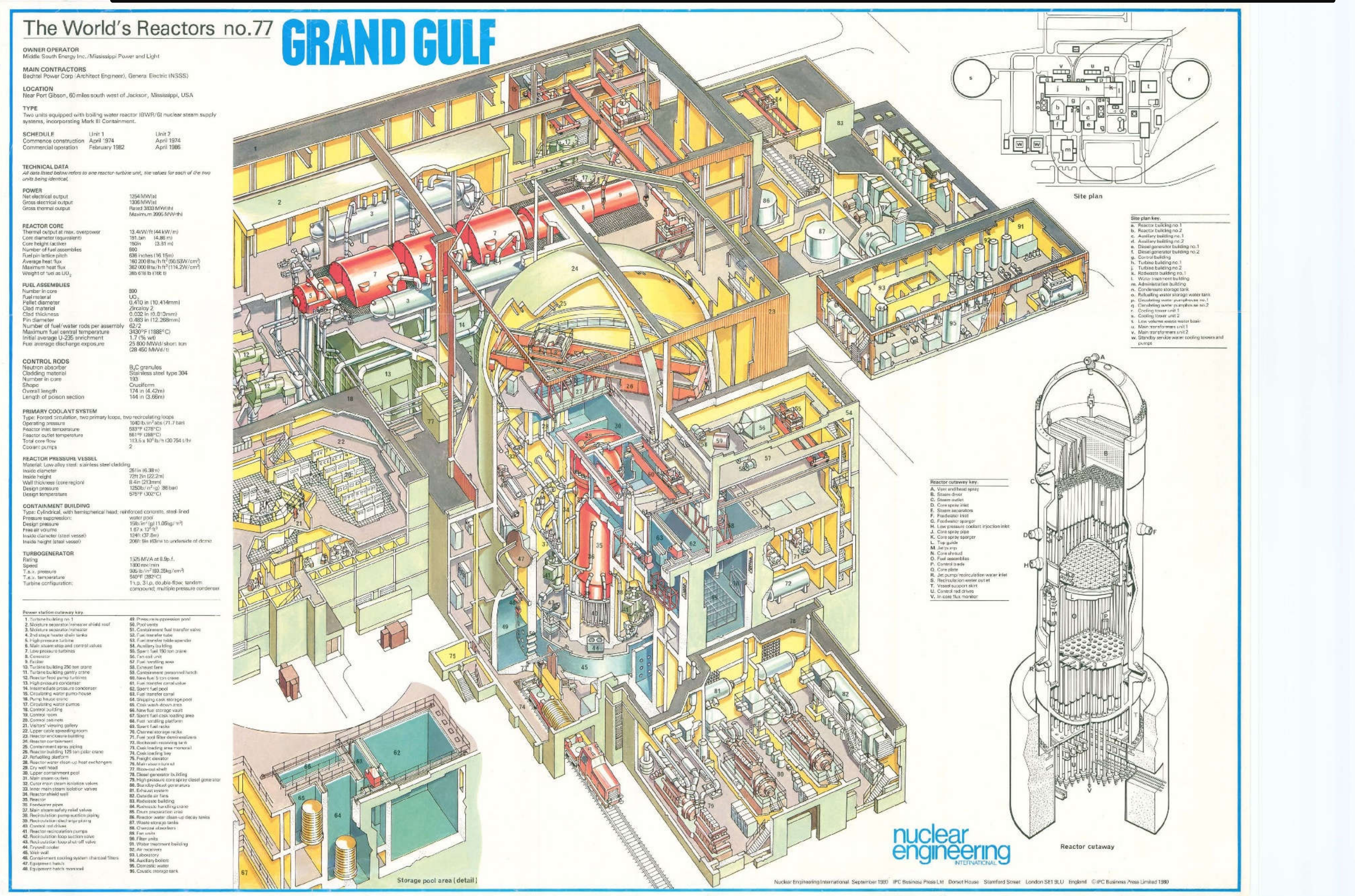
El edificio de contención de un BWR



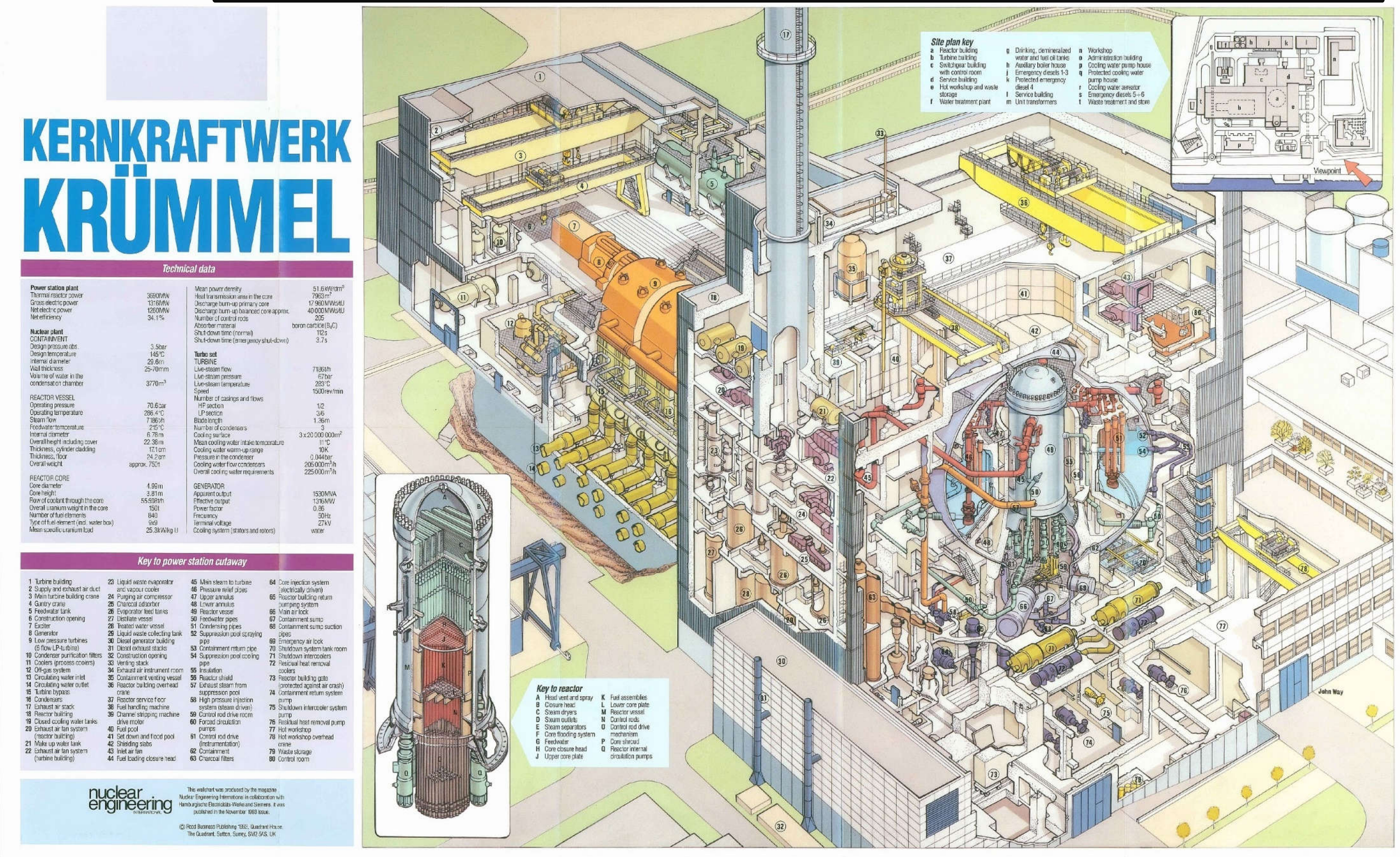
Ejemplo de reactor BWR: Douglas Point



Ejemplo de reactor BWR: Grand Gulf



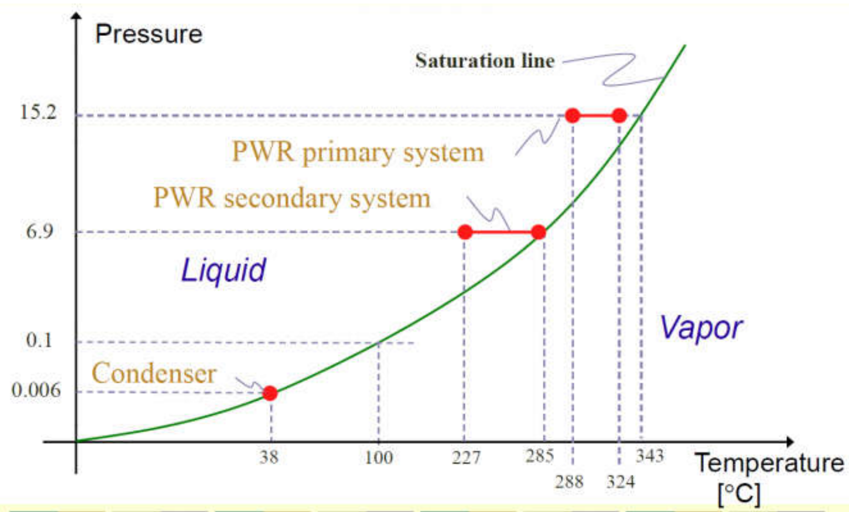
Ejemplo de reactor BWR: Krümmel (cerrada)

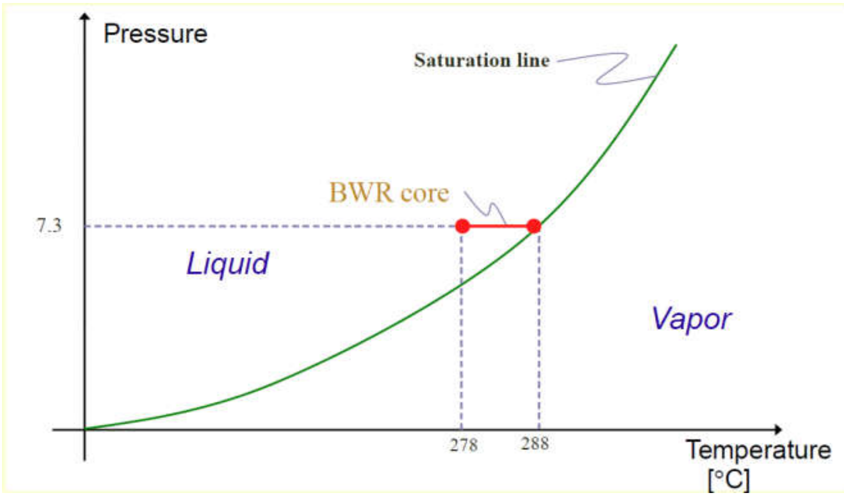


Comparación de los diagramas de fase de PWR y BWR

PWR

BWR





Reactores VVER: *Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor*

Son reactores PWR de diseño soviético (lista)

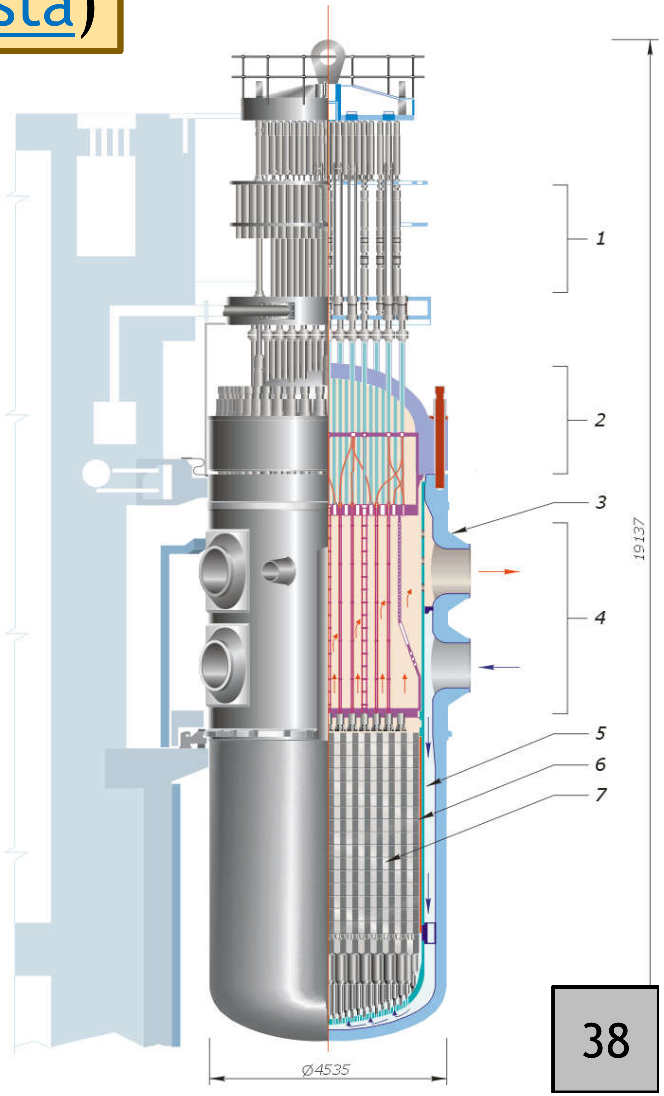
Potencias desde 300MWe a 1700MWe

VVER-1200 for AES-2006

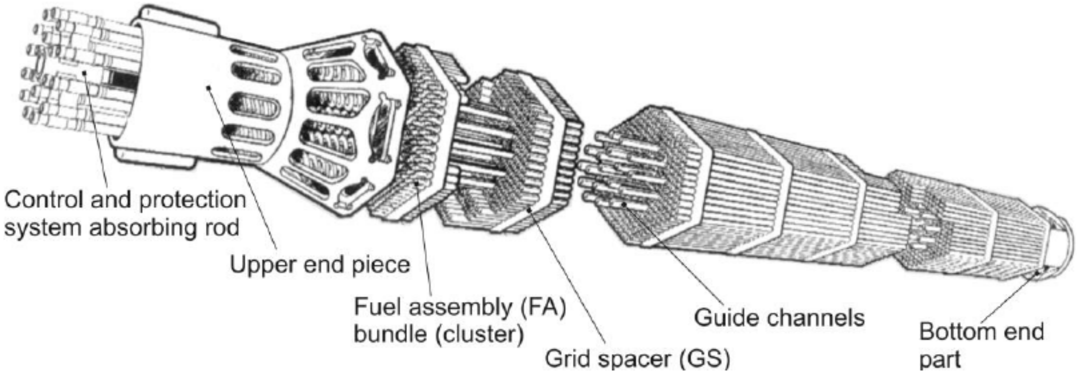
Main parameters of reactor plant

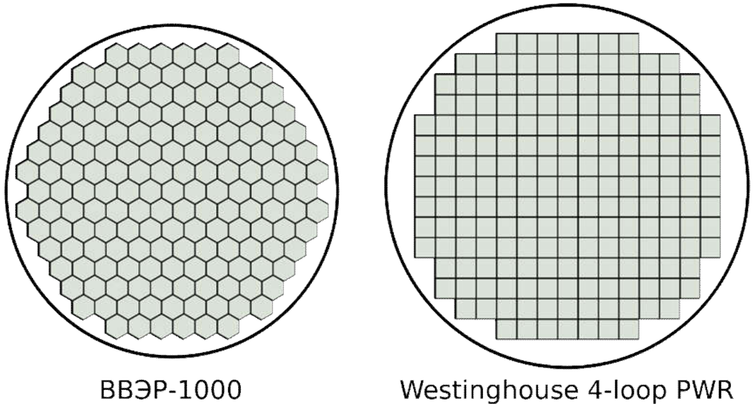
Parameters	V-428	VVER-1200
Reactor nominal thermal power, MW	3000	3200
Availability factor	0,8	0,9
Coolant pressure at the reactor outlet, MPa	15,7	16,2
Coolant temperature at the reactor inlet, °C	290	298,6
Coolant temperature at the reactor outlet, °C	320	329,7
Maximum linear heat rate, W/cm	448	420
Steam pressure at the outlet of SG steam header (absolute) MPa	6,27	7,0
Primary design pressure, MPa	17,64	17,64
Secondary design pressure, MPa	7,84	8,1
Maximum fuel burnup fraction over FAs in the FAs unloaded (in base equilibrium fuel cycle), MWD/kgU	49	до 70
Refueling period, month	12	12/(18-24)
Time of fuel residence in the core, year	4	4-5

13

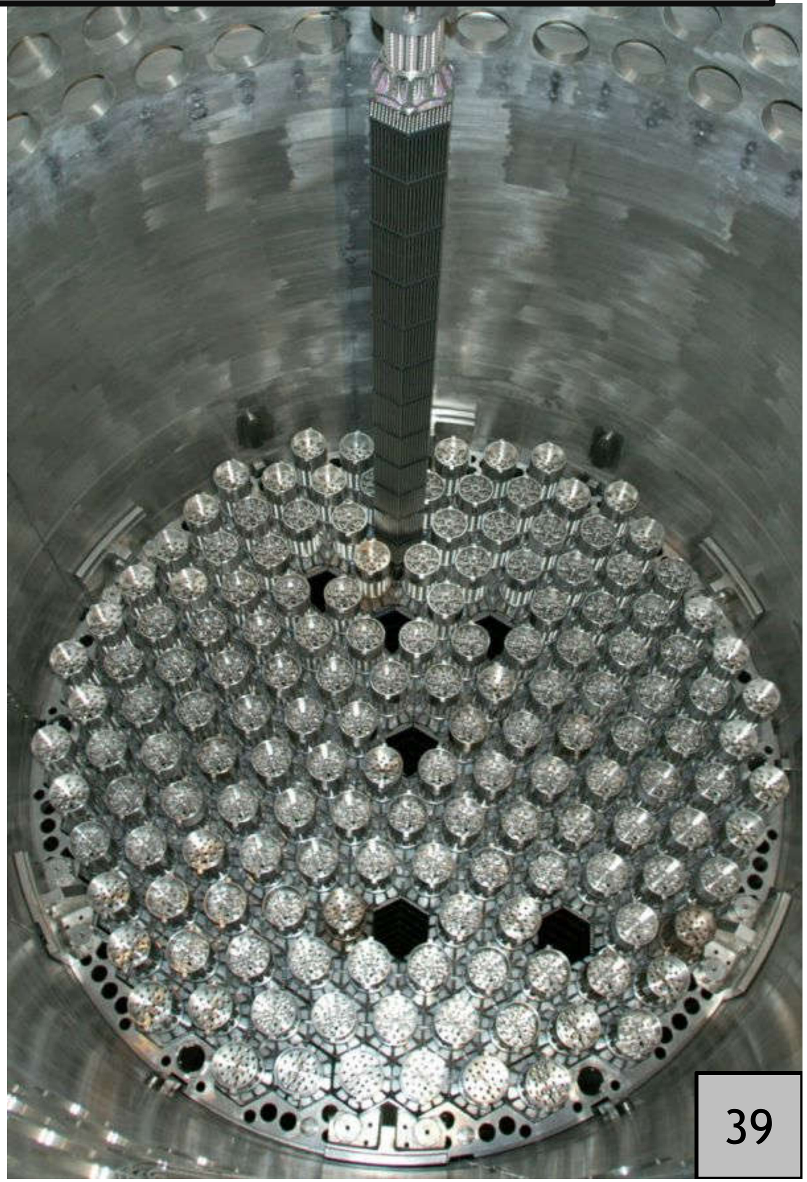


El núcleo de un reactor VVER

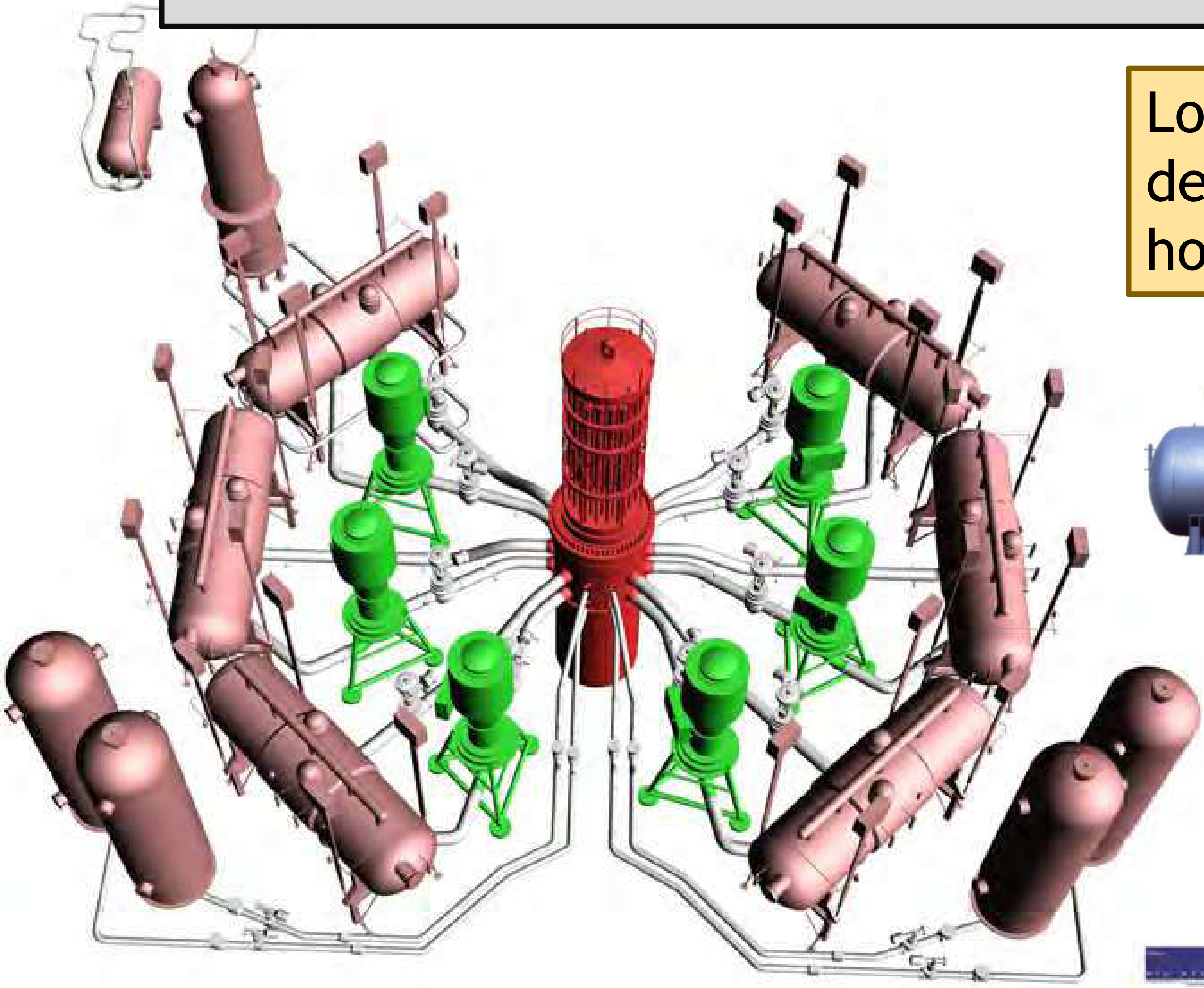




El assembly de elementos combustibles es hexagonal



Generadores de vapor y presurizador



Los generadores de vapor son horizontales