

TEMA 6.- ENERGÍA NUCLEAR

- Definiciones
- Radiactividad
- Reacciones nucleares
- Ciclo del combustible nuclear
- Residuos radiactivos
- Componentes y sistemas de un reactor nuclear
- Tipos de reactores nucleares
- Reactores de agua ligera actuales

DEFINICIONES

Introducción

- El átomo está constituido por un núcleo, con carga positiva , rodeado de electrones, con carga negativa, de modo que el átomo resulta neutro.
- El núcleo está constituido por protones y neutrones, llamándose a estas partículas nucleones:
 - el **protón** transporta una unidad de carga positiva. Se identifica con el núcleo del átomo de hidrógeno, es decir, con un átomo de hidrógeno que ha perdido su único electrón.
 - el **neutrón** es algo más pesado que el protón, y no transporta carga eléctrica. A excepción del hidrógeno, todos los átomos contienen, además de protones, uno o más neutrones.
- **Número atómico (Z)**: número de protones del núcleo. Define las características químicas del elemento, coincidiendo con su situación en la tabla periódica. Para el uranio vale 92 y para el plutonio 94.
- **Número másico (A)**: número de nucleones del átomo (protones más neutrones). El número de neutrones vendrá dado por $N = A - Z$.

DEFINICIONES

Introducción

- **Nucleido:** Especie nuclear caracterizada por determinados valores de A y Z.

Isóbaro: nucleidos con igual A

Isótonos: nucleidos con igual N

Isótopos: nucleidos con igual Z

- **Isótopo**

Las especies isotópicas poseen idénticas propiedades químicas, pero marcadas diferencias en sus características nucleares.

Se suelen notar ${}_A^ZX^Z$

Resulta más frecuente indicar sólo el número másico: X-A

El uranio es el elemento más importante en las reacciones de fisión, presentándose en la naturaleza bajo 3 especies isotópicas, en las proporciones siguientes:

Isótopo	% peso
U-234	0,0058
U-235	0,720
U-238	99,274

El torio también es importante, encontrándose de forma natural como Th-232.

Finalmente el plutonio también se emplea en fisión, pero es producido por las reacciones nucleares en el reactor.

DEFINICIONES

Defecto másico y energía de enlace

- La determinación directa de masas nucleares ha demostrado que la masa real (M) de un núcleo es siempre INFERIOR a la suma de las masas de los nucleones constituyentes . Esta diferencia se llama defecto másico.

$$\text{Defecto másico} = [Z (m_p + m_e) + (A - Z) m_n] - M$$

- Según el concepto de equivalencia entre masa y energía dada por la ecuación de Einstein $E = m c^2$, la energía de enlace es la energía equivalente al defecto másico. Representa la energía que habría que aportar al núcleo para separar sus nucleones, o bien la energía liberada si los nucleones individuales se uniesen para constituir un núcleo.
- En física nuclear la energía se mide en MeV ($1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$). Tomando la velocidad de la luz ($2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$) y la unidad de masa atómica ($1 \text{ uma} = 1,66 \times 10^{-24} \text{ g}$) se tiene que:

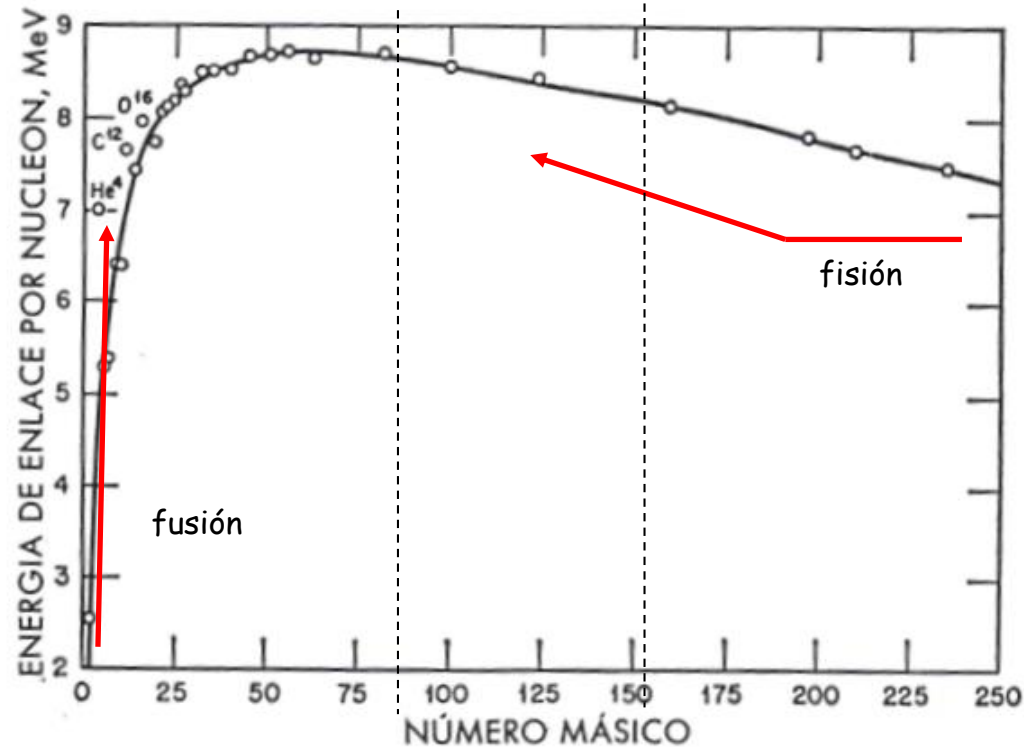
$$E (\text{MeV}) = 931 m (\text{uma})$$

- La energía media de enlace por nucleón es:

$$\frac{EE}{A} = \frac{931}{A} \{ (1,007596 + 0,000549)Z + 1,00898(A - Z) - M \}$$

DEFINICIONES

Defecto másico y energía de enlace



[Glasstone, 1975]

Variación de la energía de enlace por nucleón con el número másico

- En todo proceso en el que núcleos de EE/A baja (poco estables) se convierten en otros de EE/A mayor (más estables) se libera energía
- La fusión supone la unión de átomos ligeros para dar uno más pesado (parte izquierda de la curva) y la fisión la escisión de un átomo pesado para dar átomos más ligeros (parte derecha de la curva)

RADIATIVIDAD

Causas

En los núcleos hay fuerzas atractivas (p-p, n-n y p-n) proporcionales a A y fuerzas repulsivas (p-p) de tipo electrostático, proporcionales a Z^2

- Existe una relación n/p que garantiza la estabilidad ($n/p_{\text{óp}}$). Dicha relación crece con Z

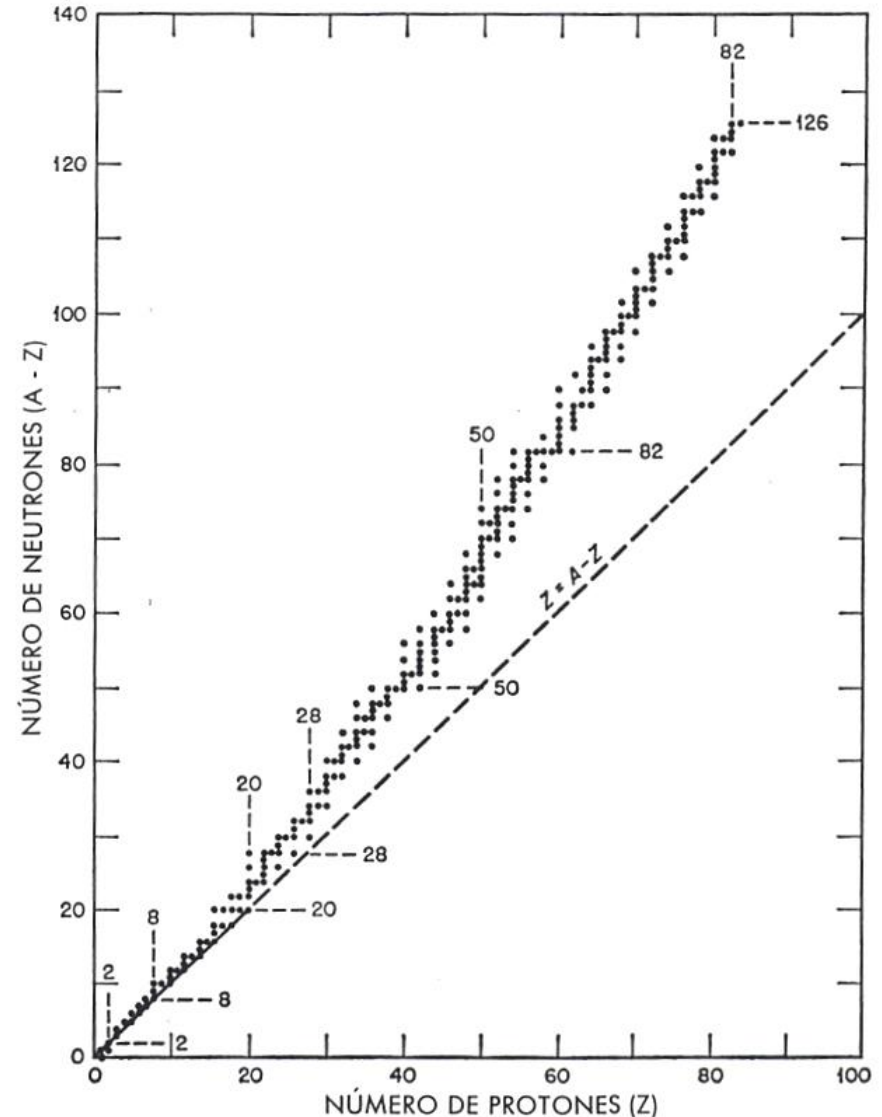
- La radioactividad se puede deber a:

- número másico elevado:

n/p saturado $< n/p_{\text{óp}}$ (transuránicos, $Z_U = 84$)

- número másico medio, con $n/p > n/p_{\text{óp}}$ (productos de fisión)

- número másico medio, con $n/p < n/p_{\text{óp}}$ (no interés en fisión)



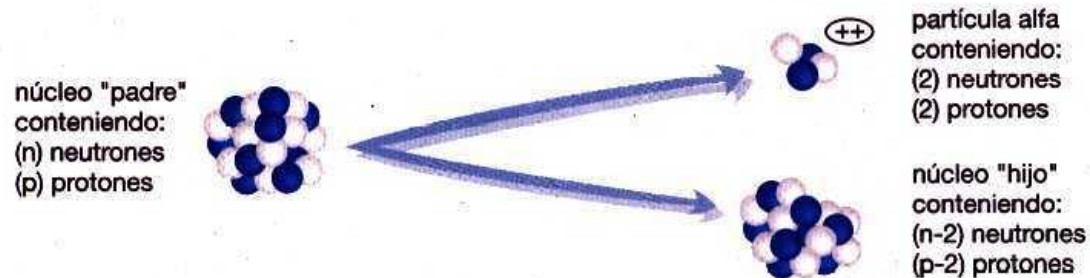
Número de neutrones y protones existentes en los núcleos estables.

[Glasstone, 1975]

RADIATIVIDAD

Tipos

- La radioactividad consiste en la desintegración de un átomo, emitiendo una partícula o radiación característica, transformándose así en otro más estable, que podrá ser o no radioactivo.
- La radioactividad se puede deber a tres causas:
 - **número másico elevado.**- Se ha “saturado” la capacidad máxima para contener neutrones. La ganancia de estabilidad se puede hacer por 2 mecanismos:
 - emisión de una partícula α (núcleo de helio: 2 protones y 2 neutrones)



[Foro Nuclear, 2001]

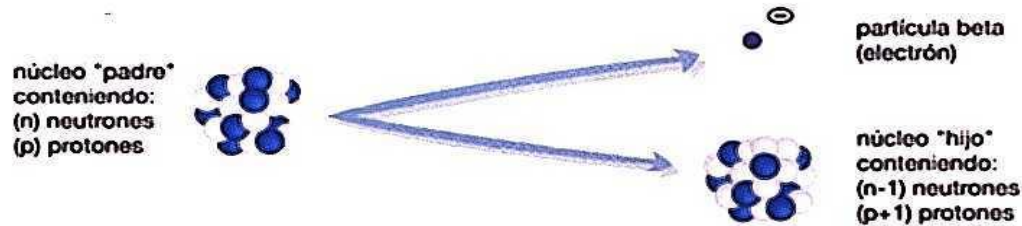
- emisión de una partícula β^- (electrón). Como el núcleo no contiene electrones, esta partícula procede de:



(neutrino: partícula neutra de masa casi despreciable)

RADIATIVIDAD

Tipos

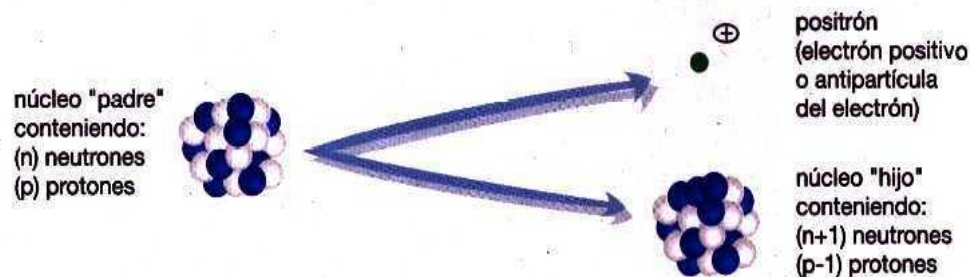


[Foro Nuclear, 2001]

- **número másico no muy alto y exceso de neutrones.**- La relación neutrón/protón no se corresponde a la de estabilidad (figura anterior). Se emite una partícula β^- , similar a la anterior
- **número másico no muy alto y defecto de neutrones.**- Si no hay neutrones suficientes para alcanzar la razón de estabilidad lo más normal es que se emita una partícula β^+ (positrón) procedente de la transformación:



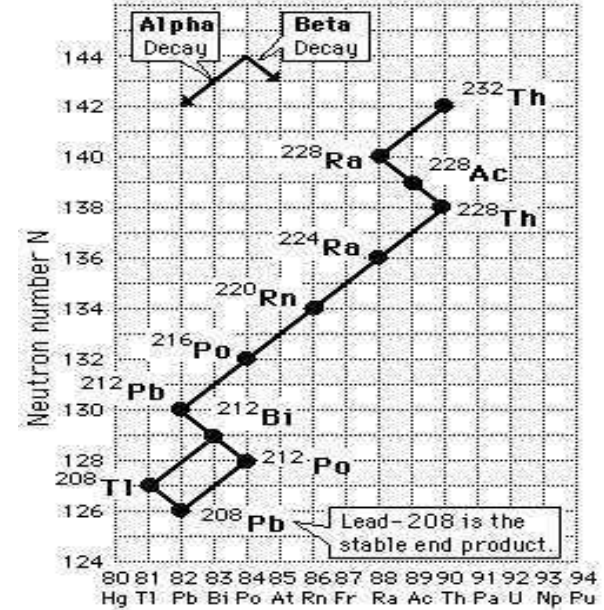
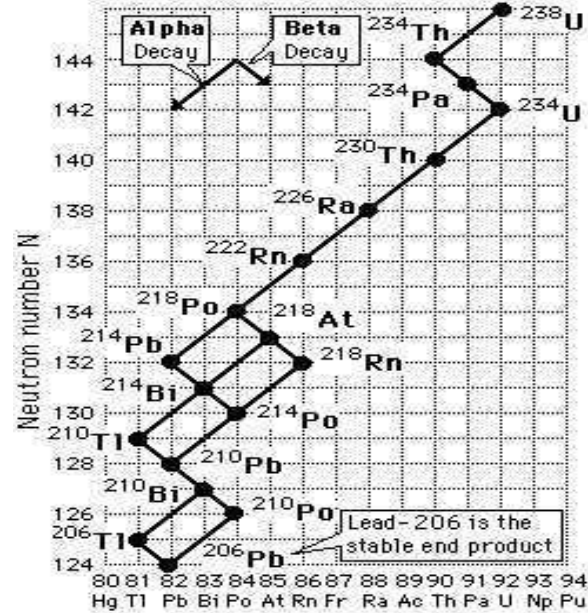
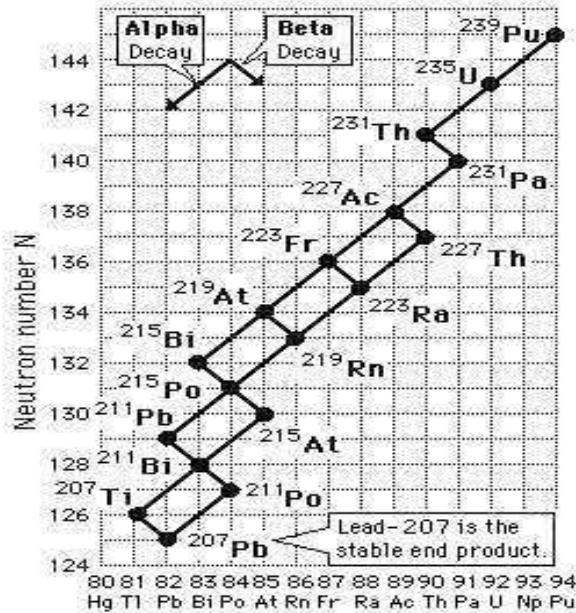
Este tipo de radioactividad no se da en los reactores de fisión



[Foro Nuclear, 2001]

RADIATIVIDAD

Tipos



[Glasstone, 1975]

RADIATIVIDAD

Tipos Medidas

- La desintegración radiactiva viene acompañada de radiación γ . Se trata de radiaciones electromagnéticas, similares a los rayos X. Su aparición es debida a que tras la transformación radiactiva el núcleo queda en un estado excitado, liberándose este exceso de energía mediante la emisión de fotones.

- Actividad: número de desintegraciones por segundo (Bq)

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N \quad N_0 \bar{t} = \int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda t} dt \Leftrightarrow \bar{t} = \frac{1}{\lambda}$$

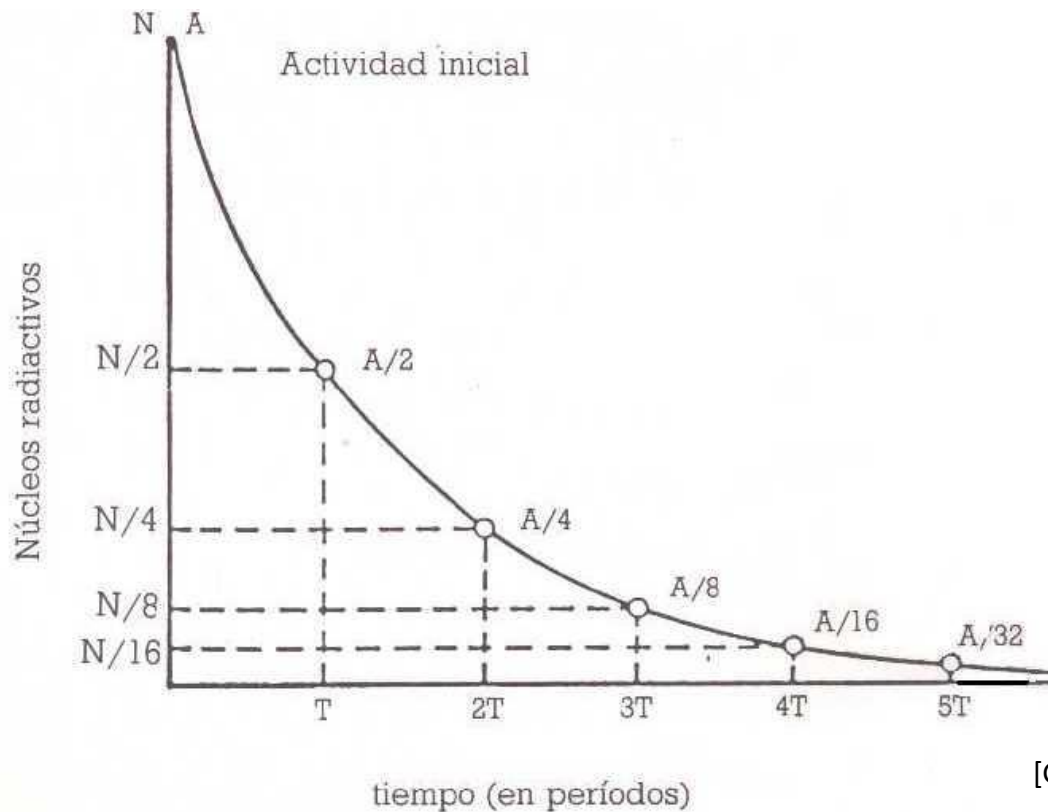
λ , constante de desintegración (s^{-1})

- Característica de cada isótopo
- Independiente de condiciones externas
- Constante en el tiempo
- Su inverso es la vida media

$T_{1/2}$, período de semidesintegración

RADIATIVIDAD

Medidas



[Glasstone, 1975]

Evolución temporal de la radiactividad de una sustancia

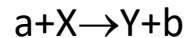
Otras unidades (no del SI): Curio (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

REACCIONES NUCLEARES

Tipos

- Es un tipo de reacción donde se produce un encuentro entre una partícula nuclear "proyectil" y un núcleo llamado "blanco", obteniéndose otro núcleo y la emisión de una partícula nuclear y/o fotón.



- Entre ellas destacan las reacciones neutrónicas, donde el proyectil es un neutrón. Pueden ser reacciones de dispersión, de captura y de fisión. En todas ellas hay una primera etapa en la que el núcleo blanco absorbe el neutrón, formándose un núcleo compuesto en un estado excitado (elevada energía interna).
- Se llama sección eficaz (σ) a la probabilidad de que ocurra la reacción. Se mide mediante un área que representa la porción del núcleo en la que si se produce el choque de una partícula se produce una reacción nuclear ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$)
- Tipos de reacciones neutrónicas:
 - Dispersión
 - Captura
 - Fisión

REACCIONES NUCLEARES

Tipos

REACCIONES NUCLEARES			APLICACIÓN
DISPERSIÓN		<p>Elástica: la energía sustraída al neutrón la recoge el núcleo como energía cinética</p> <p>Inelástica: la energía sustraída al neutrón la recoge el núcleo como energía interna</p>	Moderación en reactores térmicos. Deseable mediante dispersiones elásticas, más probable con núcleos ligeros (agua ligera, pesada y grafito)
ABSORCIÓN	CAPTURA RADIATIVA (n;γ)	Fértiles: U-238 → Pu-239	Producción de combustible
		No Fértiles: U-235 , Pu-239	Indeseable
	CAPTURA PARTÍCULAS (n;α) y (n;p)	Poco probable ; sólo algunos núcleos ligeros B-10 + n → Li-7 + α	Control del reactor (B-10)
	CAPTURA ACTIVACIÓN	Activación de componentes estructurales	Indeseables. Producen RAA
	FISIÓN (n:f)	Isótopos físiles: U-235, Pu-239	Producción de potencia

REACCIONES NUCLEARES

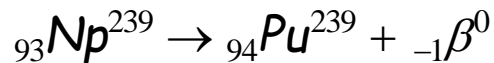
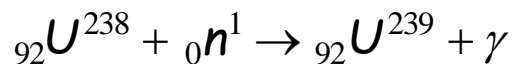
Tipos

- **Reacciones neutrónicas de dispersión:** El núcleo compuesto emite inmediatamente un neutrón de inferior energía cinética al capturado. La energía residual se queda en el núcleo. Si esta energía se manifiesta como energía cinética se habla de dispersión elástica; si como energía interna, de dispersión inelástica.

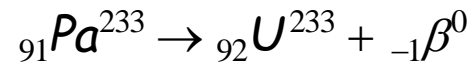
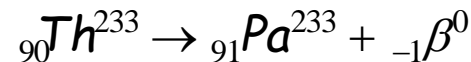
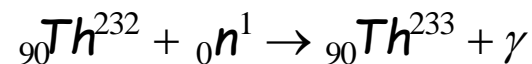
Los neutrones de elevada energía cinética (varios MeV) se denominan rápidos. Debido a las reacciones de dispersión pierden energía, convirtiéndose en lentos (varios eV). Cuando su energía cinética es similar a la de los átomos que constituyen el medio se habla de neutrones térmicos (0,025 eV).

- **Reacciones neutrónicas de captura:** El núcleo compuesto retiene el neutrón, emitiendo el exceso de energía como radiación γ . Estas reacciones, muy frecuentes, se dan con más facilidad con neutrones lentos. Dos casos son de interés en reactores de fisión:

U-238:



Th-232:



En ambos casos se generan isótopos que se encuentran en trazas en la naturaleza, a partir de otros más abundantes.

REACCIONES NUCLEARES

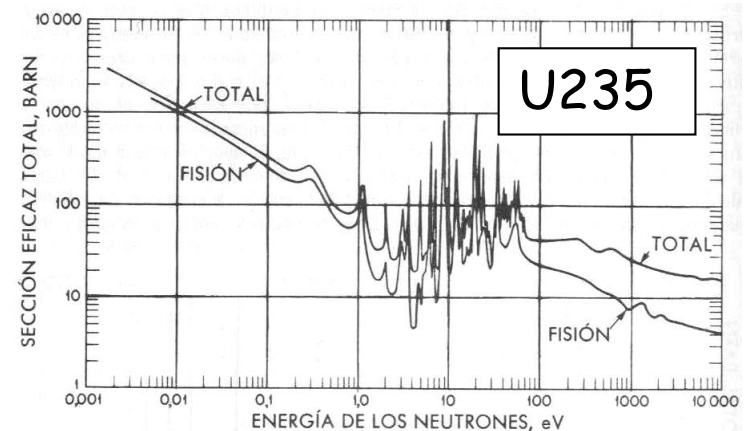
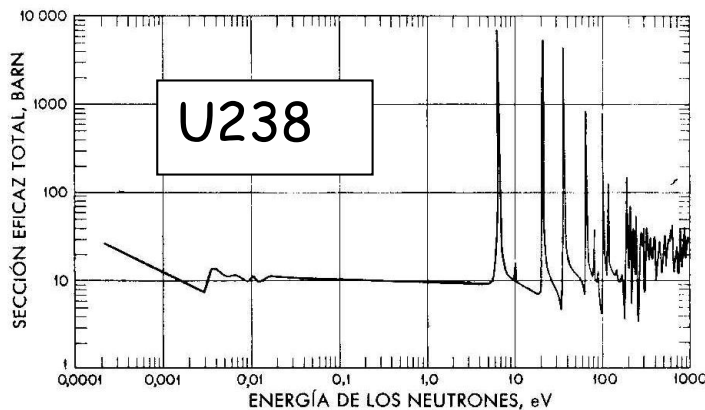
Tipos

- **Reacciones neutrónicas de fisión:** cuando el neutrón incide sobre ciertos núcleos de número másico elevado (elevadas fuerzas repulsivas) es posible que se produzca la escisión del núcleo en dos fragmentos más ligeros (productos de fisión, PF) y algunos neutrones.

Los neutrones lentos provocan PF de masas desiguales (fisión asimétrica). Los neutrones rápidos incrementan la probabilidad de producir fisión simétrica.

Sólo el U-233, U-235 y Pu-239 tienen suficiente estabilidad para ser almacenados durante largo tiempo y ser fisionados por neutrones de cualquier energía (desde térmicos hasta rápidos). Se llaman isótopos físi les. De ellos sólo el U-235 existe en cantidades apreciables en la naturaleza. Los otros se obtienen en un reactor a partir del Th-232 y del U-238 tras dos desintegraciones β -

El Th-232 y el U-238 requieren neutrones rápidos para su fisión, llamándoseles **fisionables**. Si la energía es inferior a 1 MeV la reacción que ocurre es la de captura ya descrita. Como pueden generar isótopos físi les se les denomina también isótopos **fértiles**.



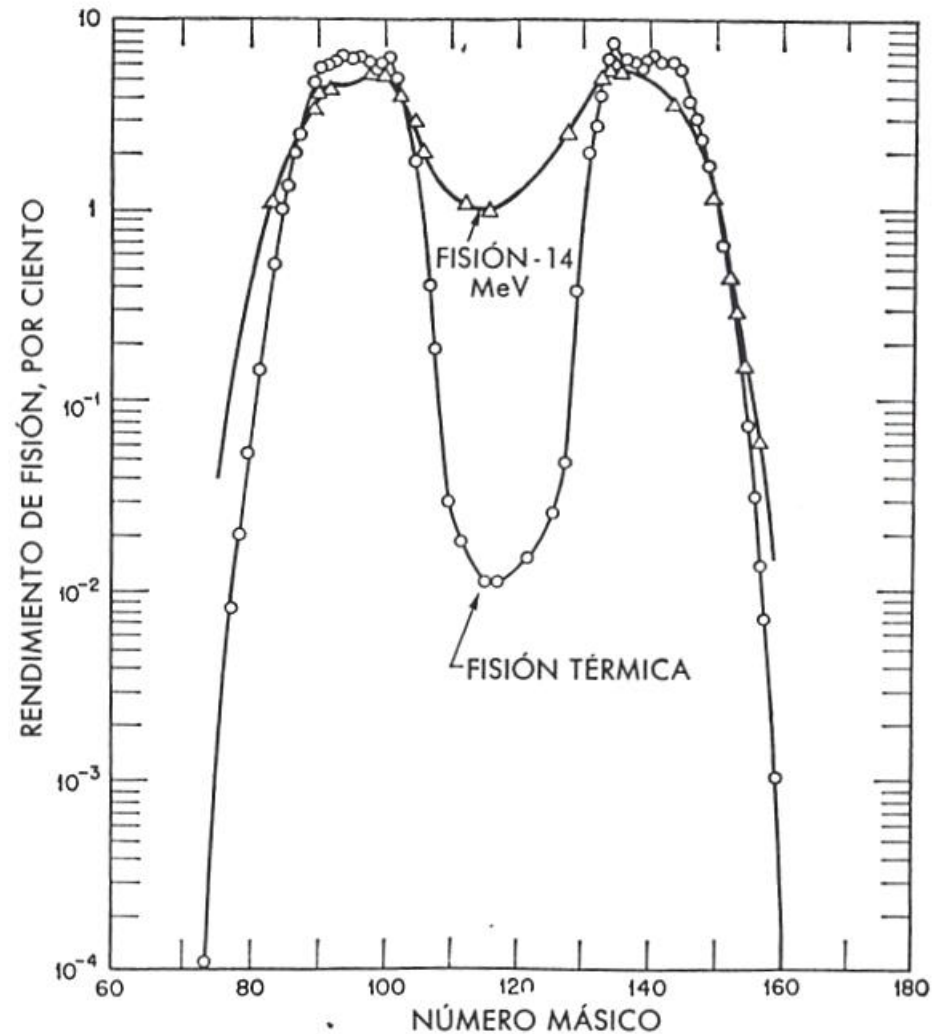
REACCIONES NUCLEARES

Fisión

El rendimiento de fisión se define como la proporción de fisiones nucleares que originan productos de un número másico determinado.

Los números másicos de casi todos los productos de fisión se distribuyen en dos amplios grupos: un grupo ligero con números másicos entre 80 y 110 y un grupo pesado con números másicos entre 125 y 155. El tipo de fisión más probable produce fragmentos de números másicos 95 y 139. La fisión del U-235 es asimétrica en la gran mayoría de los casos.

Durante el proceso de fisión, los fragmentos de fisión quedan fuertemente cargados y al moverse a grandes velocidades producen una alta ionización a su paso a través de la materia, siendo de gran importancia para el proyecto de los reactores evitar que dichos fragmentos escapen del elemento combustible.



Rendimiento de fisión en función del número másico

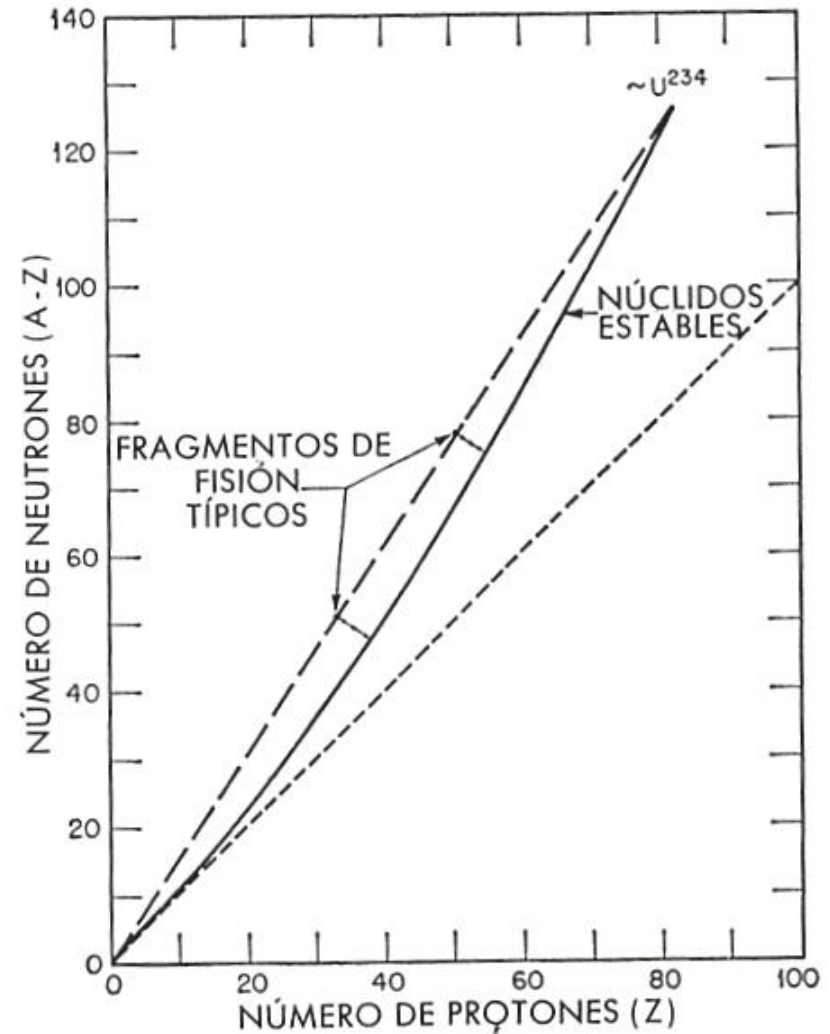
REACCIONES NUCLEARES

Fisión

El U-236, formado al capturar un neutrón en U-235, tiene una relación neutrón/protón de 1,57. Esta relación se mantiene al escindirse en dos fragmentos de $A \approx 95$ y $A \approx 140$. Para ser núcleos de masa intermedia esa relación es muy alta, y si su excitación es suficiente se emiten algunos neutrones.

Este número es insuficiente para llegar a la razón de estabilidad, ocurriendo desintegraciones β^- . Son corrientes 3 desintegraciones hasta alcanzar la estabilidad.

Todos los nucleidos intermedios, fuertemente radioactivos, son los PF



Inestabilidad de los fragmentos de fisión

[Glasstone, 1975]

REACCIONES NUCLEARES

Fisión

Los productos de fisión y neutrones pueden ser:

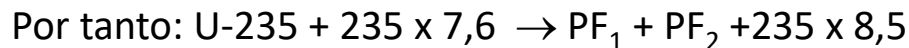
- inmediatos: aparecen a los 10^{-14} s de tener lugar la reacción. Son núcleos más ligeros, fuertemente radioactivos, neutrones rápidos (2 MeV) y fotones.
- diferidos: son los descendientes de la desintegración de los PF inmediatos. Se emiten durante algunos minutos después de la reacción pero con intensidad decreciente. Los neutrones diferidos sólo son un 1% de los totales, pero su retardo es esencial para mantener y controlar la reacción.
- liberación de energía, debido al defecto másico de la reacción.

Un método aproximado, despreciando la energía de los neutrones es:

EE/A para el U-235 es de 7,6 MeV. Como su número atómico es 92:



Los productos de fisión están comprendidos en $95 < A < 140$, teniendo así $\text{EE}/A \approx 8,5$ MeV. Así pues:



Es decir, la fisión de un núcleo de U-235 libera aproximadamente 210 MeV

REACCIONES NUCLEARES

Fisión

La distribución aproximada de la energía de fisión (MeV):

Energía cinética de los PF	165
Radiación gamma instantánea	7
Energía cinética neutrones de fisión	5
Partículas beta (desint. PF)	7
Radiación gamma de los PF (desint.)	6
Neutrinos	10
Total	~ 200

Casi el 7% de la energía liberada se debe a la desintegración radioactiva de los PF. Esta liberación es gradual, siendo la responsable de la liberación de calor del combustible “gastado” una vez extraído del núcleo del reactor, así como tras una parada del reactor.

REACCIONES NUCLEARES

Fisión: Grados de quemado

Algunas cifras:

$$200 \text{ MeV/núcleo} \times 1,602 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} = 3,2 \times 10^{-11} \text{ J/fisión}$$

$$3,2 \times 10^{-11} \text{ J/fisión} \times 6,02 \times 10^{23} \text{ átomos/mol} = 1,9 \times 10^{13} \text{ J/mol}$$

$$1 \text{ g de U-235 producirá } 1,9 \times 10^{13} \text{ J/mol} \times 1 \text{ mol}/235 \text{ g} = 8,2 \times 10^{10} \text{ J/g}$$

$$\text{El "poder calorífico" será de } 8,2 \times 10^4 \text{ MJ}/10^{-3} \text{ kg} = \mathbf{82000 \text{ GJ/kg}}$$

$$\mathbf{1 \text{ g U-235/día produce } 949966 \text{ W} \approx \mathbf{1 \text{ MW}}}$$

- En una central de 1000 MWe se tendrá un consumo térmico de 3000 MWt (3,16 kg/día de U-235)

- con un enriquecimiento de uranio de 3% se tendrá un consumo de combustible de:

$$3,16 \text{ kg U-235/d} \times 100 \text{ kg U} / 3 \text{ kg U-235} = 105,3 \text{ kg U/d}$$

- la energía que se saca del uranio enriquecido al 3% es de:

$$3000 \text{ MWt} \cdot \text{d} / 105,3 \text{ kg U} \times 1000 \text{ kg U} / 1 \text{ ton U} = 28490 \text{ MWt} \cdot \text{d} / \text{ton U}$$

REACCIONES NUCLEARES

Fisión: Grados de quemado

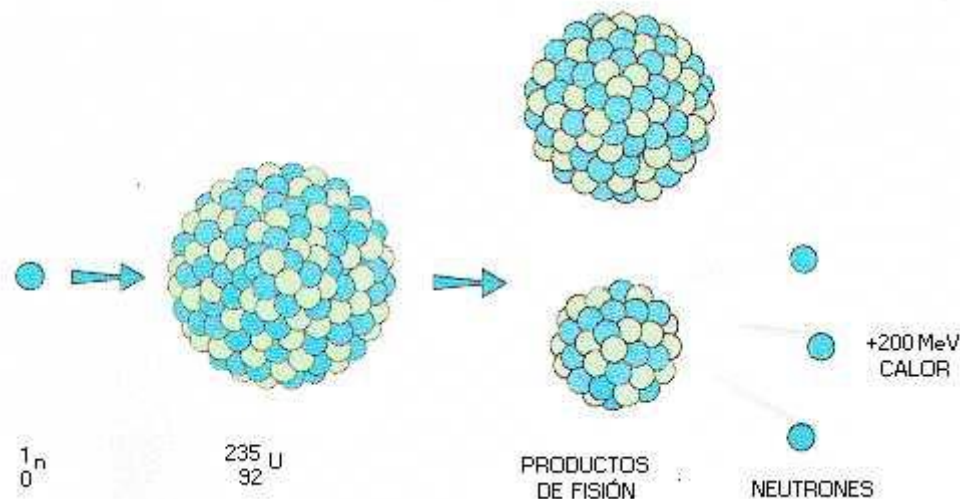
- Tecnología actual: carga de U-235 de una PWR de 3000 MWt para 1 año = 2,8 ton
 - Con un enriquecimiento del 3% supone una cantidad de uranio: $2,8 / 0,03 = 93$ ton
 - Aprovechamiento teórico: $3000 \text{ MW} \times 365 \text{ d} / 93 \text{ ton} =$
 $= 12000 \text{ MWt-d /ton U}$
 - Como el combustible realiza 3 ciclos anuales se alcanza un quemado final de 36000 MWt-d/ton U

REACCIONES NUCLEARES

Reacciones en cadena

Las reacciones de fisión se caracterizan por:

- son autosostenidas (reacción en cadena), debido a la liberación de neutrones. Esta reacción en cadena sólo es posible con núcleos físiles.



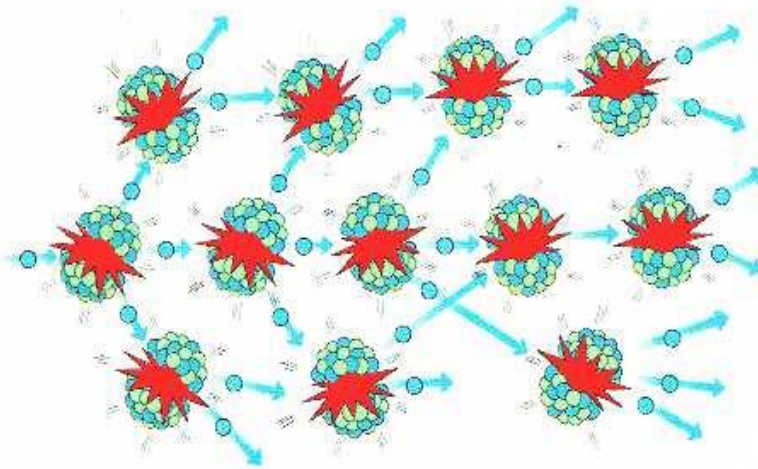
[Foro Nuclear, 2001]

La probabilidad de la reacción de fisión aumenta cuando disminuye la energía de los neutrones proyectiles, que por esta razón han de ser frenados (moderados) antes de que interaccionen con el combustible.

REACCIONES NUCLEARES

Reacciones en cadena

El núcleo que absorbe el neutrón queda “excitado” se estira y se rompe liberando 2 ó 3 neutrones muy energéticos los cuales después de ser moderados mediante reacciones de dispersión elástica pueden provocar otras reacciones de fisión que liberarán nuevos neutrones. Este efecto multiplicador se llama “reacción en cadena”.



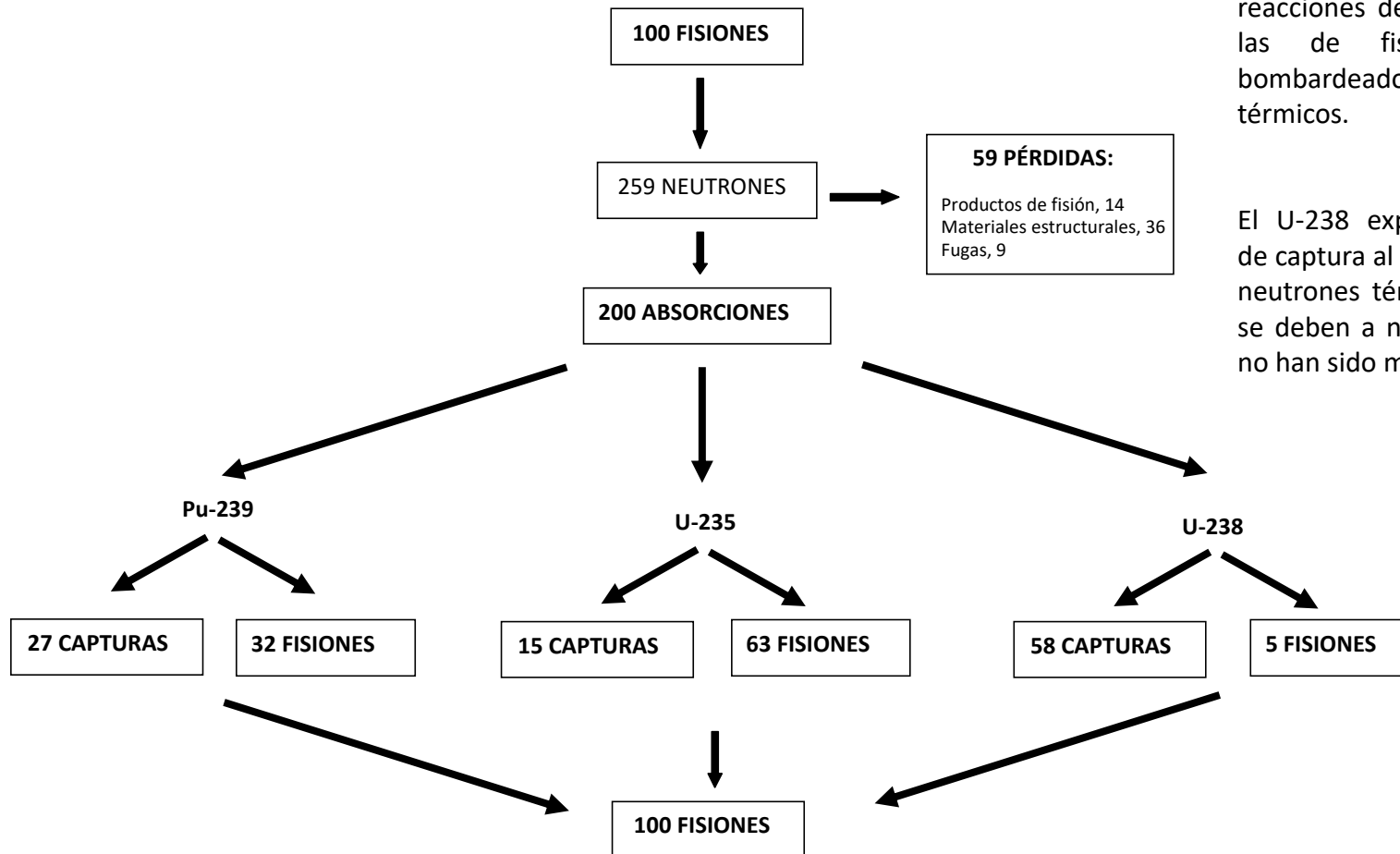
[Foro Nuclear, 2001]

Si se logra mantener una población de neutrones tal que el número de fisiones que tienen lugar por unidad de tiempo permanece constante, se dice que la reacción está controlada. Cuando la reacción de fisión perdura en el sistema sin extinguirse se dice que es una fisión automantenida. La mínima cantidad de Uranio que permite alcanzar ese automantenimiento de la reacción en cadena se denomina “**masa crítica**”.

REACCIONES NUCLEARES

Inventario en el reactor

En un reactor con neutrones térmicos que emplee como combustible U-235 se tiene, en condiciones de criticidad, el siguiente balance neutrónico:



El Pu-239 y el U-235 experimentan reacciones de captura, además de las de fisión, cuando son bombardeados con neutrones térmicos.

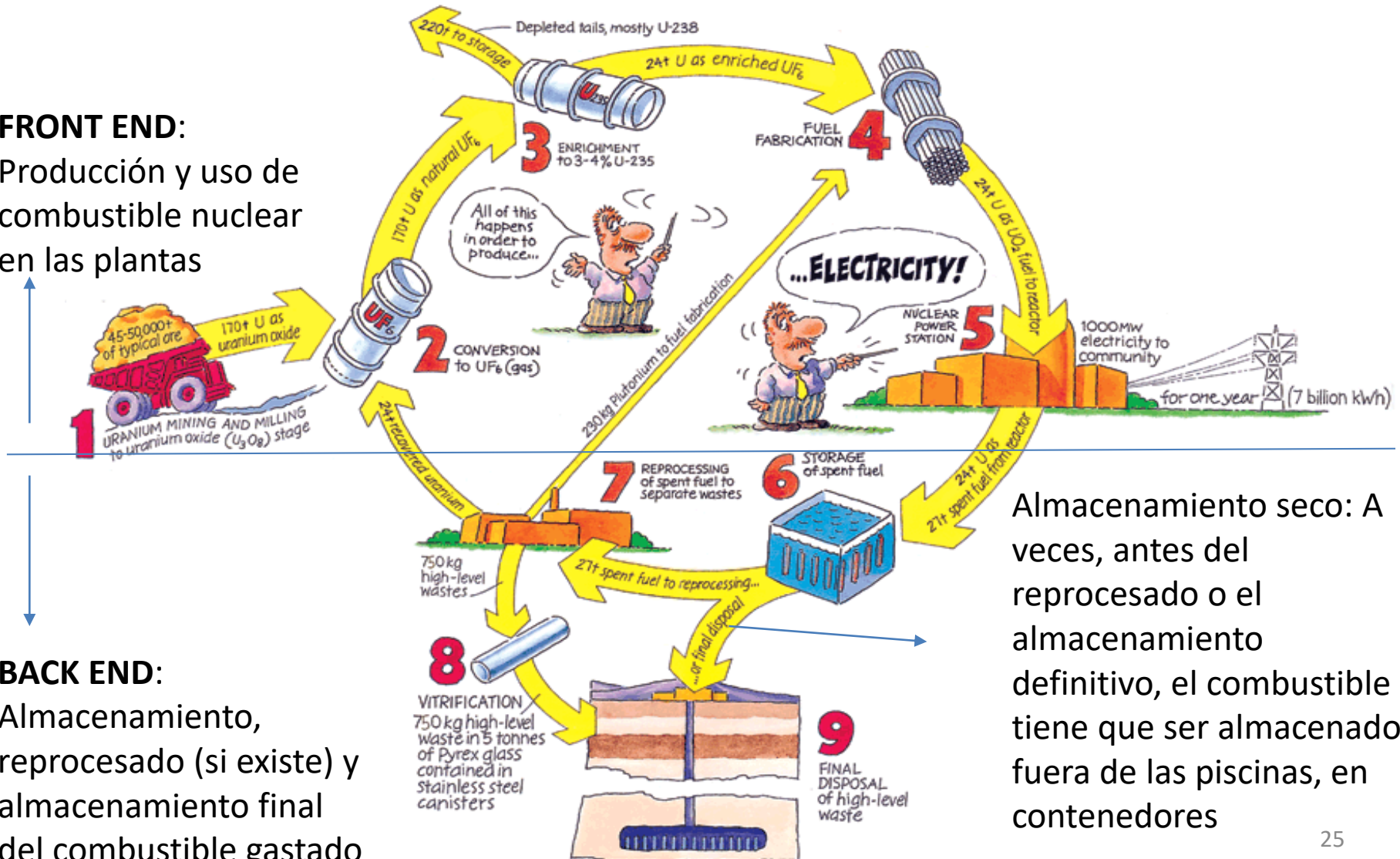
El U-238 experimenta reacciones de captura al ser bombardeado con neutrones térmicos. Las 5 fisiones se deben a neutrones rápidos que no han sido moderados.

CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

- Conjunto de operaciones necesarias para la fabricación del combustible destinado a las CC.NN., y para el tratamiento del combustible gastado.

FRONT END:

Producción y uso de combustible nuclear en las plantas



BACK END:

Almacenamiento, reprocesado (si existe) y almacenamiento final del combustible gastado

Almacenamiento seco: A veces, antes del reprocesado o el almacenamiento definitivo, el combustible tiene que ser almacenado fuera de las piscinas, en contenedores

CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

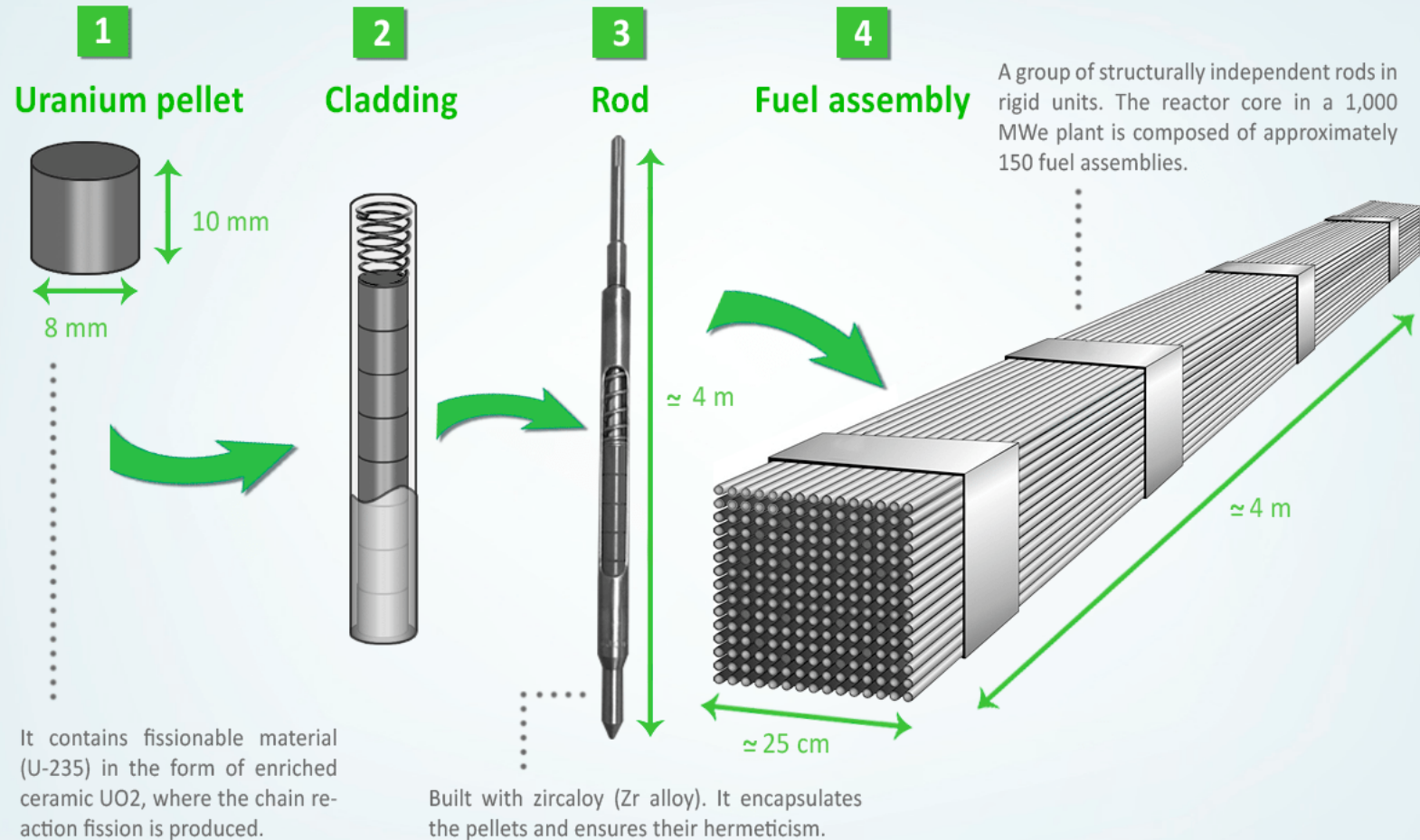
Front End

- “Front end” incluye la minería, producción de concentrados de uranio, conversión, enriquecimiento (si se requiere), fabricación de elementos combustibles y uso en el reactor
 - Minería: El concentrado de uranio (U_3O_8), también llamado “yellow cake”, es extraído en minas a cielo abierto o con otras técnicas, como la lixiviación in situ.
 - Conversión: Se emplea un proceso químico para convertir el concentrado de uranio en hexafluoruro de uranio (UF_6), que es un gas.
 - Enriquecimiento (si se requiere): El contenido de U_{235} se incrementa del 0,7% del uranio natural a valores en el rango del 4-5%. Se realiza en centrifugadoras de alta velocidad.
 - Fabricación de elementos combustibles: El UF_6 enriquecido es convertido en UO_2 en polvo, que se peletiza para ser insertado en varillas que luego se agrupan para dar lugar al “elemento combustible” que será introducido en el reactor
- Reservas de uranio:
 - Estimado (1998) en 2.500.000 toneladas de uranio mineral, con un precio menor de 80 \$/kg U
 - 24,5% en Australia – 17,3% en Kazakhstan - 13% en Canadá – 8,6% en Sudáfrica
 - En Europa sólo 1,2%
 - La mayor parte de las minas se encuentra en países políticamente estables: ventaja geoestratégica

CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

Elemento combustible

Manufacture of a fuel assembly

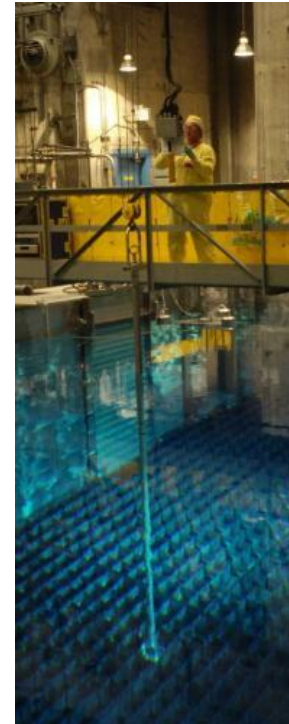


CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

- Modificaciones del combustible en el reactor
 - Antes de ser colocado en el reactor: UO_2 , revestimiento y componentes estructurales
 - Tras la irradiación en el reactor:
 - Productos de fisión (PF) emisores beta y gamma. Parte del U-235 se transforma en U-236 (capturas de no fisión) y parte del U-238 se transforma en elementos transuránicos (TRU), incluyendo Pu-239. Son emisores alfa
 - Parte de las fisiones del Pu-239 (equivalente a U-235), contribuyen a la generación de potencia y creación de PF
 - El U-236, PF, y los TRU limitan la tasa de quemado al ser la mayoría venenos neutrónicos. Por ello, los elementos combustibles se deben retirar del reactor aunque todavía contengan U-235 y Pu-239
 - La retirada de los elementos combustibles se realiza en la recarga, donde se renuevan entre 1/3 y 1/4 de los elementos del reactor. Las recargas tienen lugar entre 12, 18 ó 24 meses
 - El revestimiento y los elementos estructurales se activan como consecuencia de la operación (se vuelven radiactivos)
- Un reactor de 1.000 MWe consume entre 20 y 30 toneladas de combustible al año



Combustible fresco



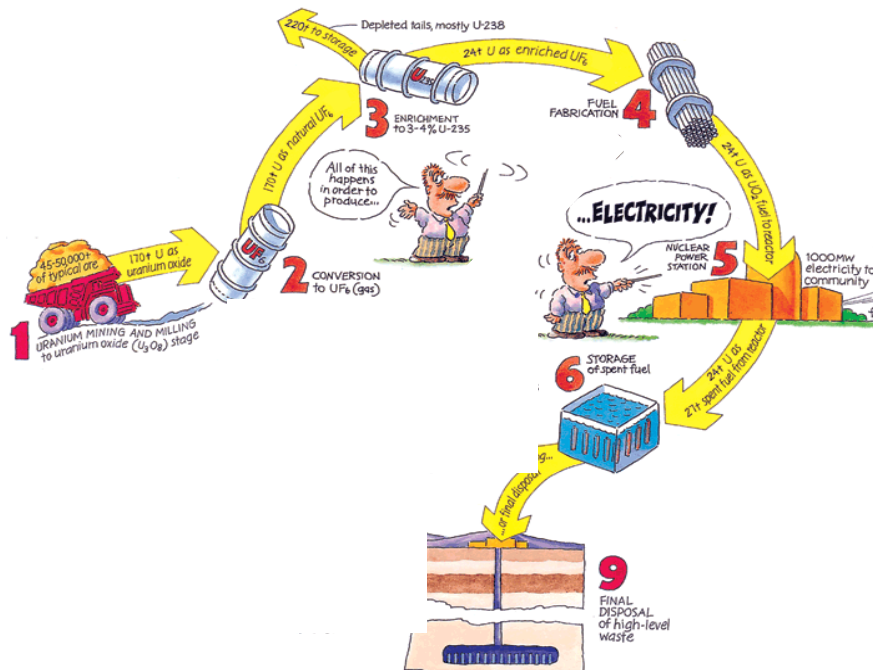
Combustible irradiado

CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

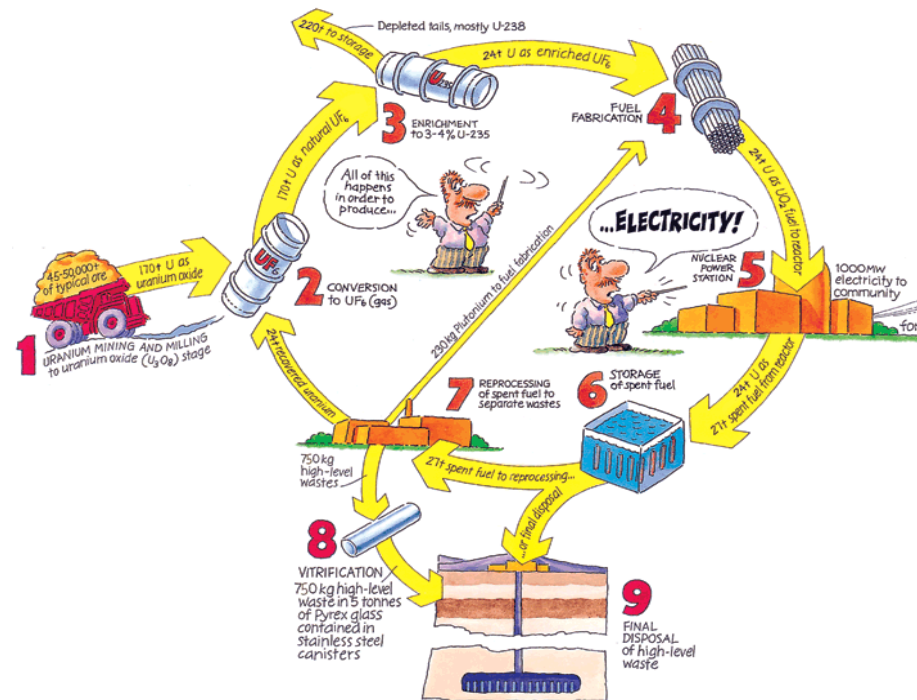
Ciclo abierto y cerrado

- **Ciclo cerrado:** Tras la irradiación en el reactor, los elementos combustibles son reprocesados para recuperar el U-235 y Pu-239, y separarlos de los residuos de alta actividad.
- **Ciclo abierto:** El combustible usado no se reprocesa, sino que es tratado como residuo de alta actividad y llevado al almacenamiento definitivo.

OPEN CYCLE



CLOSED CYCLE



CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

Almacenamiento del combustible usado

La producción de combustible gastado tras años de operación de los reactores está provocando problemas de almacenamiento temporal y definitivo.

Tras una primera etapa de almacenamiento en las piscinas (para la refrigeración), el almacenamiento en seco (en cada reactor, ATI, o centralizado, ATC) y el transporte provocan desafíos técnicos y logísticos para la operación de las plantas.

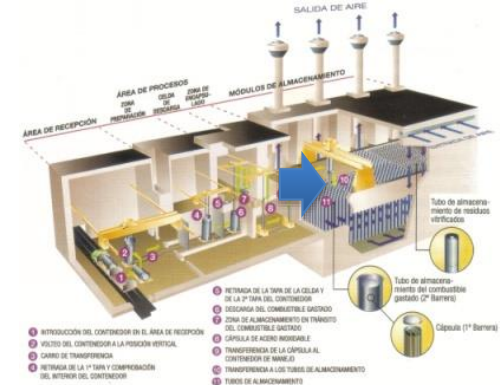
WET STORAGE AT REACTORS



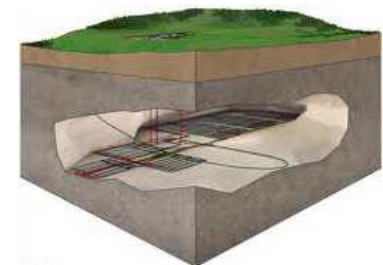
TRANSPORTATION



CENTRALIZED STORAGE



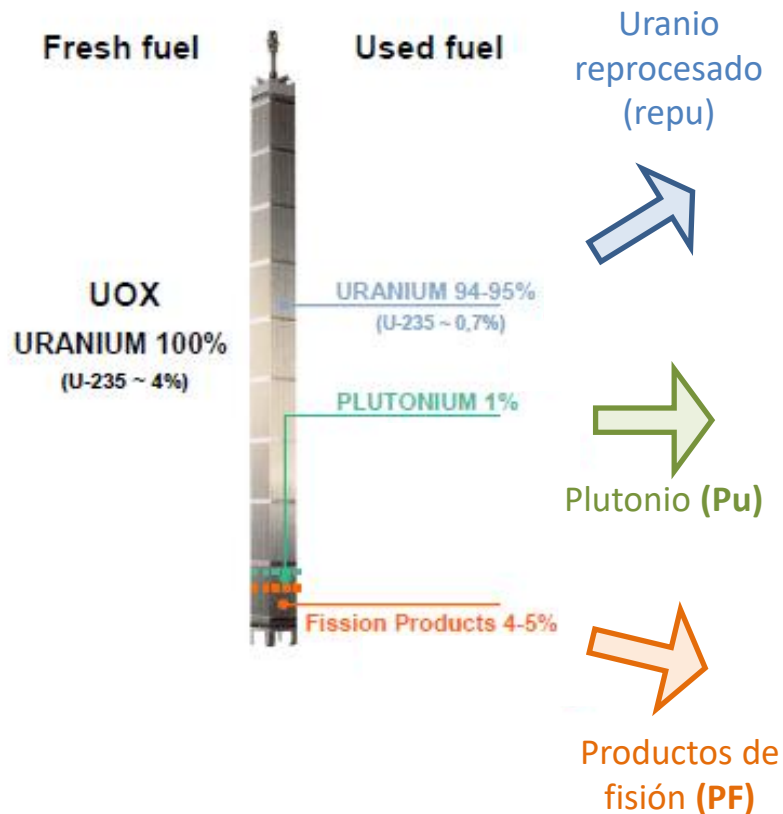
DEEP GEOLOGIC DISPOSAL



DRY STORAGE AT REACTORS

CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

Reprocesado



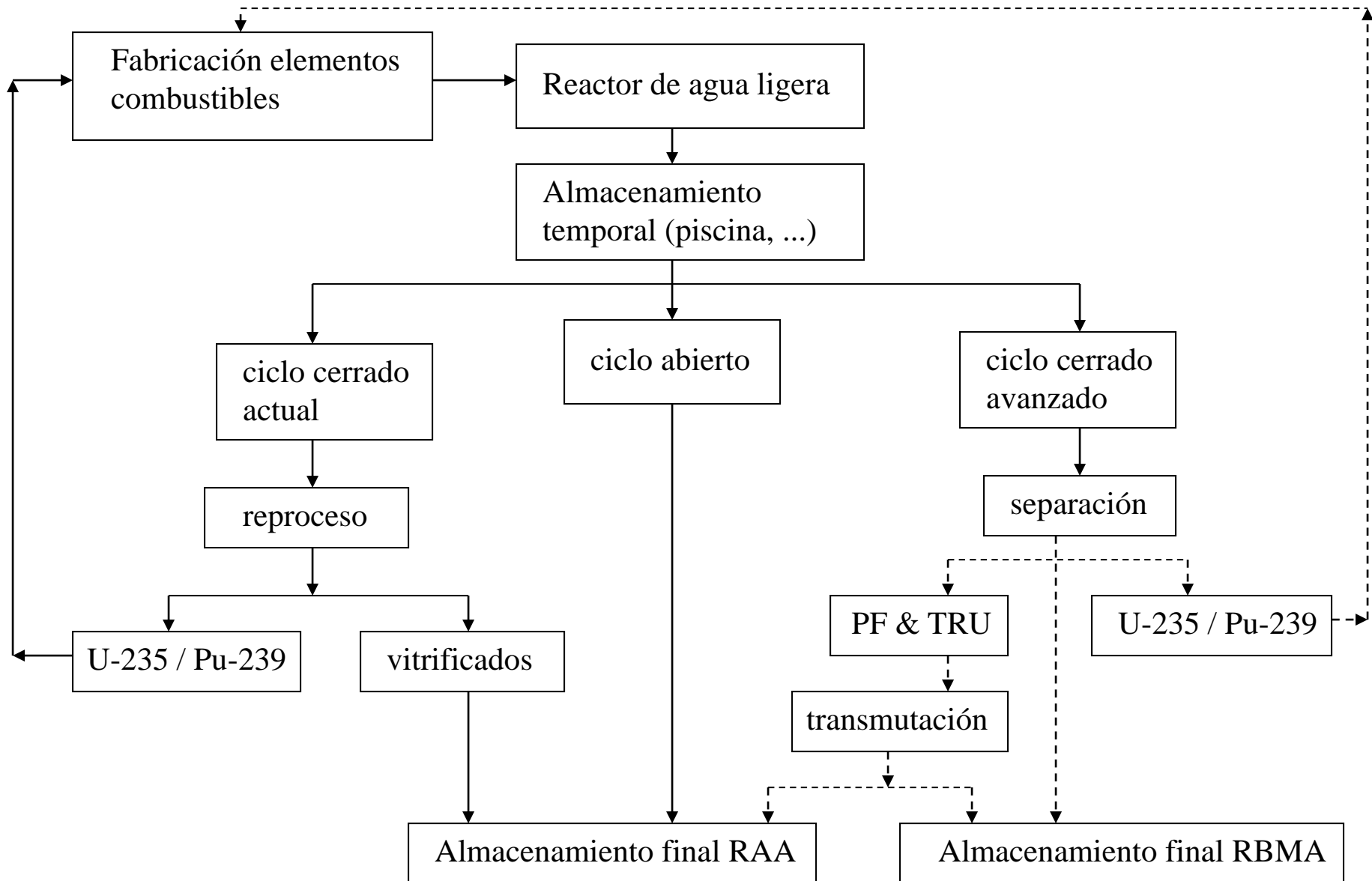
- Todavía queda 0,5-1% U_{235}
- Se han formado algunos isótopos (U-236 and U-234) que complican la conversión y enriquecimiento
- Se puede emplear para fabricar nuevos elementos combustibles 100% de uranio (UOX) o de óxidos mixtos (MOX)

- Se puede incluir en los MOX o considerarse residuo
- El empleo de MOX en el reactor implica modificaciones importantes
- Los inventarios se han de controlar para evitar el empleo del Pu en armas nucleares (proliferación)

- Actualmente, los PF se concentran y vitrifican en cápsulas, fáciles de manejar y listas para una gestión posterior



CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR



RESIDUOS RADIATIVOS

Definición

□ **Residuo Radiactivo:** Cualquier material o producto de desecho para el que no está previsto ningún uso y que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria y Energía.

- **Caracterización:**
- Estado físico (sólido, líquido o gaseoso)
 - Tipo de emisor (alfa, beta, gamma)
 - Período (vida corta < 30 años; vida larga)
 - Actividad específica (alta o baja)
 - Radiotoxicidad (peligrosidad biológica)
 - ➔ Grupo A (alta): Ra226, Pu239; Am241
 - ➔ Grupo B (media-alta): Sr90, I131
 - ➔ Grupo C (media-baja): P32, Au198; Mo99
 - ➔ Grupo D (baja): H3, Cr51, Tc99; Uranio natural

RESIDUOS RADIATIVOS

Tipos

□ Residuos de baja y media actividad

- BAJA actividad específica por elemento radiactivo
- NO generan calor
- Radionucleidos emisores β - γ de $T_{1/2} < 30$ años
- Contenido en emisores $\alpha < 0.37$ GBq/t
- Ejs.: Cs137, Sr90, Co60

□ Residuos de alta actividad:

- Contenido en emisores α de vida larga > 0.37 GBq/t
- Pueden generar calor
- Período de semidesintegración, $T_{1/2} > 30$ años
- Ejs.: Am241, Pu239

RESIDUOS RADIATIVOS

Origen

□ Producción de energía núcleo-eléctrica

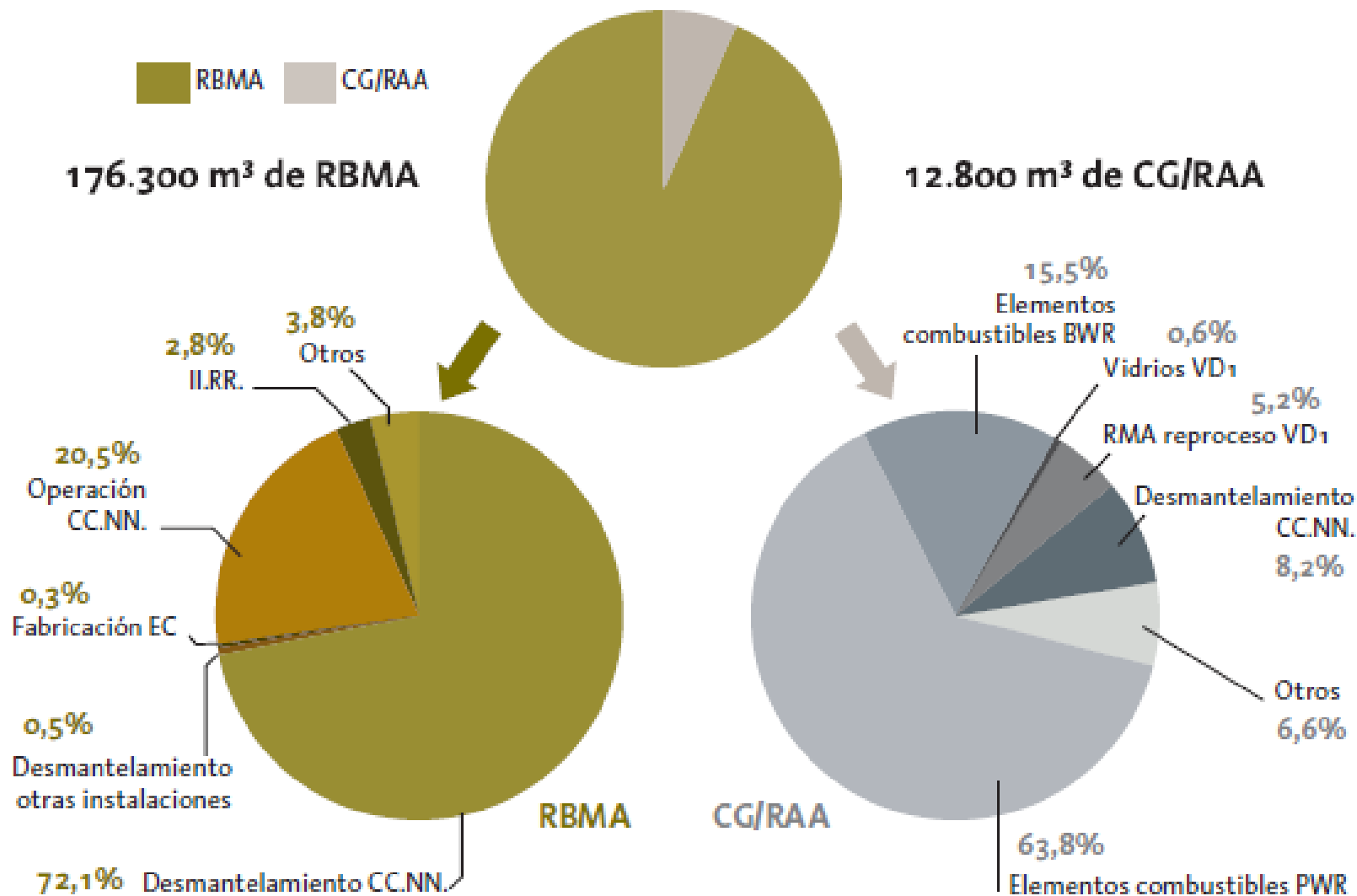
- Primera fase del ciclo de combustible (MB)
 - ➔ Estériles de minería de uranio
 - ➔ Fabricación de concentrados
 - ➔ Conversión a hexafluoruro y enriquecimiento de uranio
 - ➔ Fabricación de elementos combustibles
- Funcionamiento de CC.NN. (MB)
- Segunda fase del ciclo de combustible (A)
 - ➔ Ciclo abierto Almacenamiento temporal indefinido en húmedo o en seco y posterior almacenamiento definitivo en una formación geológica profunda
 - ➔ Ciclo cerrado
 - ➔ Ciclo cerrado avanzado

□ Aplicación de radioisótopos en medicina, industria e investigación

□ Clausura de instalaciones nucleares y radiactivas

RESIDUOS RADIATIVOS Producción en España

Figura B.3. Cantidades de residuos radiactivos a gestionar en España



RESIDUOS RADIATIVOS

Gestión

□ **Objetivo:** Inmovilizar y aislar los residuos radiactivos durante el período de tiempo necesario, mediante la interposición entre ellos y el ser humano de una serie de barreras artificiales y naturales que impidan la llegada de los radionucleidos al medio ambiente, hasta que hayan perdido su actividad.

□ Sistema de barreras múltiples (4)

➔ Barrera química

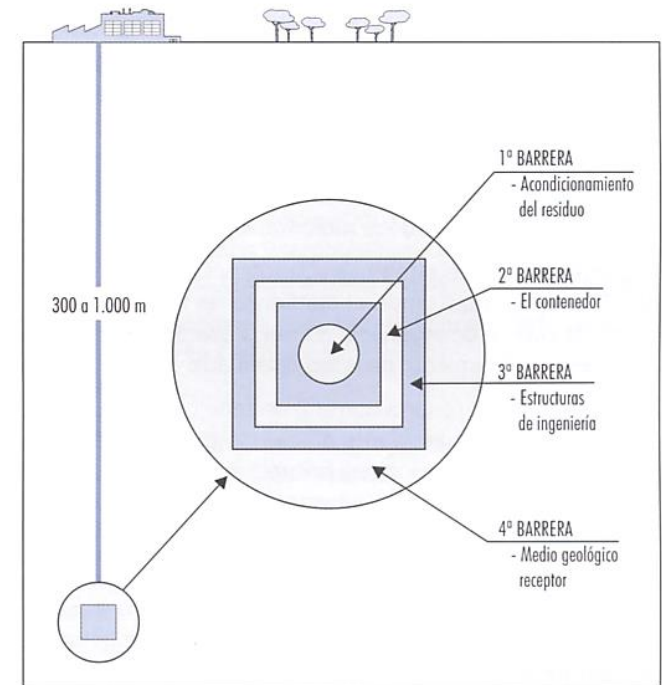
- Cemento, asfalto, polímero (MB)
- Vitrificación (A)

➔ Barrera física:

- Bidones metálicos normalizados (MB)
- Recipientes metálicos especiales con metales altamente resistentes a la corrosión (A)

➔ **Barrera de ingeniería:** Estructuras, blindajes y otros sistemas

➔ **Barrera geológica:** Altamente estable e impermeable



[Baró, 2000]

RESIDUOS RADIOACTIVOS

Gestión

Baja y Media actividad

Almacenamiento en tierra firme una vez acondicionados.
Existen dos opciones:

➔ **En superficie** (El Cabril, L'Aube)

➔ **Subterráneo a baja/media profundidad** (SFR, Konrad y Asse)



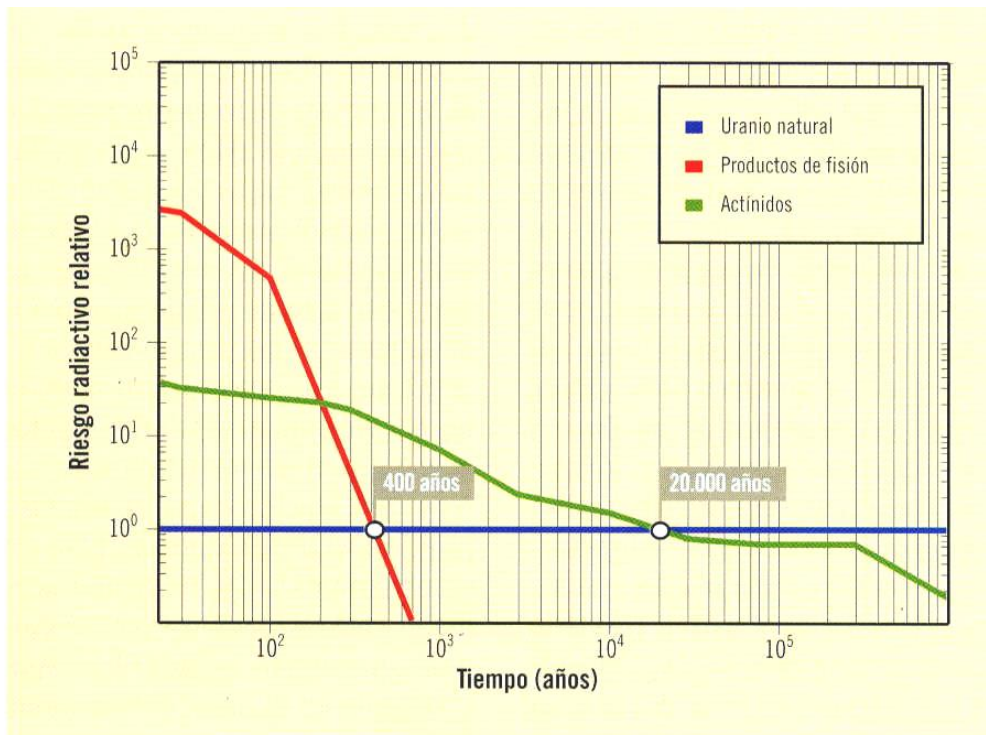
RESIDUOS RADIACTIVOS

Gestión

Alta actividad

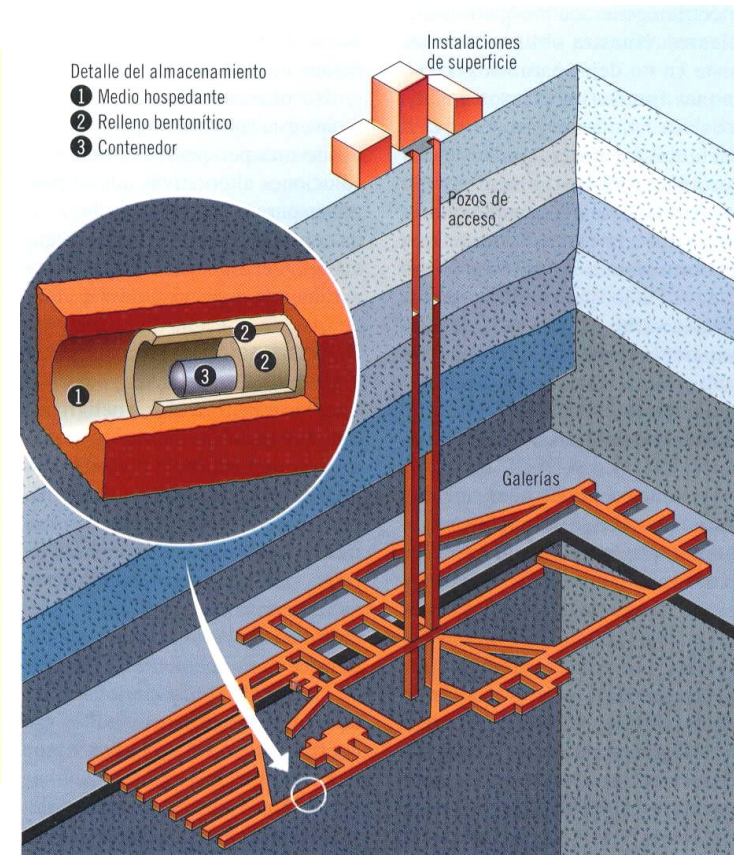
De los métodos considerados, los establecidos en amplio consenso internacional son:

→ Almacenamiento Geológico Profundo (AGP)



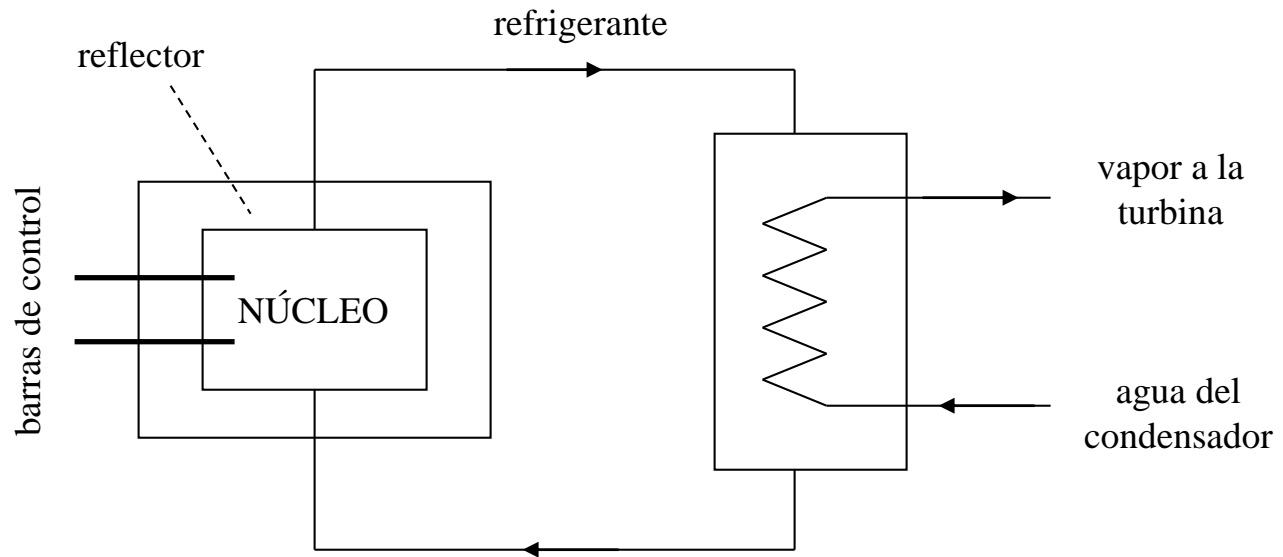
→ Transmutación (en investigación)

[OECD, 1996]



[<http://www.terraia.com/revista15/pagina35.htm>]

Componentes y sistemas de un reactor nuclear



Componentes y sistemas de un reactor nuclear

- Núcleo
 - contiene el combustible, constituido por un nucleido físil y normalmente alguno fértil
- Moderador
 - frena los neutrones rápidos mediante reacciones de dispersión. Así las reacciones de fisión se realizarán mediante neutrones térmicos (reactores térmicos)
 - debe tener una sección eficaz de captura baja, y de dispersión alta. Bajo número másico (agua ligera, pesada, y grafito)
 - si no hay moderador se habla de reactor rápido
- Reflector
 - impide el escape de los neutrones del núcleo
 - si hay moderador, éste puede actuar también de reflector
- Blindaje
 - evita la salida de las radiaciones. Hormigón, agua y plomo

Componentes y sistemas de un reactor nuclear

- Refrigerante
 - extrae el calor del núcleo para suministrarlo a un ciclo de potencia
 - buenas propiedades termohidráulicas: elevado calor específico, conductividad térmica y densidad; baja viscosidad; alta temperatura de ebullición y baja de fusión
 - sección eficaz de captura
 - reactores térmicos: debe ser baja. Si es alta se requiere emplear combustible enriquecido.
 - reactores rápidos: indiferente, por ser bastante baja siempre para neutrones rápidos
 - gases: CO₂, He
 - líquidos: agua ligera (combustible enriquecido debido a elevada sección eficaz de captura), agua pesada, metales líquidos (sodio)
- Barras de control
 - actúan para regular la potencia
 - capturan neutrones, disminuyendo el número de reacciones y con ello el calor liberado en el núcleo

Componentes y sistemas de un reactor nuclear

COMPONENTE	FUNCIÓN	MATERIALES
Combustible	Producir energía mediante fisión	U-233, U-235, Pu-239, Pu-241
Refrigerante	Eliminar el calor del núcleo del reactor	H ₂ O, D ₂ O, orgánicos, CO ₂ , aire, He, Na, Bi, NaK
Moderador	Frenar los neutrones hasta que tengan una energía cinética del mismo orden que la energía térmica del medio	H ₂ O, D ₂ O, grafito, Be, BeO
Reflector	Reducir las pérdidas neutrónicas	Moderadores
Blindaje	Proteger al personal de las radiaciones ionizantes	Hormigón, acero, plomo, agua, polietileno
Sistemas de control	Asegurar la criticidad y el nivel de potencia del reactor	Cd, B, Hf, Ga, Ag-In
Sistemas de seguridad	Asegurar la seguridad del reactor en cualquier circunstancia.	Redundancia
	Impedir el escape de radiactividad al medio	Independencia
Elementos estructurales	Proporcionar el confinamiento al combustible y el soporte físico al núcleo del reactor	Diversidad
		Aluminio, acero inoxidable, circonio

Tipos de reactores nucleares

- Según el **espectro neutrónico**:
 - **Térmicos**: las reacciones de fisión se deben a neutrones de baja energía (~ 0.01 eV)
 - **Rápidos**: las reacciones de fisión ocurren con neutrones de alta energía (~ 1 MeV)
- Según su configuración:
 - **Heterogéneos**: El combustible, sólido, está segregado del refrigerante y/o del moderador, líquido o gas.
 - **Homogéneos**: Combustible y moderador se mezclan en la misma fase
- Según su razón de conversión (relación producción/consumo):
 - **Quemadores**: $RC < 0.7$
 - **Convertidores**: $1. < RC < 1.$
 - **Reproductores**: $RC > 1.$

Los reactores comerciales actuales son: TÉRMICOS, HETEROGÉNEOS y QUEMADORES
Entre las tendencias futuras existen también rápidos, homogéneos y reproductores

Tipos de reactores nucleares

Tipo	Refrigerante	Moderador	Combustible	Observaciones
MAGNOX	CO ₂	Grafito	uranio natural	indirecto
AGR	CO ₂	Grafito	uranio enriquecido	indirecto
HTGR	He	Grafito	uranio altamente enriquecido ó Th-232 / U-233	indirecto
PWR	agua ligera	agua ligera	uranio enriquecido	indirecto, vasija a presión
CANDU	agua pesada	agua pesada	uranio natural	indirecto, tubos a presión
PFR	Sodio	---		rápido
LMFBR	Sodio	---	U-238 / Pu-239	rápido reproductor
BWR	agua ligera	agua ligera	uranio enriquecido	directo, vasija a presión
SGHWR	agua ligera (interior de tubos)	agua pesada	uranio enriquecido, pastillas anulares	directo, tubos a presión (calderín)
RBMK	agua ligera (interior de tubos)	grafito	uranio enriquecido, pastillas anulares	directo, tubos a presión

Tipos de reactores nucleares

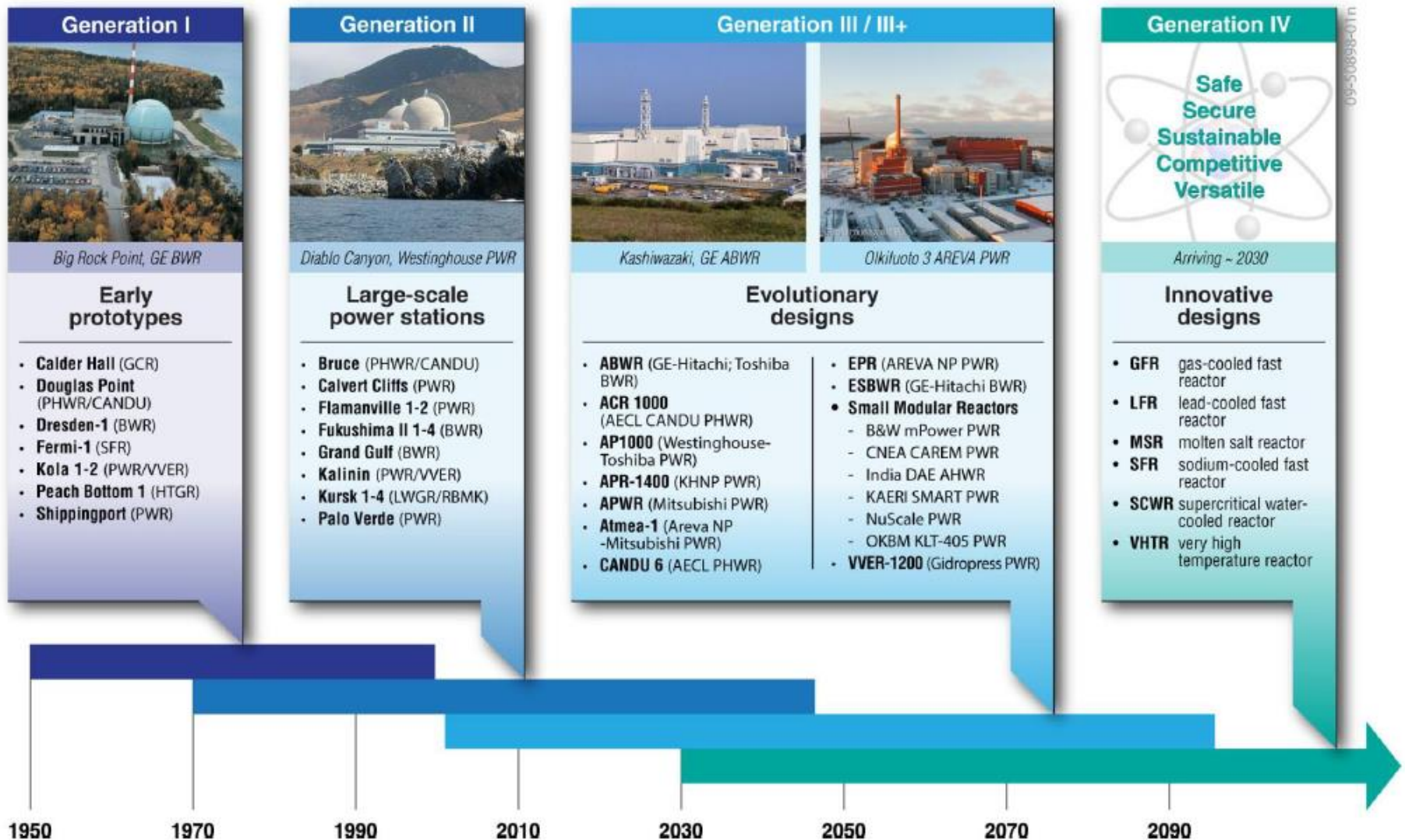
TYPE	REACTOR	Thermal Power (MW)	Core Diameter (m)	Core Height (m)	Core Volume (m ³)	Average Volumetric Power Density (MW/m ³)	Average Fuel Rating (MW/tonne)	Average Linear Fuel Rating (kW/m)
MAGNOX	Calder Hall	225	9.45	6.4	449	0.5	-	-
	Bradwell	538	12.2	7.8	913	0.6	2.2	26.2
	Wylfa	1875	17.4	9.1	2166	0.9	3.15	33.0
AGR	Hinkley B	1500	9.1	8.3	540	2.8	11.0	16.9
	Hartlepool	1507	9.3	8.2	557	2.0	11.5	16.1
HWR	CANDU	3425	7.75	5.9	280	12.2	26.4	27.9
LWR	PWR	3800	3.6	3.8	40	95	38.8	17.5
	BWR	3800	5.0	3.8	75	51	24.6	19.0
RBMK	Chernobyl	3140	11.8	7.0	765	4.1	15.4	14.3
W-SGHWR		308.2	3.1	3.7	28	11	14.3	15.8
Fast Reactor	Phenix	563	1.4	0.85	1.4	406	149	27.0
	PFR	612	1.5	0.9	1.6	380	153	27.0

Tipos de reactores nucleares Generaciones

Generación I	1945-1965	Prototipos y primeros diseños	Shippingport, Dresden, Fermi I, Magnox
Generación II	1965-1995	Reactores comerciales actuales	PWR, BWR CANDU VVER, RBMK
Generación III	1995-2010	Reactores avanzados (evolutivos y pasivos)	ABWR, SBWR AP600 System 80+ SWR-1000, EPR
Generación III +	2010-2030	Reactores avanzados optimizados (economía)	
Generación IV	> 2030	Reactores: <ul style="list-style-type: none"> - Competitivos - Seguros - Ecológicos - No proliferantes 	

Tipos de reactores nucleares

Generaciones



Tipos de reactores nucleares

Reactores de agua ligera actuales

Ciclo indirecto

- Plantas de agua a presión (PWR)

- Emplean agua ligera como moderador y refrigerante. El agua se mantiene a presión elevada (150 bar) en el reactor, para que sea líquida

- Reactor a presión

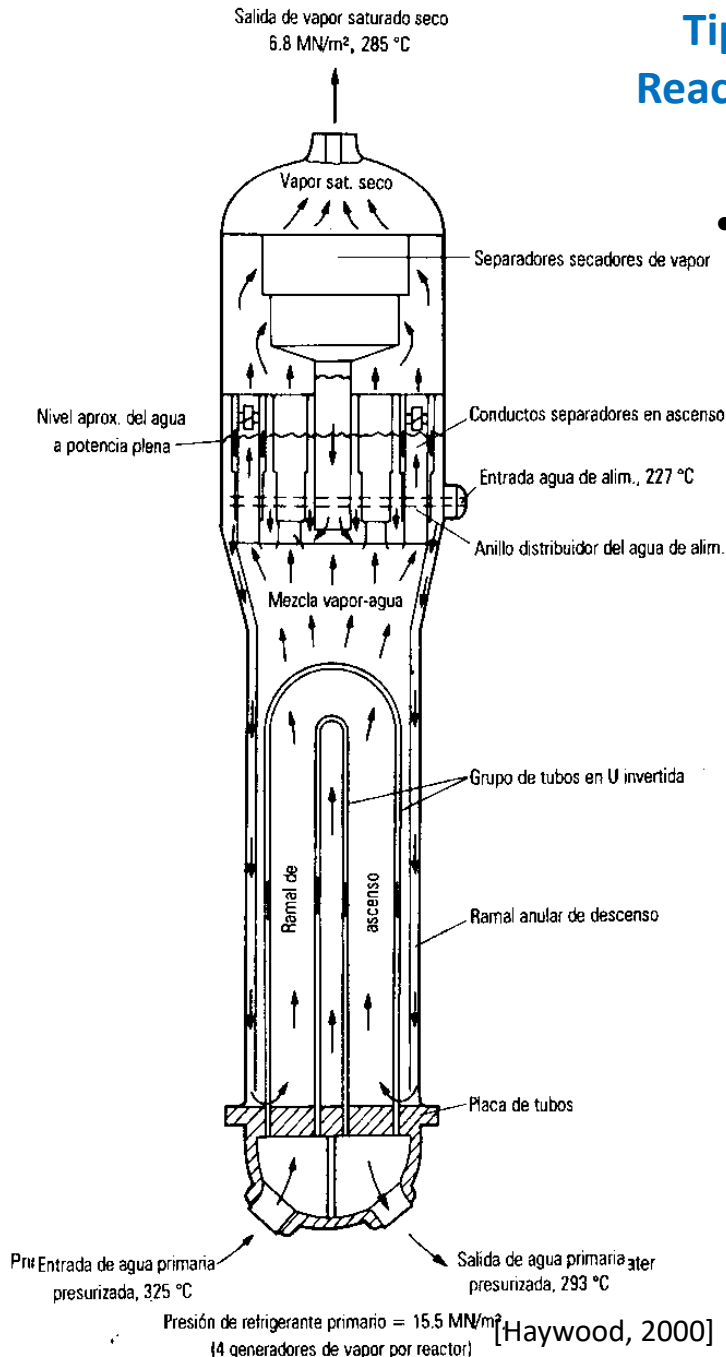
- El agua calentada en el reactor cede calor al ciclo de vapor (circuito secundario) en el generador de vapor (caldera de recuperación)

- Un recipiente cerrado (presionador) controla la presión

- El control de potencia se realiza mediante barras de control que se introducen desde la parte superior y mediante boro disuelto

- Se produce vapor saturado a 70 bar (45 en los primeros diseños). Es preciso realizar recalentamientos con vapor vivo

- La temperatura del agua de alimentación es similar a una planta fósil

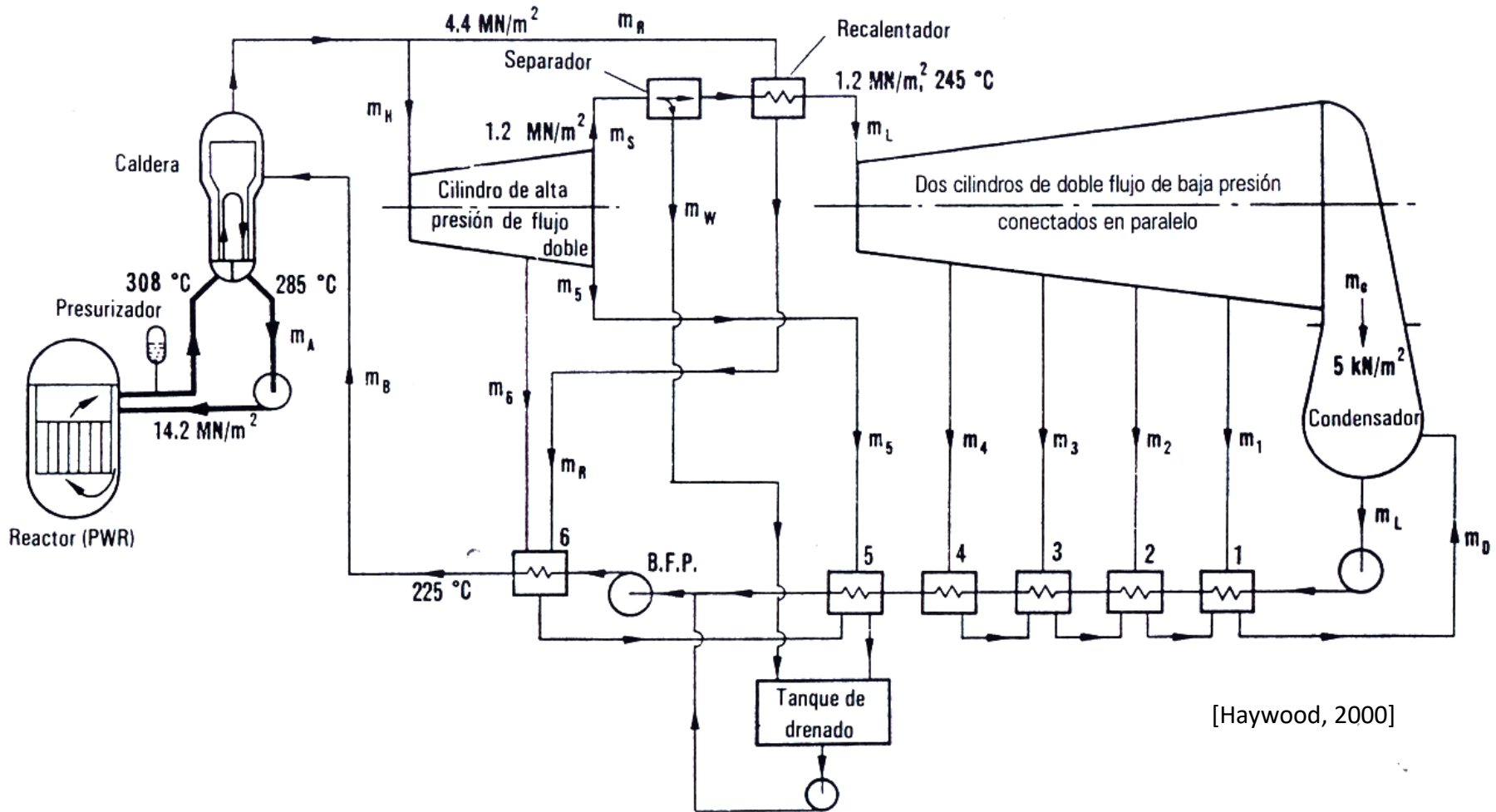


[Haywood, 2000]

Tipos de reactores nucleares

Reactores de agua ligera actuales

Ciclo indirecto

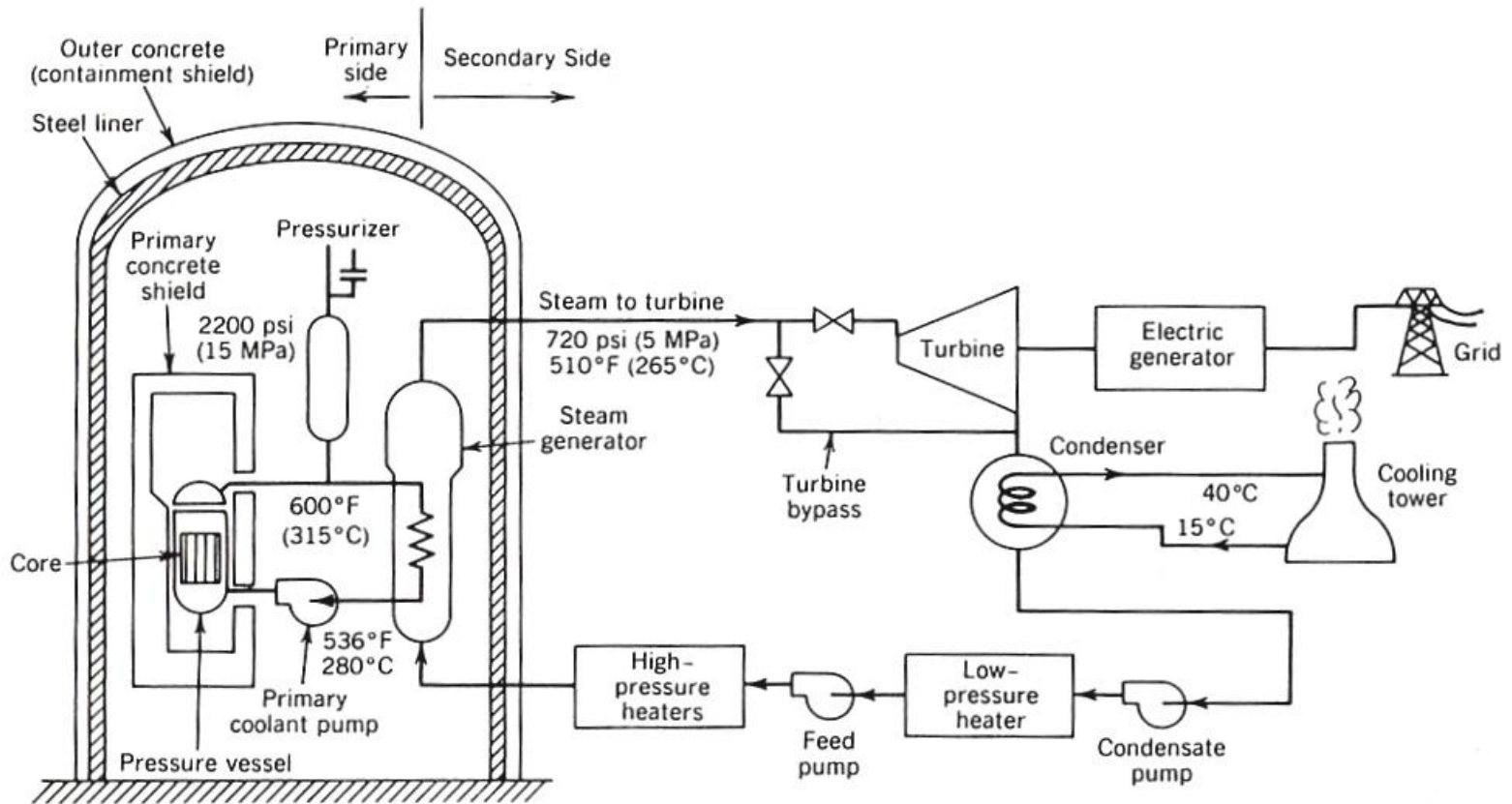


Planta PWR en Haddam Neck, EE.UU. La presión de vapor a la salida del generador de vapor es baja, por tratarse de uno de los primeros diseños. En la actualidad es del orden de 70 bar

Tipos de reactores nucleares

Reactores de agua ligera actuales

Ciclo indirecto



[Murray, 2000]

Tipos de reactores nucleares

Reactores de agua ligera actuales

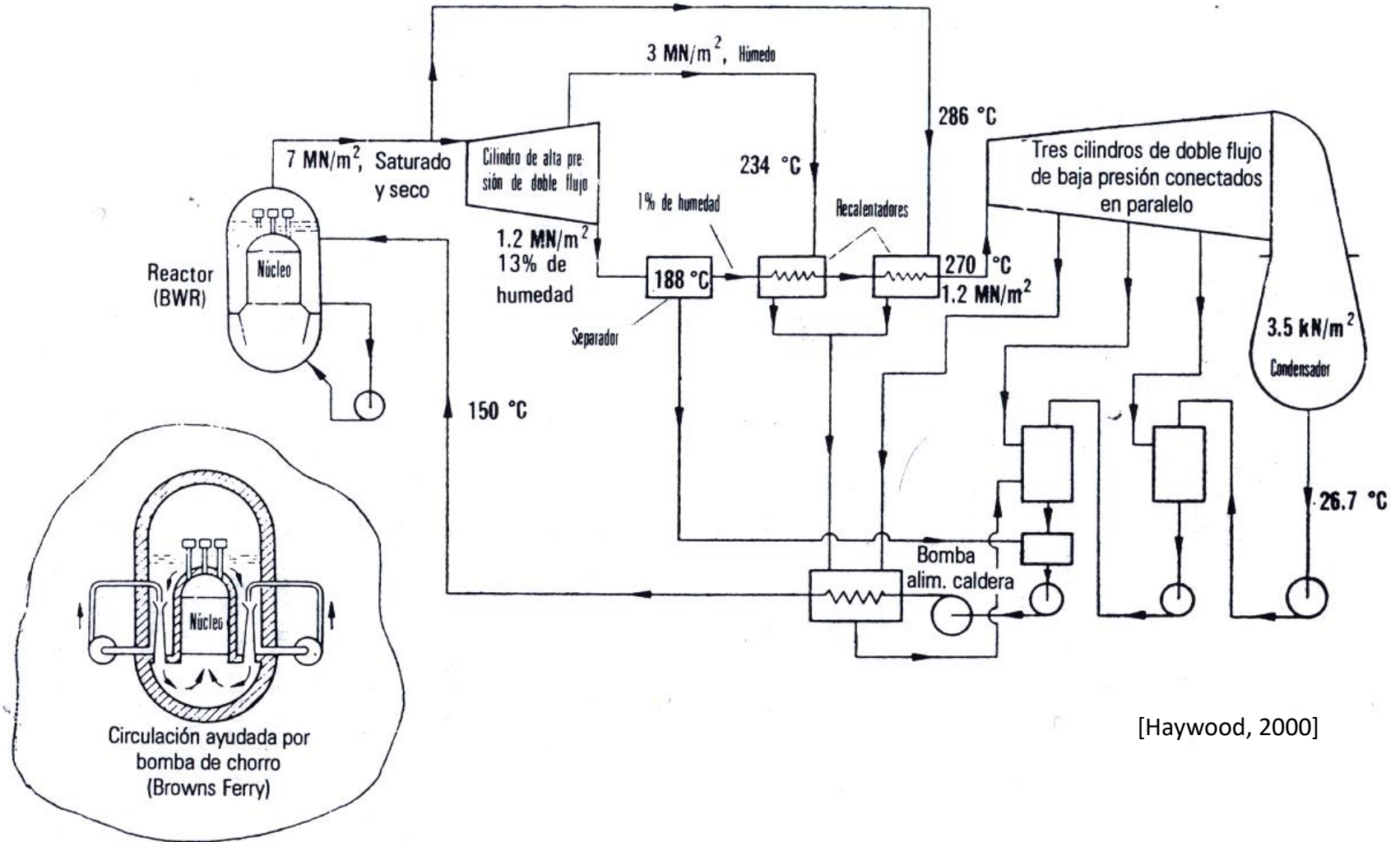
Ciclo directo

- Emplean agua como refrigerante, entrando en ebullición en el reactor (carecen de circuito secundario): BWR
- Se desarrollaron más tarde que las PWR
- Además de las barras de control y los venenos neutrónicos se pueden regular con el caudal de las bombas de recirculación: a mayor velocidad de la bomba (mayor caudal) hay más líquido en el reactor, se produce mayor moderación y la potencia crece. Cuando el caudal se reduce aparece más vapor en el reactor, se dificulta la moderación y la potencia se reduce.
- El agua de alimentación llega al reactor a una temperatura baja (150 °C) para garantizar que las bombas de recirculación trabajan con líquido
- La separación del vapor de la fase líquida se hace en el reactor: hay unos filtros separadores en la parte superior de la vasija, lo que obliga a situar las barras de control en la parte inferior, de modo que su inserción supone elevarlas. En el caso de las PWR su inserción suponía bajarlas (seguridad por gravedad)
- Al igual que en las PWR el vapor es saturado, lo que obliga a recalentar con vapor vivo

Tipos de reactores nucleares

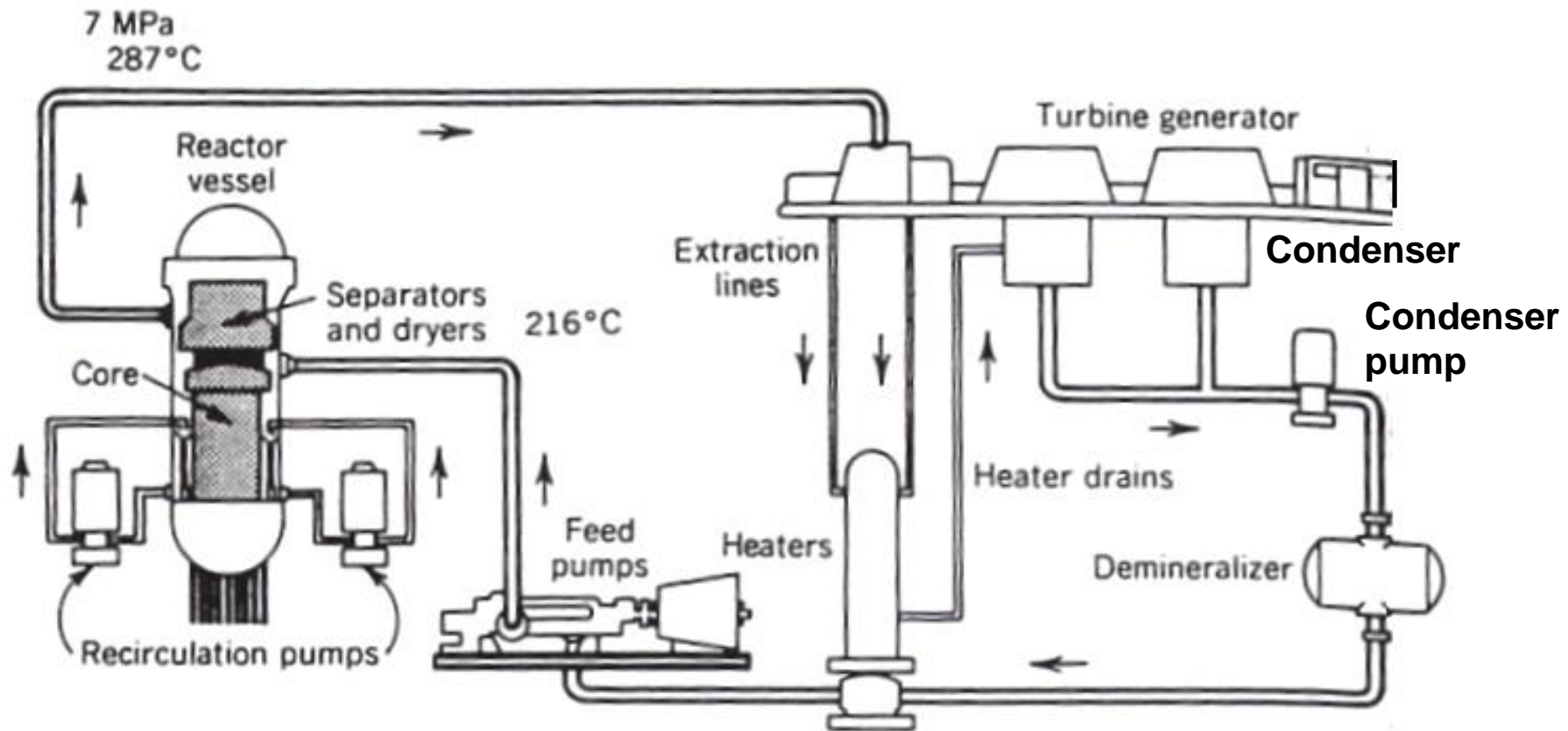
Reactores de agua ligera actuales

Ciclo directo



[Haywood, 2000]

Tipos de reactores nucleares
Reactores de agua ligera actuales
Ciclo directo



[Murray, 2000]

Tipos de reactores nucleares

Reactores de agua ligera actuales

Comparativa

	PWR	BWR
Potencia térmica	3425 MWt	3579 MWt
Potencia eléctrica	1100 MWe	1233 MWe
Rendimiento	33 %	33,5 %
Altura del núcleo	3,7 m	3,76 m
Diámetro del núcleo	3,4 m	4,65 m
Espesor de la vasija	21,9 cm	16,4 cm
Diámetro de la vasija	4,4 m	6 m
Altura de la vasija	12,6 m	21,6 m
Presión vasija	155 bar	70 bar
Carga de combustible	101 t UO ₂	138 t UO ₂
Enriquecimiento (U-235)	2,1 - 2,6 - 3,1 %	2,8 %
Recargas	1/3 núcleo cada 12 meses	1/3 núcleo cada 18 meses o 1/4 cada 12 meses
Tiempo de parada por recarga	30 días	60 días
Descarga de combustible gastado anual	30,4 t	32 t
Quemado de diseño	33000 MWd/t	28400 MWd/t
Barras de control	Ag-In-Cd	B ₄ C
Otros elementos de control	Venenos neutrónicos quemables	Venenos neutrónicos quemables

Tipos de reactores nucleares

Reactores de agua ligera actuales

Comparativa

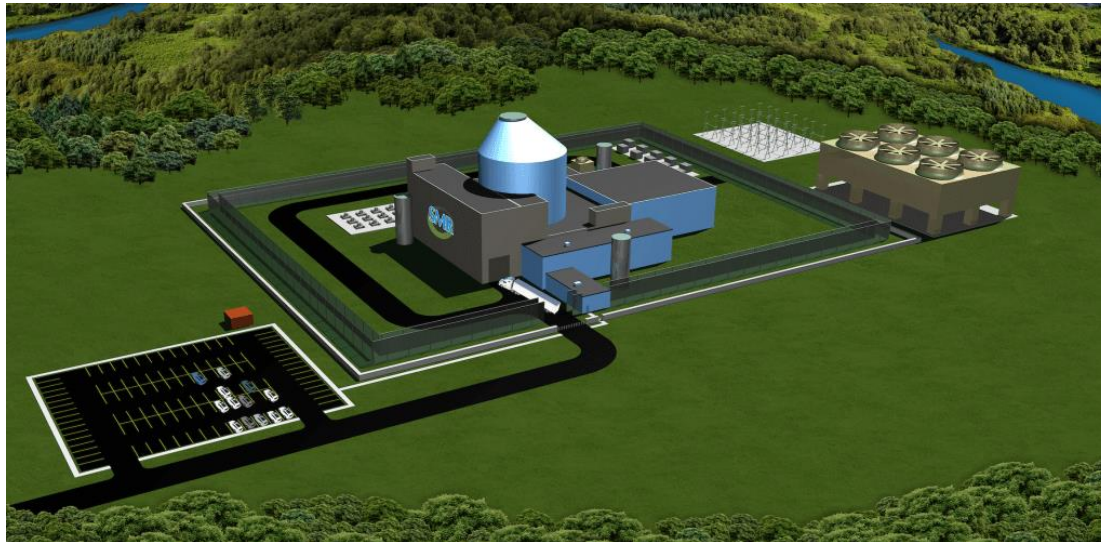
	PWR	BWR
Refrigerante	agua ligera (líquida)	agua ligera (vapor húmedo)
Gasto de refrigerante	15,9 Mg/s	13,2 Mg/s
Temperatura de entrada al núcleo	298°C	277°C
Temperatura de salida del núcleo	326°C	288°C
Temperatura de agua de alimentación	227°C	216°C

Tipos de reactores nucleares

Small Modular Reactors

Los **Small Modular Reactors** (SMRs) están empezando a considerarse como una alternativa real para el futuro de la energía nuclear en países como USA, Canadá, Reino Unido o Sudáfrica. Sus principales características son:

- Poca ocupación en planta y potencia reducida (<300 MWe). Esto les permite una mayor integración en las redes eléctricas
- Diseño y construcción modular, reduciendo el tiempo para la puesta en marcha y con ello los costes financieros
- Diseños muy diferentes, incluyendo PWR y BWR, pero también reactores rápidos y otras tecnologías
- Estrategias de ciclo de combustible para reducir la producción de residuos



SMR160, Small Modular Reactor from Holtec [Source: www.holtecinternational.com]

Tipos de reactores nucleares

Reactores de agua ligera actuales

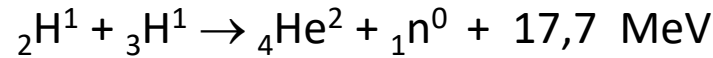
Centrales españolas

Nombre	Emplazamiento	Tipo	Potencia (MWe)	Refrigeración	1ª conexión
José Cabrera	Guadalajara	PWR	160	torres f. (Tajo)	1968
Sta. M. Garoña	Burgos	BWR	466	c. abierto (Ebro)	1971
Almaraz I	Cáceres	PWR	974	c. abierto (embalse)	1981
Almaraz II	Cáceres	PWR	983	c. abierto (embalse)	1983
Ascó I	Tarragona	PWR	979	torres n y f (Ebro)	1983
Ascó II	Tarragona	PWR	1015	torres n y f (Ebro)	1985
Cofrentes	Valencia	BWR	1025	torres n (Júcar)	1984
Vandellós I	Tarragona	grafito-gas	---	----	1987*
Vandellós II	Tarragona	PWR	1082	c. abierto (Mediterráneo)	1987
Trillo	Guadalajara	PWR	1066	torres n(Tajo)	1988

(*) Ocurrió un incendio en 1989. Se consiguió alcanzar la situación de parada segura y no hubo daños personales en la central ni contaminación al exterior. Pese a ello la central se dejó fuera de servicio.

Nociones sobre fusión

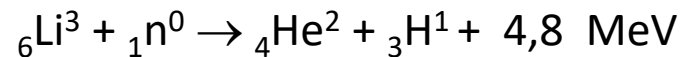
Reacción de fusión:



3,5 MeV

14,1 MeV

- El deuterio (H-2) se obtiene del agua de mar y no es radiactivo
- El tritio (H-3) es muy radiactivo y se debe producir en el reactor, para lo que se rodea de una “envoltura” que lleva el calor al ciclo de potencia y sobre la que se aporta litio, para que con los neutrones de la reacción se produzca tritio:



- Se requiere alta temperatura para que los núcleos (ambos con carga positiva) se acerquen y se fusionen. Eso obliga a “confinar” el plasma para que no toque las paredes
- Más detalles en el Material Complementario de Moodle

Referencias

- Glasstone, Sesonske, INGENIERÍA DE REACTORES NUCLEARES, Ed. Reverté (1975)
- Baró y Otros, ORIGEN Y GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS, Ed. Ilustre Colegio Oficial de Físicos (2000)
- Haywood, CICLOS TERMODINÁMICOS DE POTENCIA Y REFRIGERACIÓN, Limusa, 2000
- Murray, NUCLEAR ENERGY, Butterworth & Heinemann, 2000
- Foro de la Industrial Nuclear Española, 222 CUESTIONES SOBRE LA ENERGÍA, 2001
- OECD, Radioactive waste management in perspective, Paris, 1996