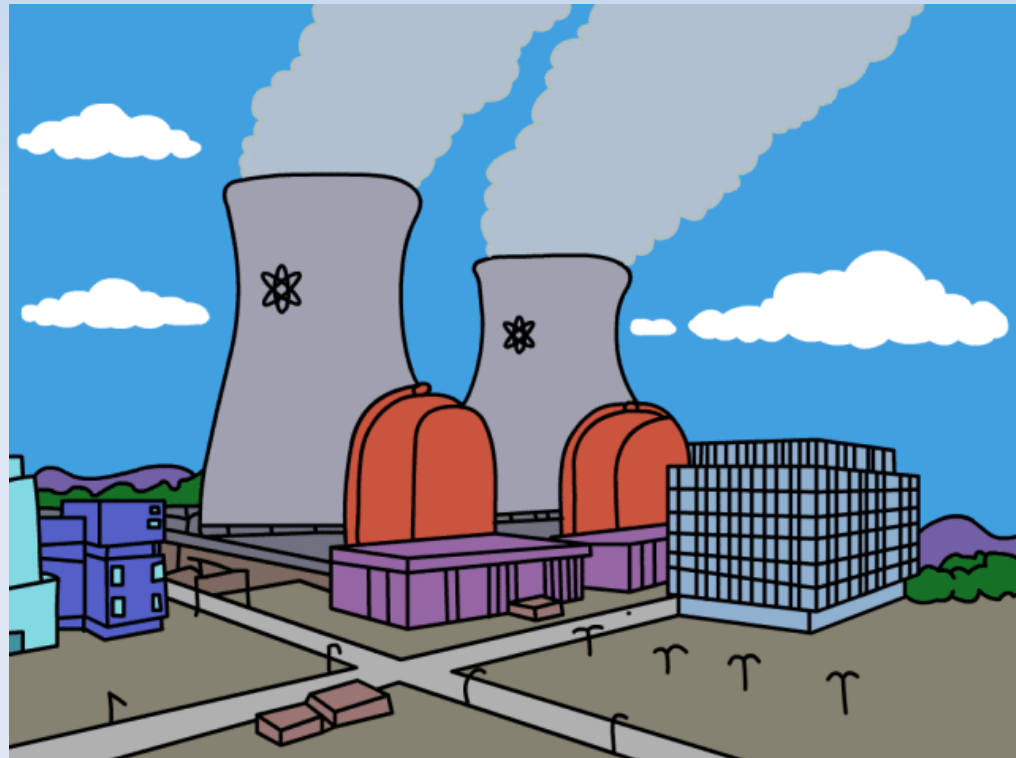


Centrales nucleares

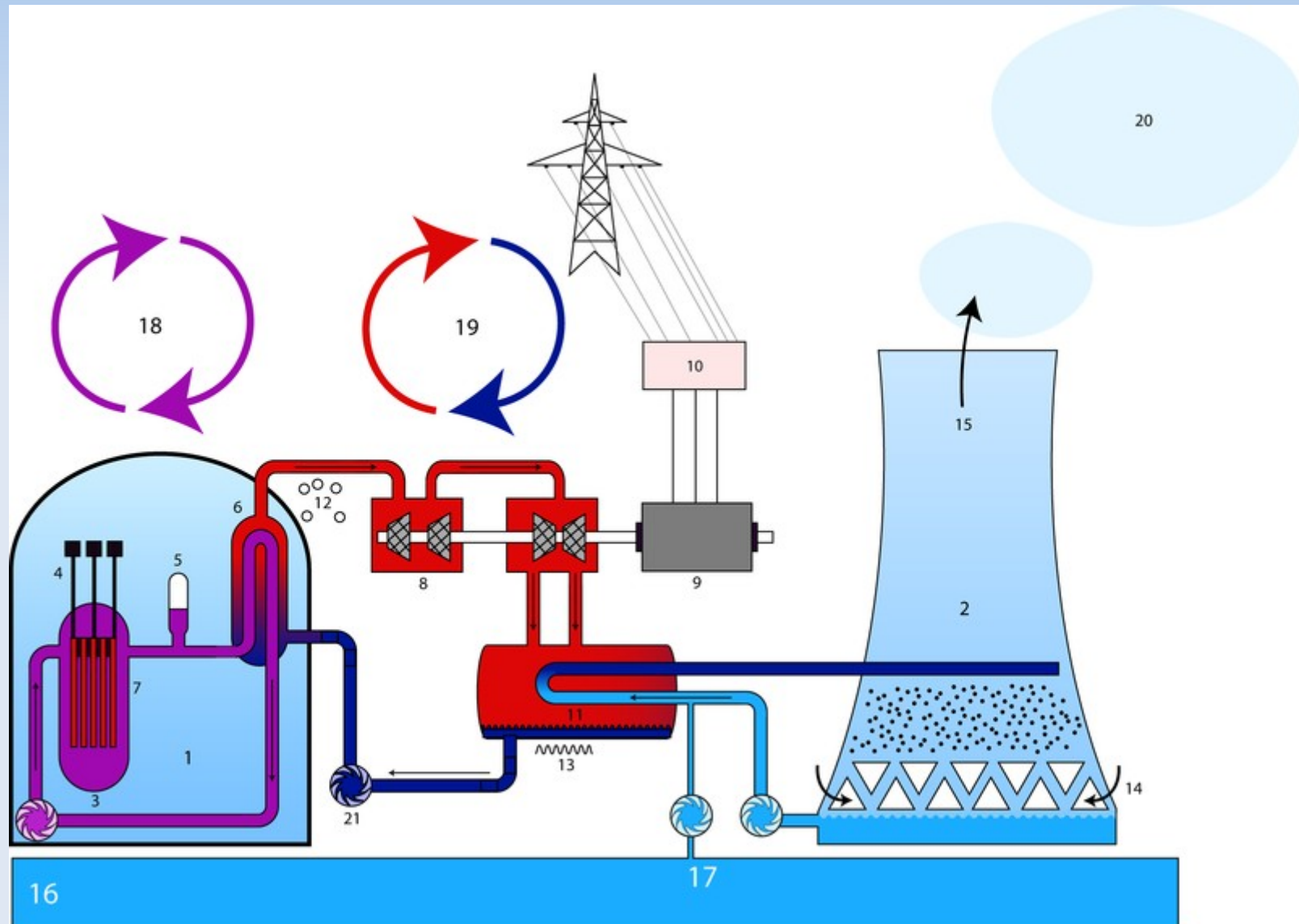


Juan José Gómez Navarro
Departamento de Física

Índice

1. Partes de una central nuclear
2. Reactores nucleares
3. Medidas de seguridad
4. Centrales nucleares en el mundo

1. Partes de una central nuclear



1. Partes de una central nuclear

- ✓ El **reactor nuclear** calienta el refrigerante en el **circuito primario**
- ✓ El refrigerante se utiliza para hacer hervir agua en el **circuito secundario**
- ✓ El vapor se utiliza para mover una **turbina**, y ésta un **alternador**
- ✓ El agua se condensa en otro intercambiador de calor y vuelve a empezar
- ✓ Las **torres de refrigeración** emiten vapor para enfriar el circuito secundario

1. Partes de una central nuclear

- ✓ Algunas obviedades de este diseño general:
 - no emite gases contaminantes (sólo vapor de agua) ya que no hay combustión
 - el refrigerante en el circuito primario está siempre en un circuito cerrado
 - se construyen cerca del agua para asegurar la refrigeración (no para evacuar residuos)
 - el reactor es la única diferencia importante con respecto a otras centrales térmicas

1. Partes de una central nuclear

- ✓ El refrigerante del circuito primario está en contacto directo con el combustible radiactivo
- ✓ La vasija del reactor y este circuito están dentro de la **contención**
- ✓ El agua circula mediante una bomba de impulsión

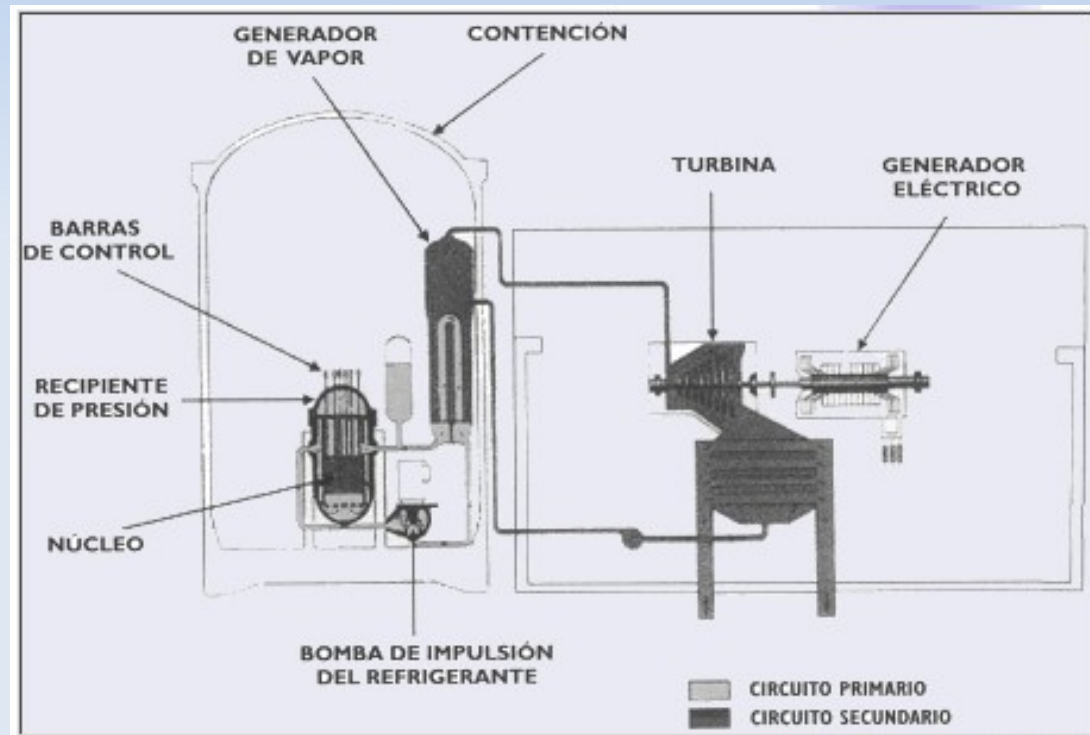


Fig. 1 - Esquema simplificado del reactor de agua a presión (PWR).

1. Partes de una central nuclear

- ✓Un intercambiador de calor calienta el agua del circuito secundario
- ✓Se genera vapor que mueve los álabes de unas turbinas enormes
- ✓La energía mecánica se convierte en electricidad en los alternadores
- ✓Todo ello fuera de la contención



Sala de turbinas en una central típica

1. Partes de una central nuclear

- ✓El calor residual en el secundario se refrigera en las torres de refrigeración (que no chimeneas)
- ✓El agua cae en forma de ducha y se evapora, transfiriendo calor latente de vaporización al agua y por tanto refrigerando el agua restante



1. Partes de una central nuclear

- ✓ Por último, todos los aspectos de control y seguridad se controlan de manera remota desde la sala de control de la central, que es una zona segura en caso de accidente



2. Reactores nucleares

- ✓ En función de su utilidad, se pueden clasificar en
 - reactores **de potencia**: son los que se utilizan para extraer grandes cantidades de energía en las centrales nucleares (~ 1.5 GW)
 - reactores de **investigación**: son pequeños reactores usados principalmente como fuente de neutrones con propósitos de investigación científica
 - reactores de **conversión** (breeder): generan más material fisible que consumen.

2. Reactores nucleares

- ✓ Un reactor nuclear es una instalación capaz de iniciar y controlar una reacción nuclear en cadena, así como evacuar el calor generado
- ✓ Cuenta con varios elementos:
 - combustible fisible (^{235}U , ^{239}Pu , ...)
 - moderador neutrónico (agua, grafito, ...)
 - refrigerante (agua, CO_2 , ...)
 - reflector de neutrones (agua, grafito, ...)
 - elementos de control (barras de boro o grafito)
 - blindaje (hormigón, acero, agua, ...)

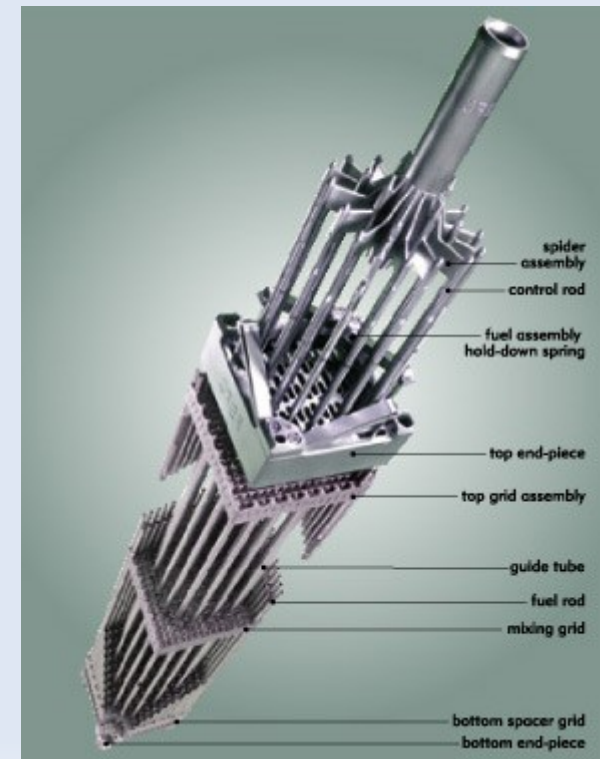
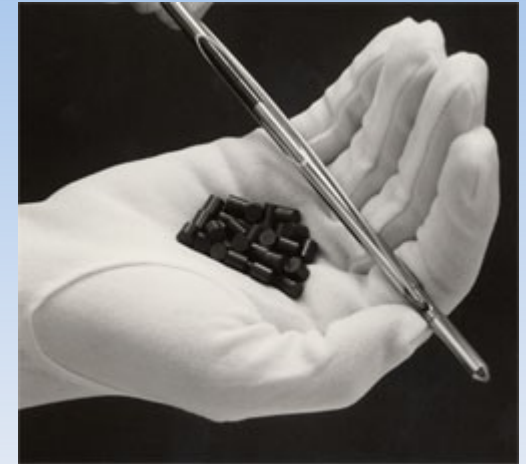
2. Reactores nucleares

- ✓ El combustible nuclear contiene material fisible
- ✓ Normalmente ^{235}U (presente en la Tierra al 0,71%)
- ✓ También se puede utilizar ^{233}U , ^{239}Pu ,... pero estos isótopos son artificiales (generados en reactores)



2. Reactores nucleares

- ✓ Con el material se forman unos cilindros pequeños de óxido de uranio, que se apilan todos juntos
- ✓ Forman barras de combustible de varios metros de largo y están recubiertas por materiales estructurales como zirconio o aluminio, que absorben pocos neutrones
- ✓ Han de tener canalizaciones por donde circule el refrigerante



2. Reactores nucleares

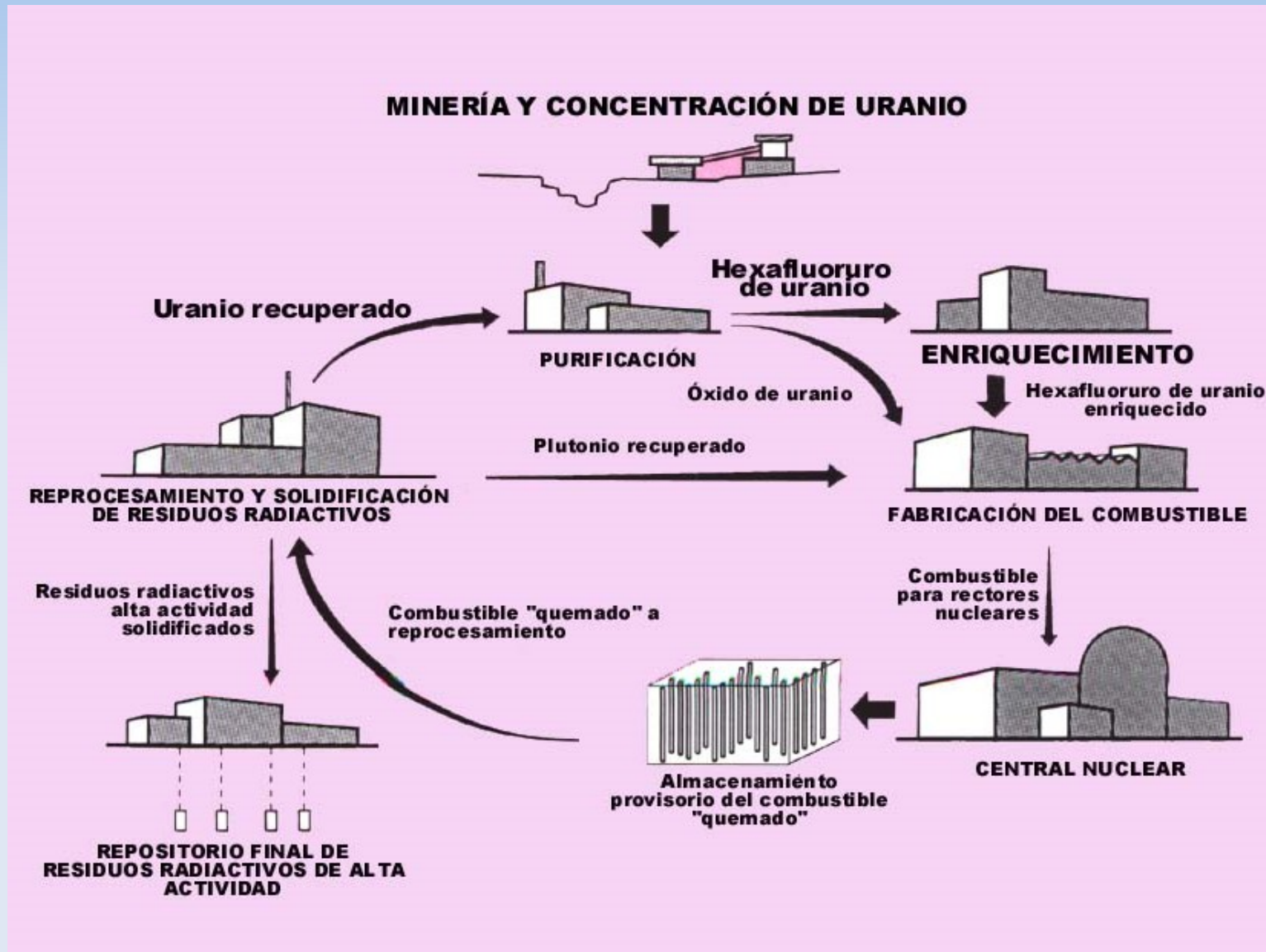
✓Etapas de la fabricación:

1. Minería y fabricación de concentrado de uranio
2. Conversión a hexafluoruro de uranio
3. Enriquecimiento
4. Fabricación de elementos combustibles



- ✓ En España sólo se hace la última etapa
- ✓ ENUSA (Empresa nacional de Uranio Sociedad Anónima)
- ✓ Controlada por CSN y el Ministerio de Industria

2. Reactores nucleares



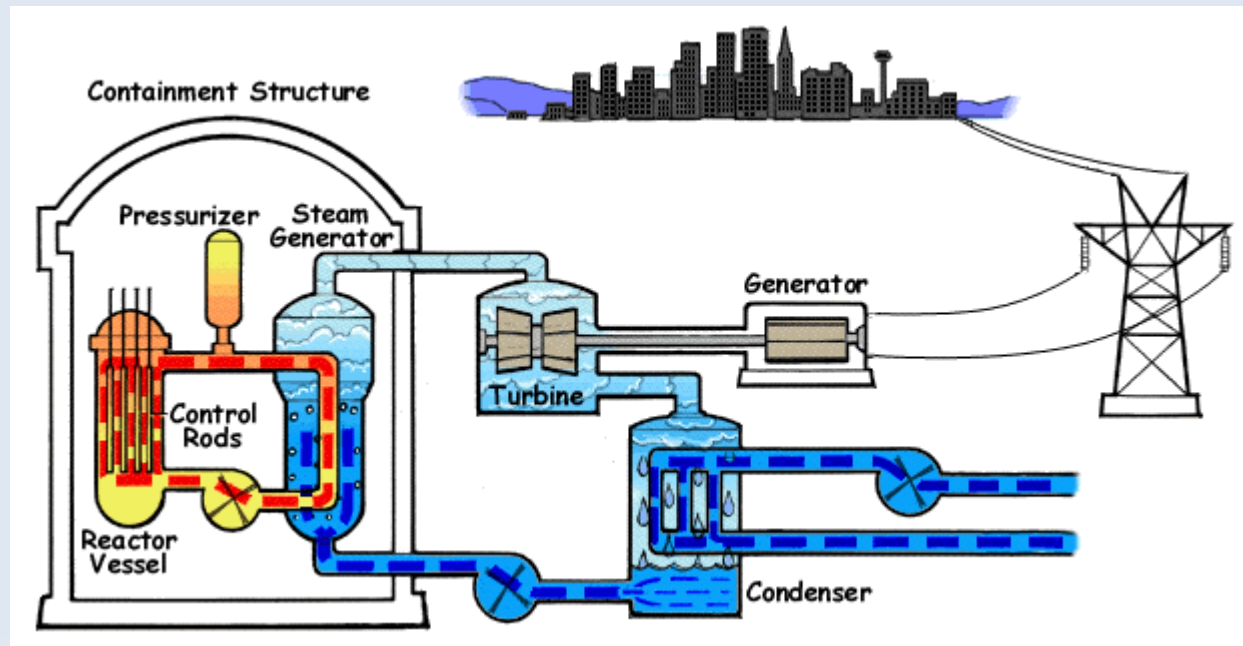
El ciclo del uranio

2. Reactores nucleares

- ✓ En función del tipo de neutrones que se utilizan los reactores se pueden clasificar en **rápidos** y **térmicos**
- ✓ Dentro de los térmicos, en función del tipo de moderador hay: reactores de **agua ligera**, reactores de **agua pesada** y reactores de **grafito**
- ✓ El combustible que utiliza el reactor depende del tipo de reactor y sus características de diseño

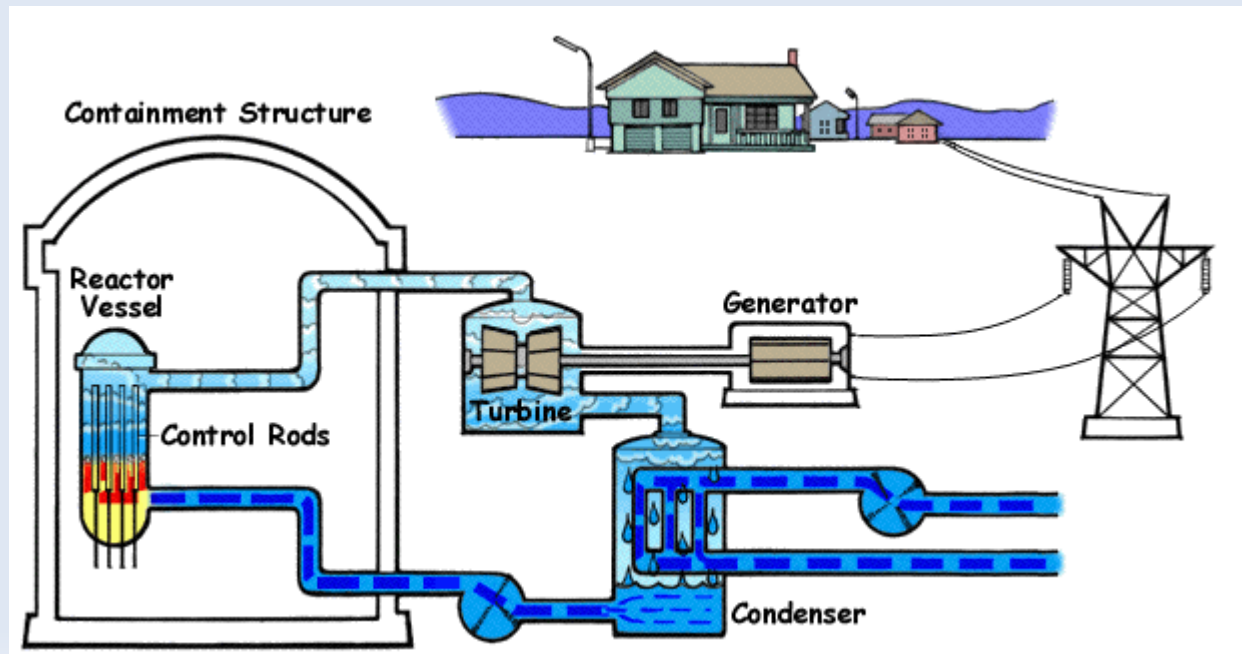
2. Reactores nucleares

- ✓ Un reactor de agua a presión (PWR) es un reactor de neutrones térmicos refrigerado (y moderado) por agua ligera (agua común muy pura)
- ✓ El 60% de los reactores de potencia siguen este diseño



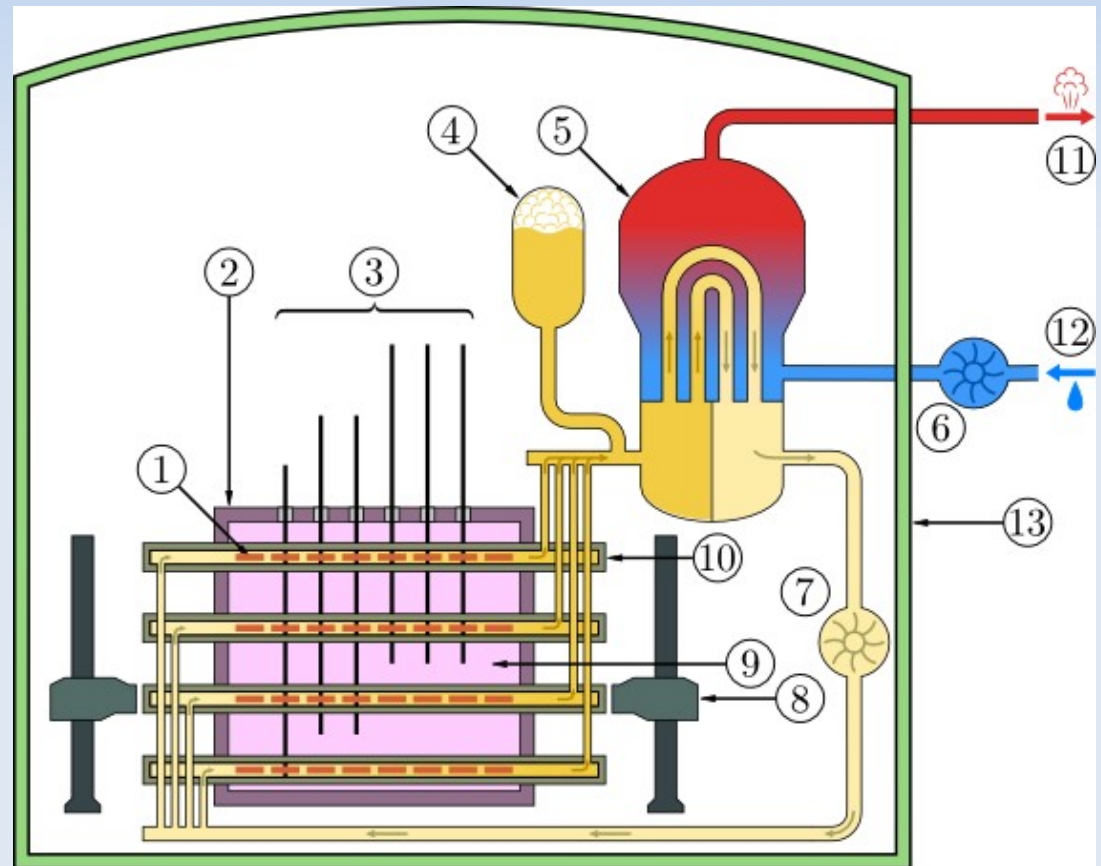
2. Reactores nucleares

- ✓ Un reactor de agua en ebullición (BWR) es un reactor de neutrones térmicos refrigerado (y moderado) por agua ligera (agua común muy pura)
- ✓ Éste es el diseño de los reactores de Fukushima



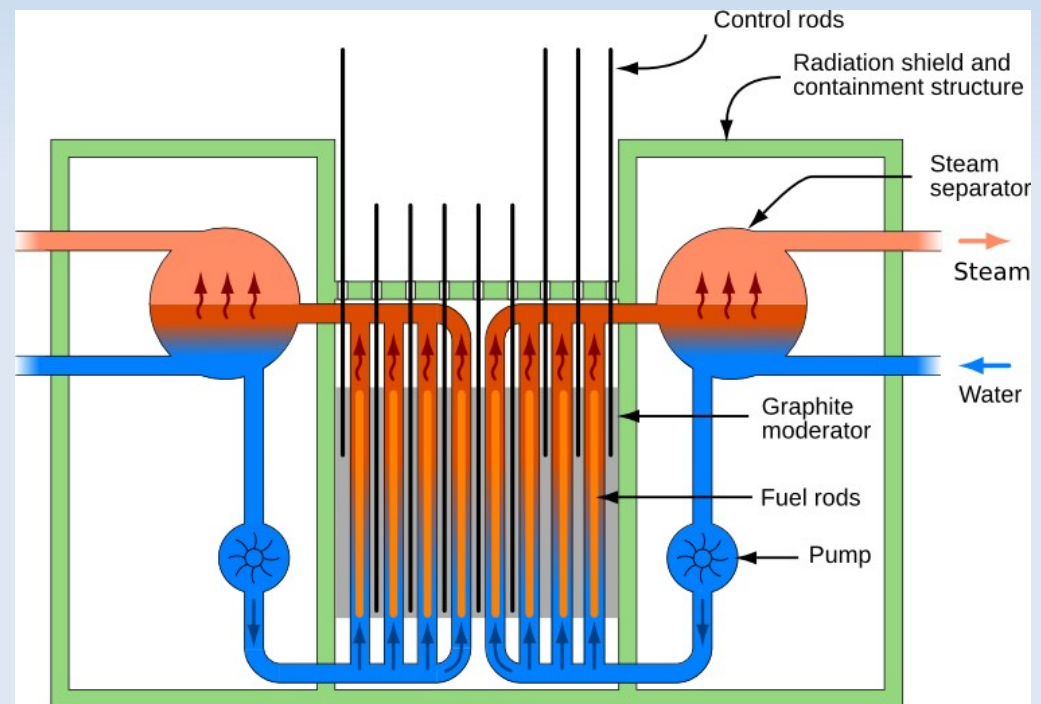
2. Reactores nucleares

- ✓ Reactor de agua pesada (HWR) CANDU es un reactor de agua pesada
- ✓ El combustible puede ser uranio enriquecido o natural
- ✓ Son muy versátiles con respecto al combustible
- ✓ Recargan “en caliente”
- ✓ Las centrales canadienses siguen este diseño



2. Reactores nucleares

- ✓ RBMK (reaktor bolshoy moshchnosti kanalniy) es un diseño soviético moderado por grafito y refrigerado por agua ligera
- ✓ El reactor utilizado en Chernóbil
- ✓ Todavía quedan algunos (pocos) en funcionamiento

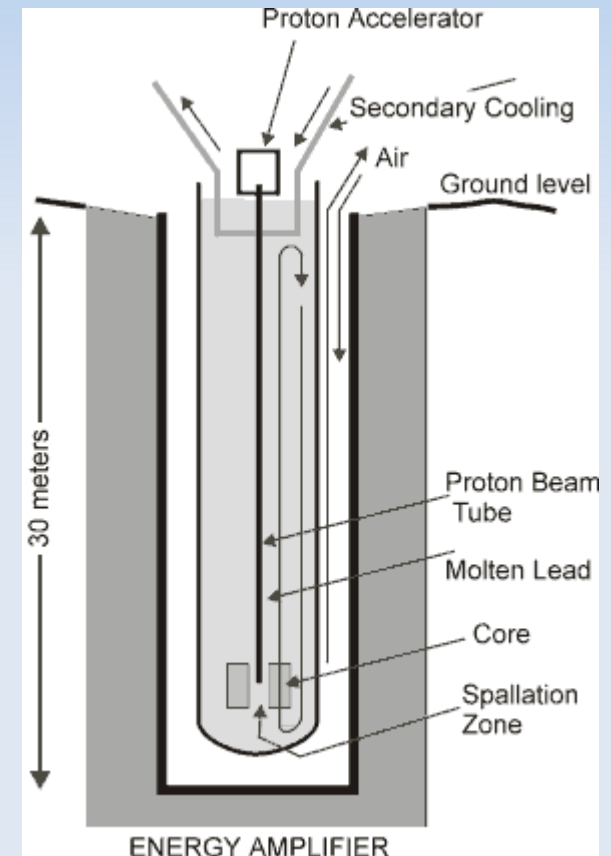


2. Reactores nucleares

- ✓ Los **reactores rápidos** utilizan neutrones rápidos, no térmicos
- ✓ Esto hace que puedan utilizar uranio empobrecido como combustible
- ✓ Generan muchos menos residuos, y aprovechan casi al 100% la energía de la fisión
- ✓ Generan otros combustibles (**breeder**)
- ✓ No pueden estar refrigerados por agua (sodio líquido)
- ✓ Son difíciles de estabilizar
- ✓ No se utilizan extensivamente, pero pueden ser el futuro

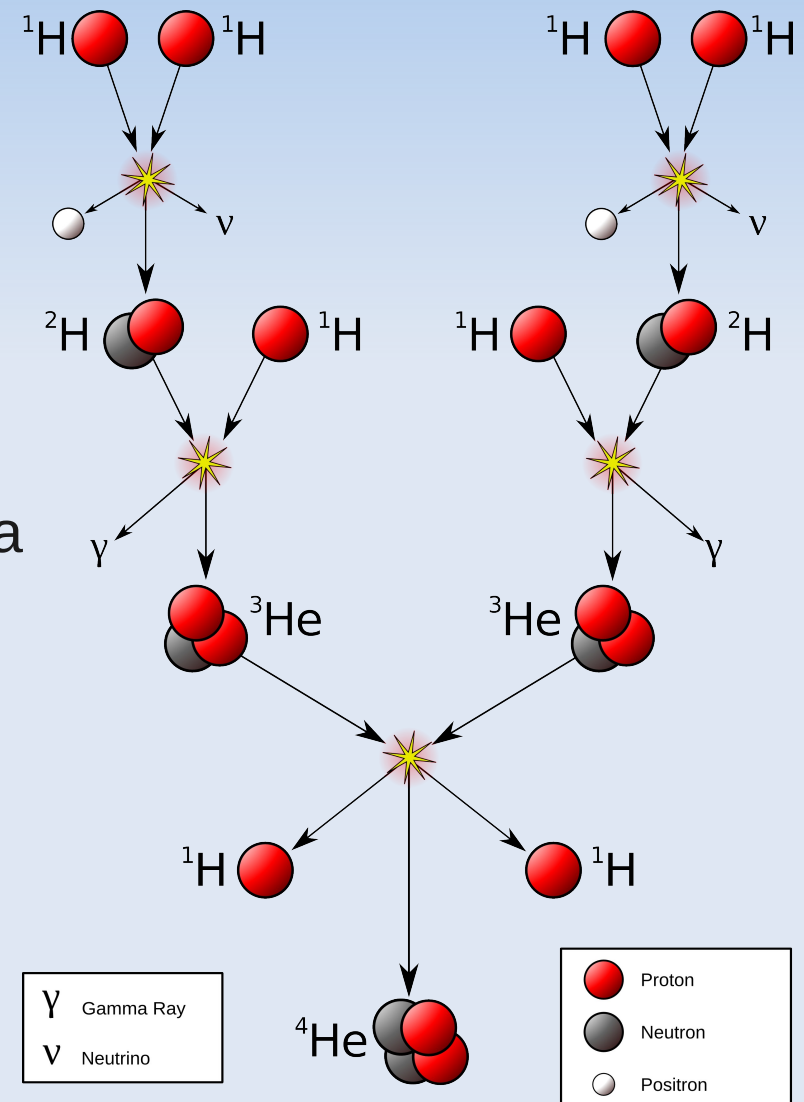
2. Reactores nucleares

- ✓ Un tipo prometedor de reactores utilizan Torio (^{232}Th) como fuente de energía
- ✓ Es 3 veces más abundante que el Uranio en la Tierra y no necesita enriquecimiento
- ✓ ^{232}Th no es fisible, pero es fértil y tras absorber un neutrón (y dos desintegraciones beta) genera ^{233}U que sí es fisible
- ✓ Requiere una fuente continua de neutrones (sin barras de control)
- ✓ Residuos de vida media más corta



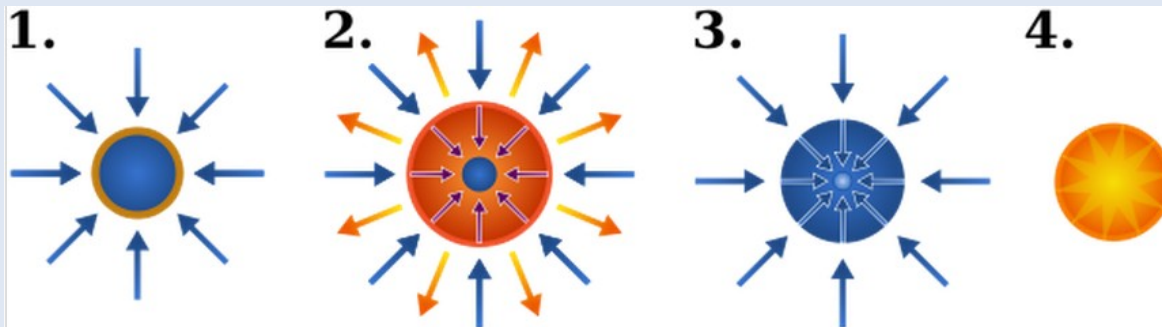
2. Reactores nucleares

- ✓ La fusión nuclear ofrece tremendas expectativas de futuro:
 - combustible barato y abundante
 - residuos inocuos
 - energía potencialmente ilimitada, limpia y segura
- ✓ Hay dos filosofías de funcionamiento:
 - confinamiento magnético
 - confinamiento inercial



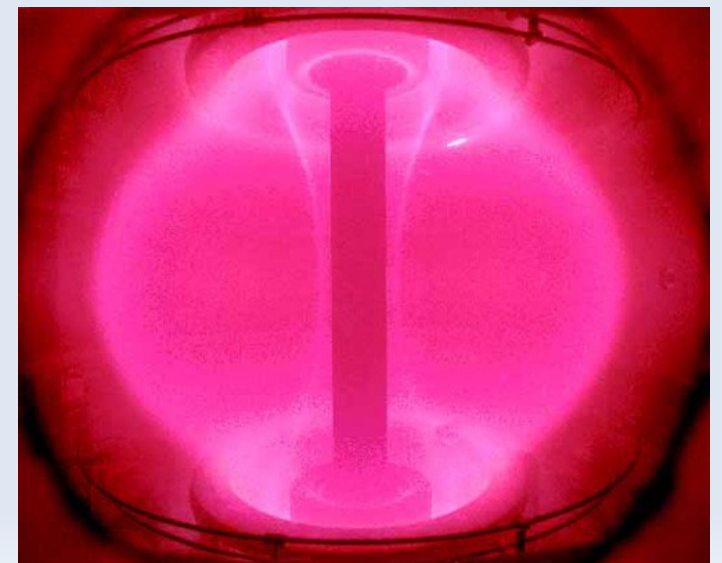
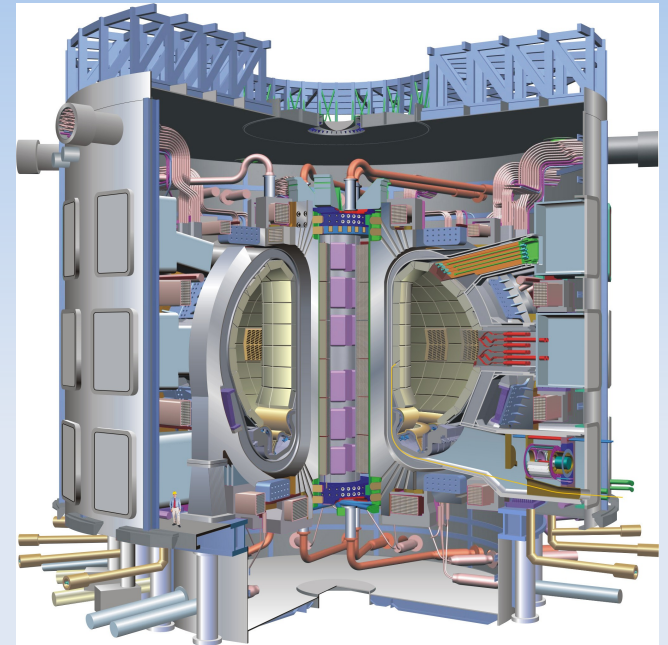
2. Reactores nucleares

- ✓ El confinamiento inercial comprime los productos a fusionarse mediante impulsos láser
- ✓ El material se inyecta en forma de pequeñas cápsulas con Deuterio y Tritio
- ✓ El proyecto NIF (National Ignition Facility) en EEUU comenzó a funcionar en 2010, y es el más importante hasta la fecha



2. Reactores nucleares

- ✓ El confinamiento magnético utiliza potentes campos magnéticos para confinar el plasma ionizado a tremendas temperaturas y presiones
- ✓ El diseño más extendido es un toro hueco denominado **tokamak**
- ✓ Actualmente (y hasta 2038) el proyecto internacional ITER pretende construir el mayor tokamak hasta la fecha, y conseguir una reacción de fusión automantenida (hay retrasos)



3. Medidas de seguridad

- ✓ Una central nuclear es una instalación potencialmente peligrosa debido a la naturaleza del combustible nuclear (aunque **no hay riesgo de explosión nuclear**)
- ✓ Los tres objetivos fundamentales de la seguridad:
 1. Detener la reacción nuclear
 2. Mantener el reactor subcrítico
 3. Evitar la evacuación de materiales radiactivos
- ✓ La seguridad sigue una filosofía de **defensa en profundidad**

3. Medidas de seguridad

- ✓ **Reactor Protection System** (RPS):
 - ✓ Se encarga de detener la reacción en cadena
 - ✓ El principal sistema son las barras de control
 - ✓ También se pueden añadir refrigerantes líquidos con elementos que capturen neutrones, como el boro

3. Medidas de seguridad

- ✓ **Essential service water system** (ESWS):
- ✓ Es el sistema de refrigeración principal que extrae la energía del reactor
- ✓ Todos los problemas de los reactores de Fukushima vienen de la pérdida total de este sistema

3. Medidas de seguridad

- ✓ **Emergency core cooling system** (ECCS):
 - ✓ Este sistema se activa en caso de accidente, y pretende evitar el daño en el combustible (fusión del núcleo)
 - ✓ Contiene una serie de subistemas (que varían en diferentes tipos de centrales): HCPI, ASP, LCPI, ...
 - ✓ En términos generales, se encargan de enfriar el reactor en caso de accidente

3. Medidas de seguridad

- ✓ Para que todos estos sistemas funcionen correctamente, hay una serie de sistemas que generan energía una vez la central se ha desconectado: motores diesel, baterías,...
- ✓ Estos sistemas fueron inutilizados por el tsunami que siguió el terremoto en Fukushima I (no en Fukushima II)
- ✓ Una de las lecciones a aprender

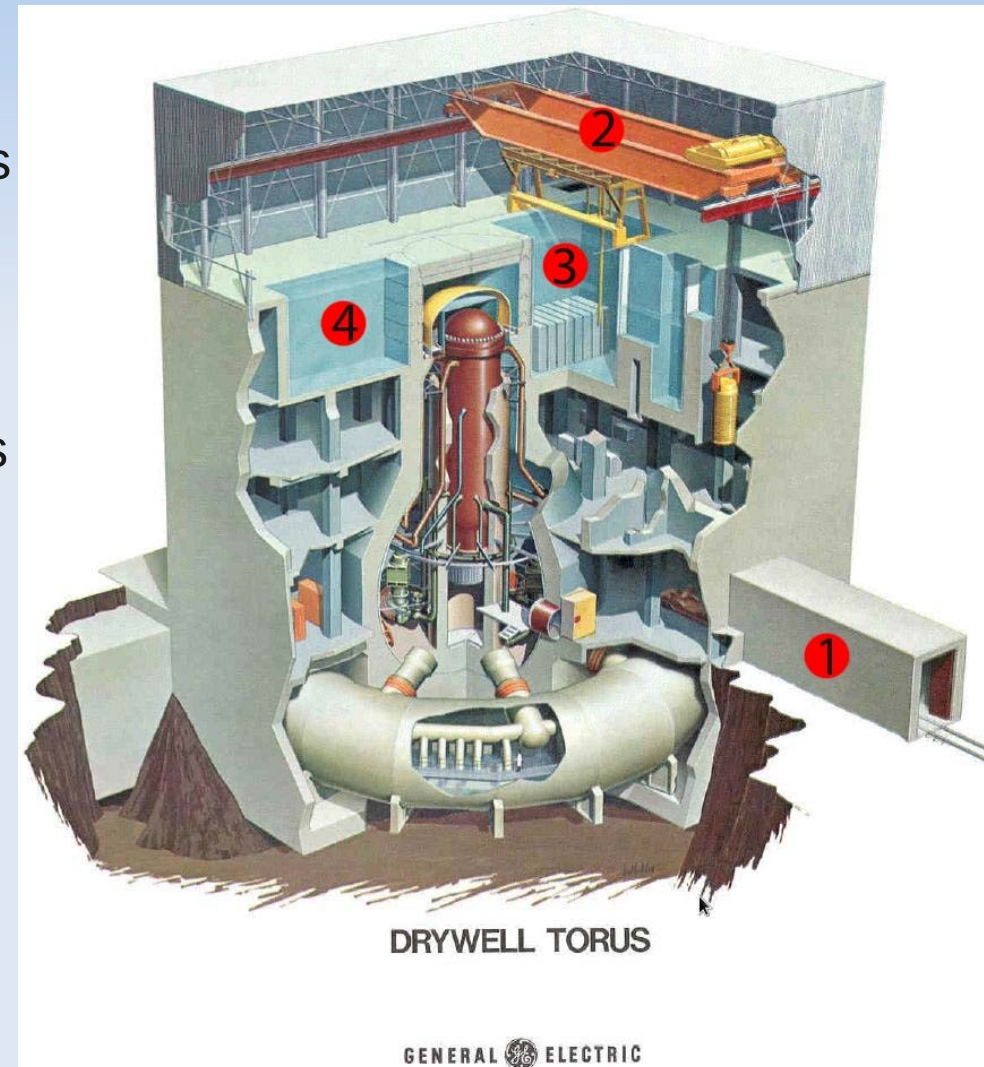
3. Medidas de seguridad

- ✓ En caso de que todo lo demás falle, el **sistema de contención** evita que el material fisible entre en contacto con el ambiente
- ✓ Sigue la filosofía de defensa en profundidad
- ✓ El desastre de Chernóbil destruyó también esta última línea de defensa
- ✓ En Fukushima I esta línea de defensa sigue en pie, con algunos problemas...

3. Medidas de seguridad

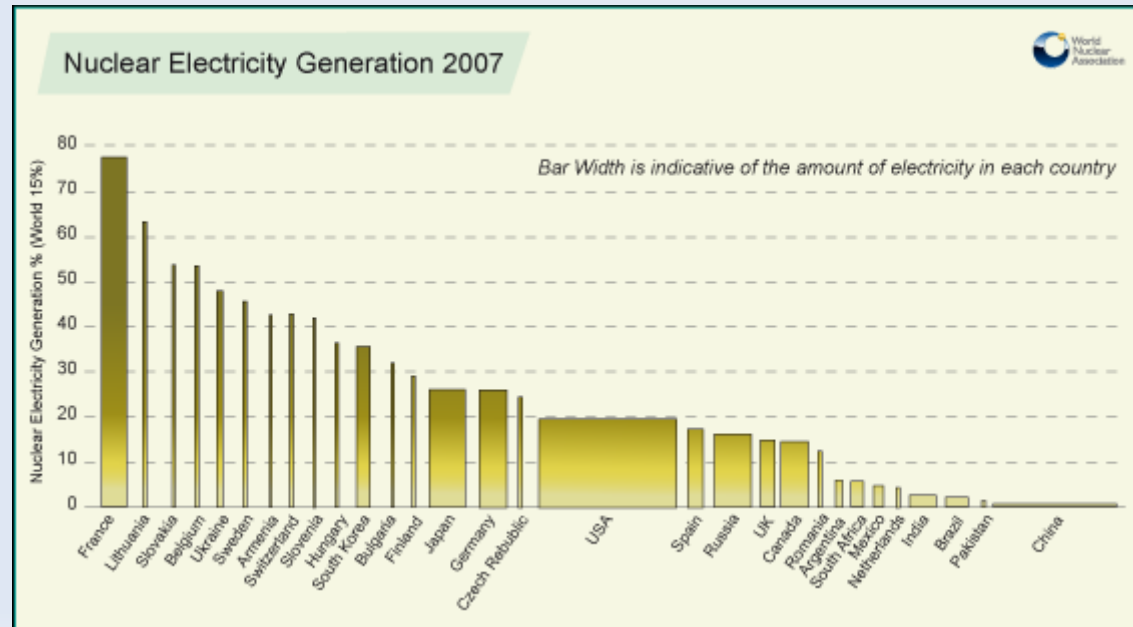
✓ Elementos de contención:

1. Vainas de combustible (de Zirconio, Aluminio, ...) que confina los elementos radiactivos
2. La vasija del reactor, de varios centímetros de acero, que evita fugas de radiación y refrigerante
3. La contención primaria que contiene todo el sistema en caso de fusión del núcleo (acero y hormigón)
4. La contención secundaria, que es el edificio en sí (lo que ha explotado en Fukushima I)



4. Centrales nucleares en el mundo

- ✓ Actualmente hay unos 440 reactores nucleares de potencia distribuidos en 30 países, con una potencia generada de 377 000 MW
- ✓ Supone un 14% de toda la energía eléctrica generada en el mundo



4. Centrales nucleares en el mundo

- ✓ En España hay 8 reactores nucleares en activo, con una potencia total de 8 GW
- ✓ Generan ~ 20% de la energía eléctrica consumida

