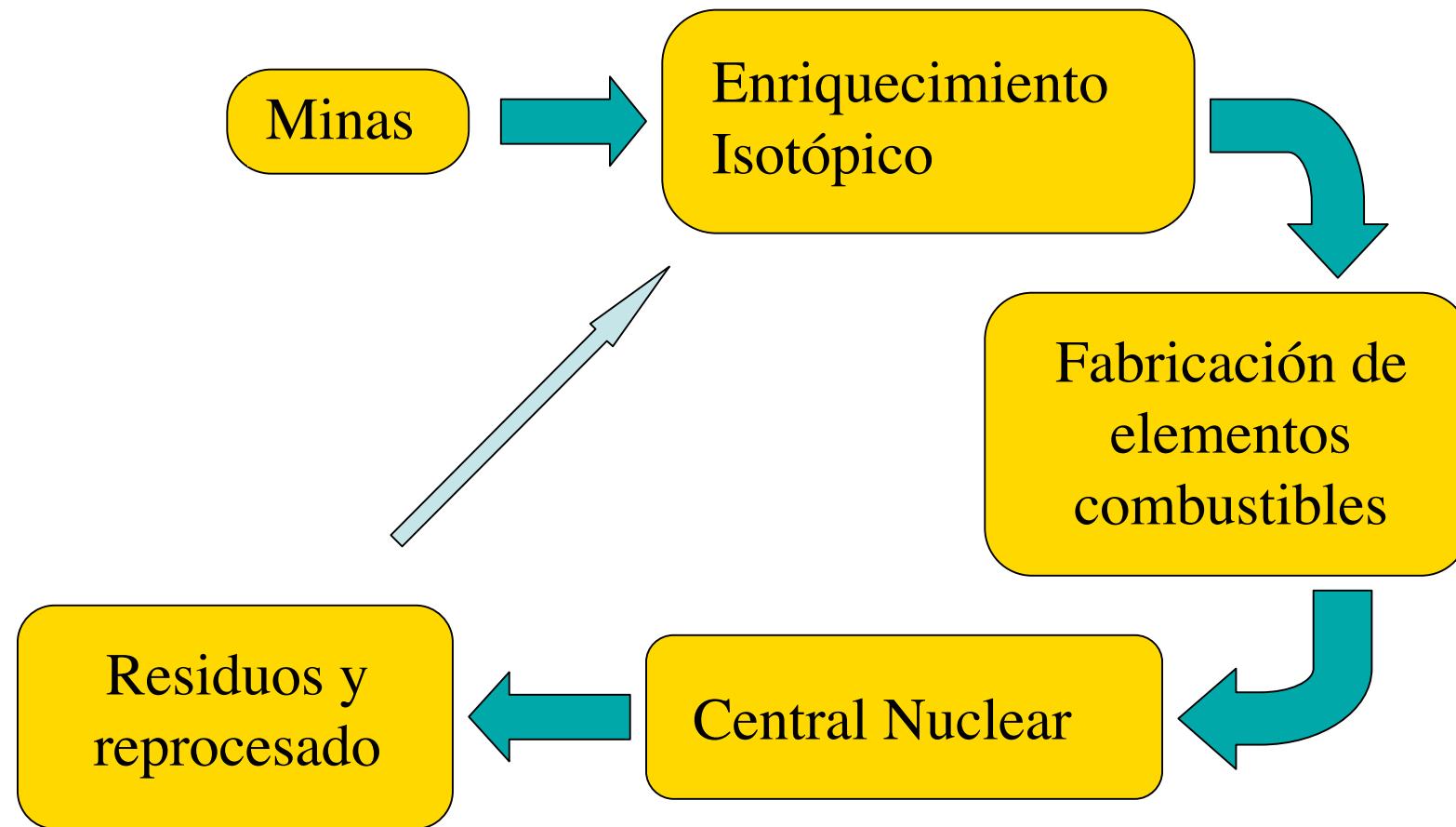




Física y Tecnología Energética

14 - Energía Nuclear de Fisión.
El ciclo del Combustible.

El ciclo del combustible nuclear



Minería del Urano

El Urano constituye un 3 ppm de la corteza terrestre. (Granito 4 ppm, rocas sedimentarias 2 ppm) El agua de mar contiene 10^{-6} g / l de U.

Hay 150 minerales con contenido en U: *Pechblenda, Uranita, Carnotita, Euxenita....*Son rentables si la concentración de uranio es mayor de 1%

Los yacimientos están en zonas muy localizadas de la tierra.

(reservas en miles de toneladas de U_3O_8)

Rusia (158), Francia(143), Suecia(97), Checoslovaquia(90), España(30).
Australia(1070), Kazajistán(630), China(200?), India (67).
Sudáfrica(326), Níger(251), Namibia(221), Gabón(190).
Canadá(440), Brasil(143), USA(102), Argentina (51).

Fabricas de Concentrado de Urano (Junto a la mina)

Se convierte el mineral en U_3O_8 (70% U)

Seguridad en las minas

Los problemas de las demás, agravados por la radiactividad

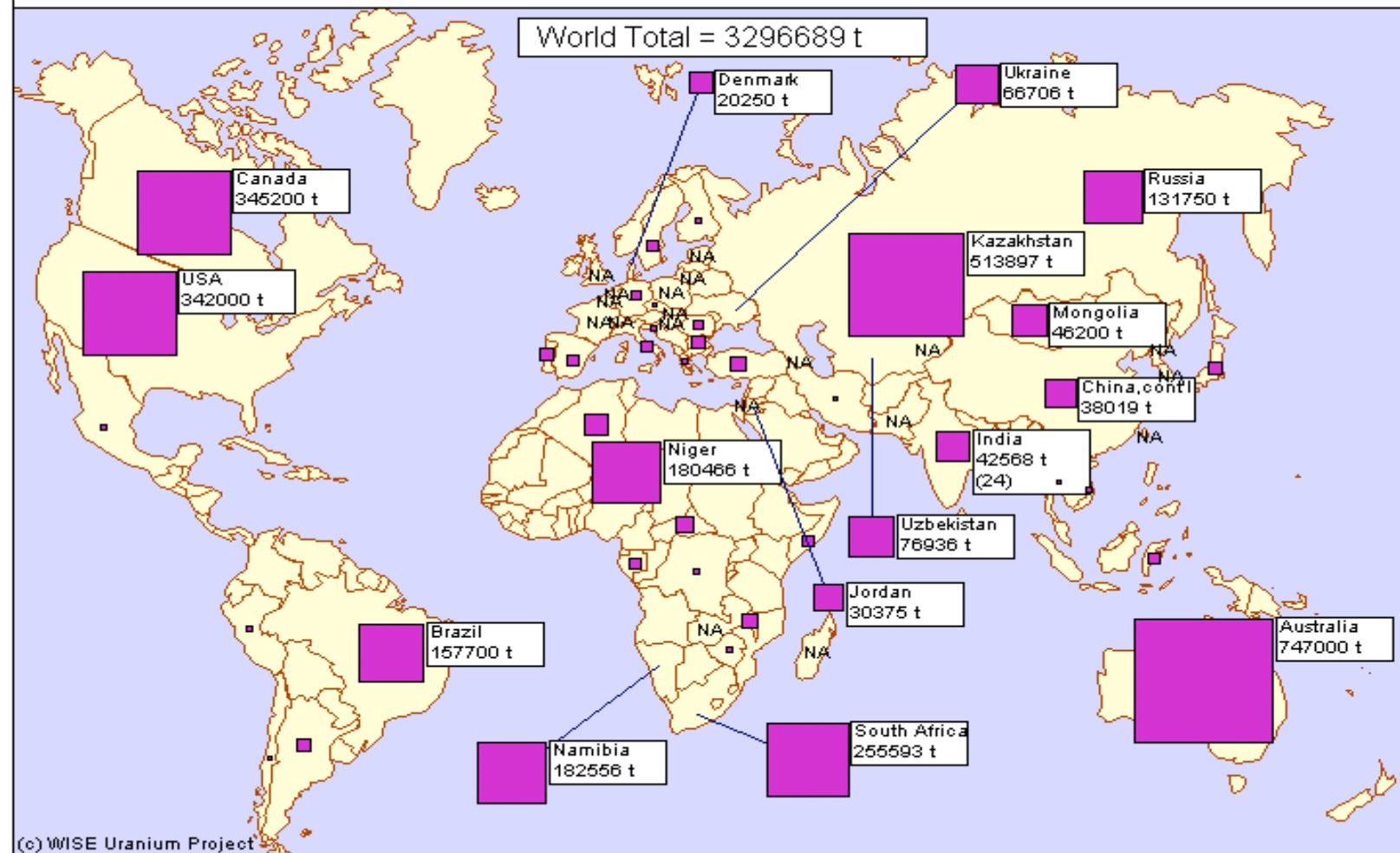
Peligro de inhalación de Rn, Silicosis de U,...ect

Se generan Miles de Tm de escorias de baja actividad

Minería del Urano

Uranium Resources (RAR - \$130/kg U)

[t U] Reasonably Assured Resources, recoverable res. as of 1/1/2005, Cost range < US\$130/kg U (OECD 2006)



t = metric tonne · NA = Data not available

Enriquecimiento isotópico del Urano

El U natural: 99.3% ^{238}U y 0.7% ^{235}U

Para Reactores Convencionales: 1 - 3 % ^{235}U

Para Reactores Rápidos: 30-90 % ^{235}U

Hay que enriquecer el Urano en su contenido en ^{235}U

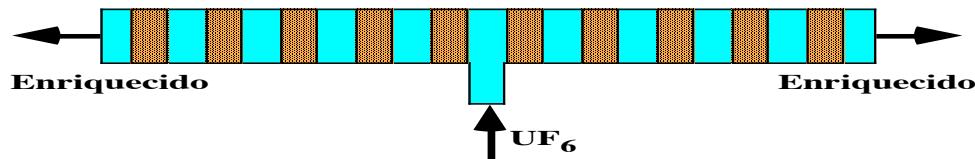
^{235}U y ^{238}U iguales propiedades químicas
pequeña diferencia en las masas

El U_3O_8 se convierte en UF_6 (gas a 56°C)
y se separan los isótopos por...

Enriquecimiento isotópico del Urano

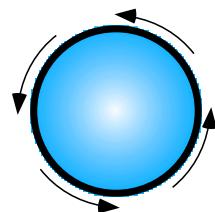
- Difusión gaseosa

Al tener masas distintas \Rightarrow distinta velocidad de difusión a través de membranas porosas $\sim 1/\sqrt{\text{masa}}$



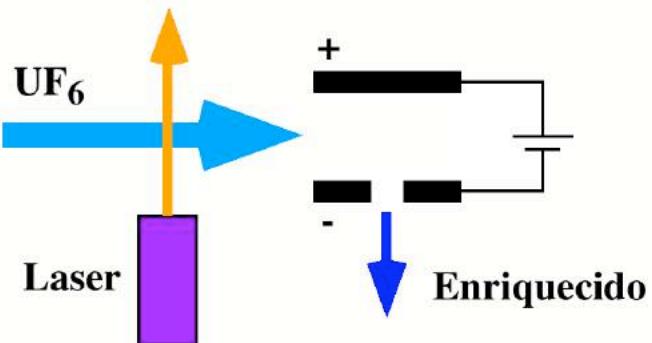
- Centrifugación

Al centrifugar \Rightarrow las mol pesadas, se concentran en la periferia \sim masa



- Separación por láser

Se ioniza selectivamente el ^{235}U \Rightarrow Se separan con campos eléctricos



Fabricación de elementos combustibles

Enriquecimiento de Urano (ton SWU/año)

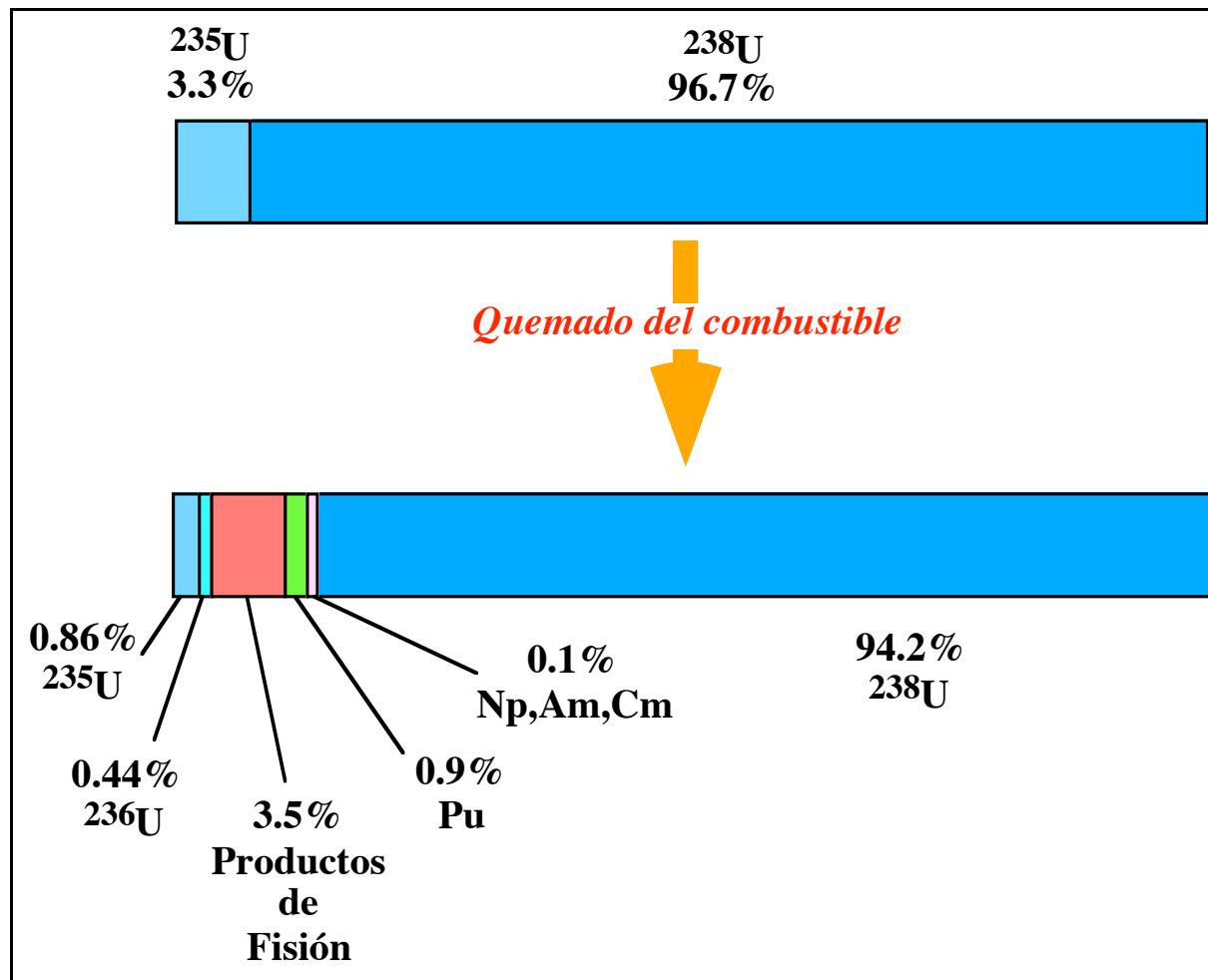
EURODIF (Francia, Italia, Bélgica, España)	difusión	10 800
URENCO (Reino Unido, Holanda, Alemania)	centrifuga	5 850
DOE (USA)	difusión	8 000
TECHNABEXPORT (Rusia)	centrifuga	20 000
China	centrifuga	1 300
Japón, Pakistán, Brasil, Sudáfrica		5

**El polvo de UF₆ enriquecido se convierte en UO₂
y se fabrican pastillas cerámicas**

Las pastillas se introducen en vainas de Zircalloy, o de Magnox

**Fábricas en USA, Francia, Reino Unido, Alemania, Japón,
Canadá, Suecia, Bélgica, Italia, España,....**

Irradiación en la Central Nuclear



Residuos y reprocesado

El Combustible quemado se almacena en las piscinas de los Reactores durante 10 - 15 años

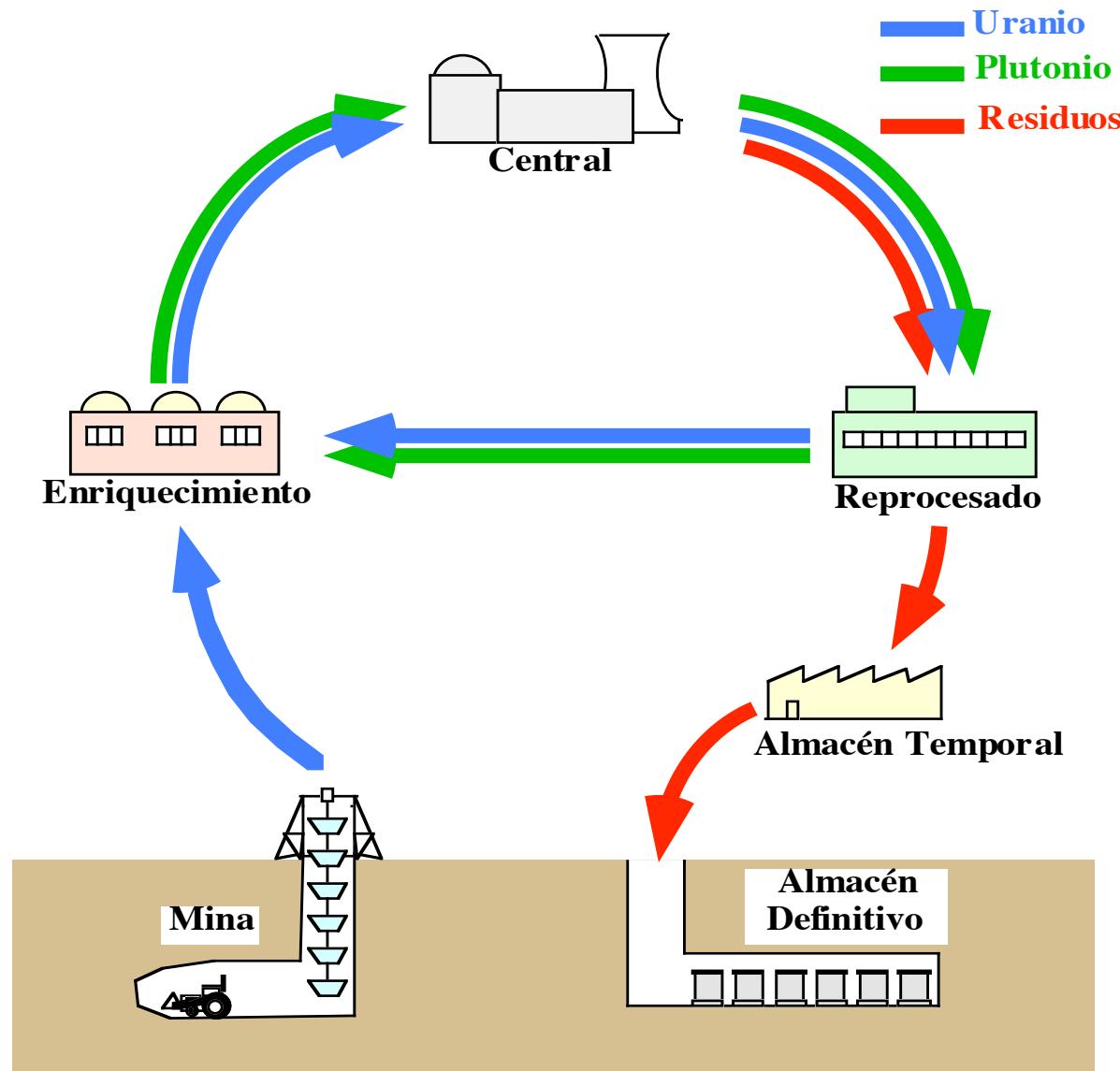
*Los Productos de Fisión tienen vidas medias cortas
Los Transuránidos tienen vidas medias muy largas*

Todavía contiene isótopos útiles:
 ^{235}U y ^{239}Pu



Se puede reprocesar para volver a usarlo o almacenarlo definitivamente

El ciclo del combustible con reprocessado



Residuos radiactivos

En todo el proceso de generación de electricidad Nuclear se generan:

Minas y Fábricas de Concentrados de Urano

1 m³ por kg de U. Baja actividad y larga vida media

Enriquecimiento y Fabricación de Elementos Combustibles

0.4 m³ por Tm de Combustible. Baja actividad y larga vida media

Centrales Nucleares en una central de 1000 MW

- Activación neutrónica y material contaminado

500 m³ al año. Baja actividad, vida media corta

- Combustible quemado

20 Tm al año, 0.5 m³ por Tm. Alta actividad y vida media larga.

Desmantelamiento de instalaciones

Una Central de 1000 MW al desmantelarla genera 250 m³ de alta actividad, 2000 m³ de actividad media y 15 000 m³ de baja actividad

Además: los hospitales, centros de investigación,.. generan en un país como España 10 000 m³ al año, de residuos de alta actividad y corta vida media.

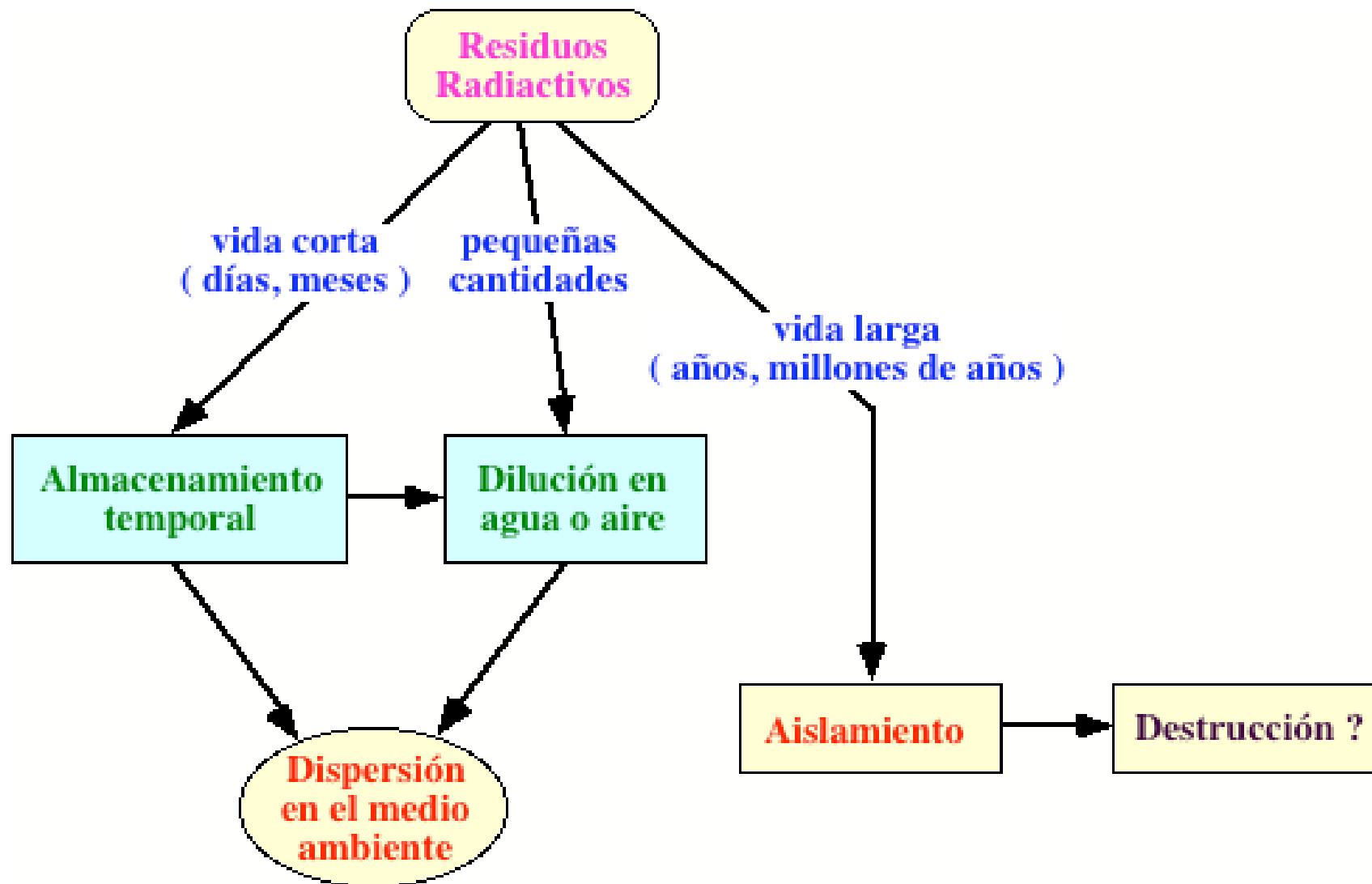
Residuos radiactivos

*Con las Centrales Nucleares existentes hoy en día,
sin reprocesado del combustible,
en el futuro habrá que gestionar:*

En España: **500 millones de Tm de escoria de las minas**
200 000 m³ de Residuos de Baja Actividad
9 000 m³ de Residuos de Alta Actividad

En el Mundo: **30 000 millones de Tm de escoria de las minas**
10 millones m³ de Residuos de Baja Actividad
450 000 m³ de Residuos de Alta Actividad

Tratamiento de los residuos radiactivos



Residuos de larga vida media

* Escorias de las minas (vida media larga y baja actividad)

- Almacenamiento en superficie, cubierto de tierra (2m) y capa asfáltica.
- Volver a introducirlo en la mina al agotarse, y sellarla

* Combustible usado (vida media larga y alta actividad)

- Muy peligroso, dosis mortales a 10 m en 10 minutos.
- Almacenamiento en un lugar aislado y garantizado durante milenios

¿ Será posible su Destrucción algún día ?

Combustible usado: Destrucción

* Transmutación

- Separación química previa
- Irradiación con neutrones hasta conseguir isótopos estables, o de vida media corta. (acelerador, reactor de fisión o de fusión)

* Envio al espacio

- Al Sol o al espacio exterior
- Es muy caro y peligroso
(en un accidente se dispersaría por la atmósfera)

Combustible usado: Almacenamiento

Los residuos deben estar almacenados durante

Totalmente inocuo

100 millones de años

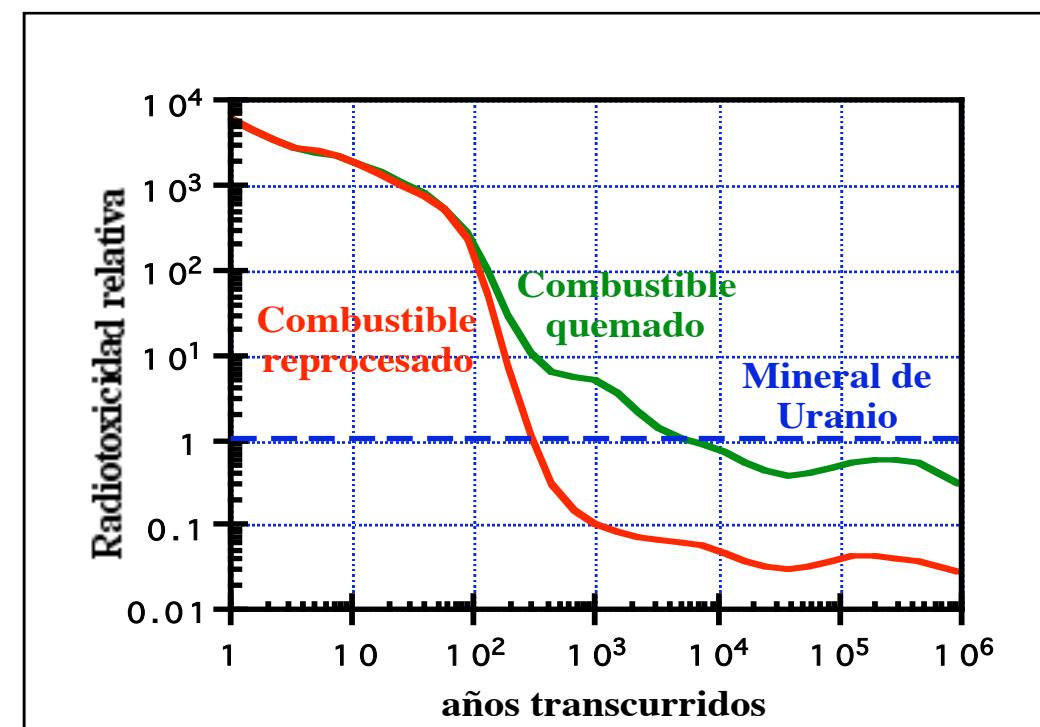
Al nivel del mineral del Uranio natural:

-Combustible quemado

5 000 años

-Reprocesado (sin Pu)

800 años



Almacenamiento: Contenedores

Los contenedores: sin fugas, resistentes a corrosiones, agua, golpes...

- 1º vitrificado del residuo (Pirex)
- 2º contenedor de acero
o cobre de 10 cm de espesor

- Los residuos despiden mucho calor debido a su radiactividad
- Si se empaquetaran pasado solo un año se pondrían a 1900°C (por eso deben guardarse unos años en las piscinas de la central)
- A los 10 años están a 250°C

Una central de 1000 MW
Deben estar separados

10 contenedores por año
100 m² por contenedor



(España: 10 centrales x 30 años x 10 cont x 100 = 0.3 Km² , aún no se ha decidido donde)

Lugar de almacenamiento definitivo

El lugar escogido debe cumplir

- *Estar muy alejado de cualquier zona habitada*
- *Gran estabilidad geológica.*
- *Si hay pequeñas fugas, que éstas no puedan dispersarse hacia regiones habitadas por medio del aire o aguas.*
- *No estar en una zona que pueda despertar interés económico en el futuro*
- *Difícil acceso para el ser humano*
- *Que se recuerde el sitio durante miles de años.*

Tiempo característico de cambios geológicos	1 millón de años
Tiempo característico de cambios en instituciones humanas	20 años

Seguridad de los residuos enterrados en galerías a 500 - 1000 m de profundidad

Para que los productos radiactivos lleguen al ser humano deben:

*escapar del vitrificado y contenedor de acero,
y ser arrastrados por aguas subterráneas hasta la superficie.*

*La mayor parte no son muy solubles en el agua,
o tienen reacciones químicas antes de llegar a la superficie*

*El agua superficial tiene muy poca radiactividad,
a pesar del U y Ra que hay en las rocas*

El reactor natural de Oklo (Gabón) apenas manifiesta dispersión

Energía Nuclear en España

Centrales

Potencia instalada 7 749 MW
(16% del total)

Producción de Energía eléctrica al año
58 mil millones de kW.h

87% de la máxima posible
con la potencia instalada
30 % Electricidad producida,
15.6 % de la Energía consumida

Producción de Urano

260 Tm al año, de Concentrado de U
(autoabastecimiento)
En el 2005 se paró la producción

Residuos acumulados de baja actividad

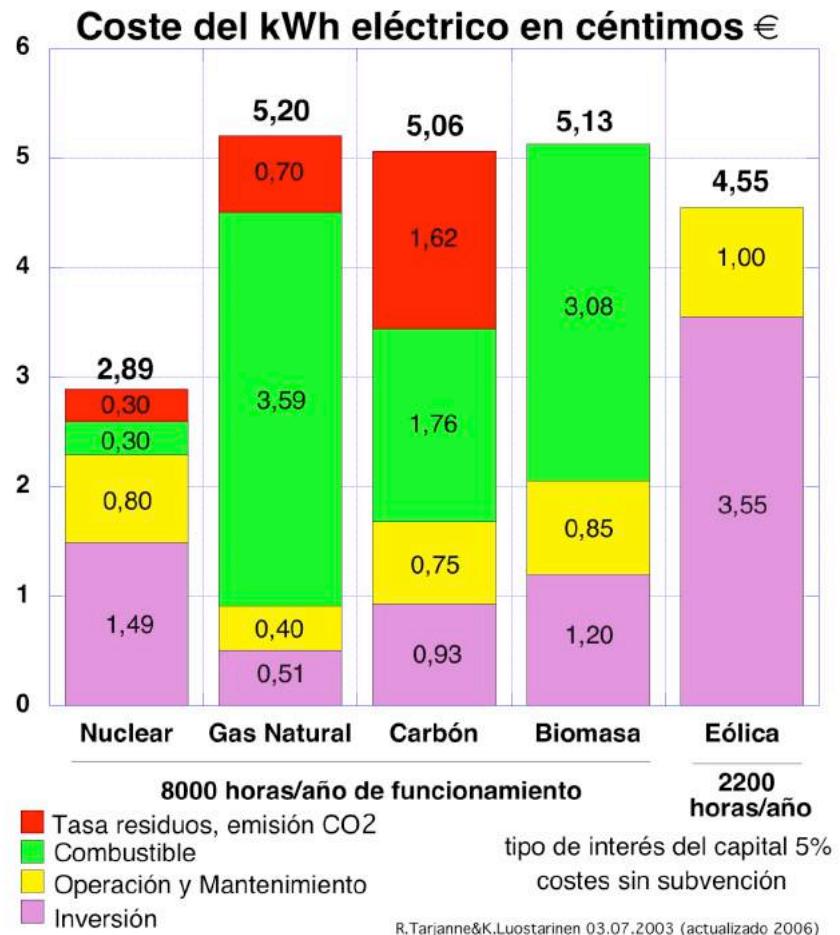
El Cabril 3 400 m³
Centrales 16 700 m³

Residuos acumulados de alta actividad

Centrales 2 100 Tm de
combustible gastado



La Energía Nuclear y los Combustibles fósiles



Coste del kWh eléctrico

(Actualmente solo la energía nuclear incluye todos los factores: residuos...etc)

Reservas considerando el consumo actual

Carbón	1 500 años
Petróleo	60 años
Gas	120 años
²³⁵ U	100 años
²³⁹ P- ²³⁸ U	6 000 años
²³³ U- ²³² Th	30 000 años

La Energía Nuclear y los Combustibles fósiles

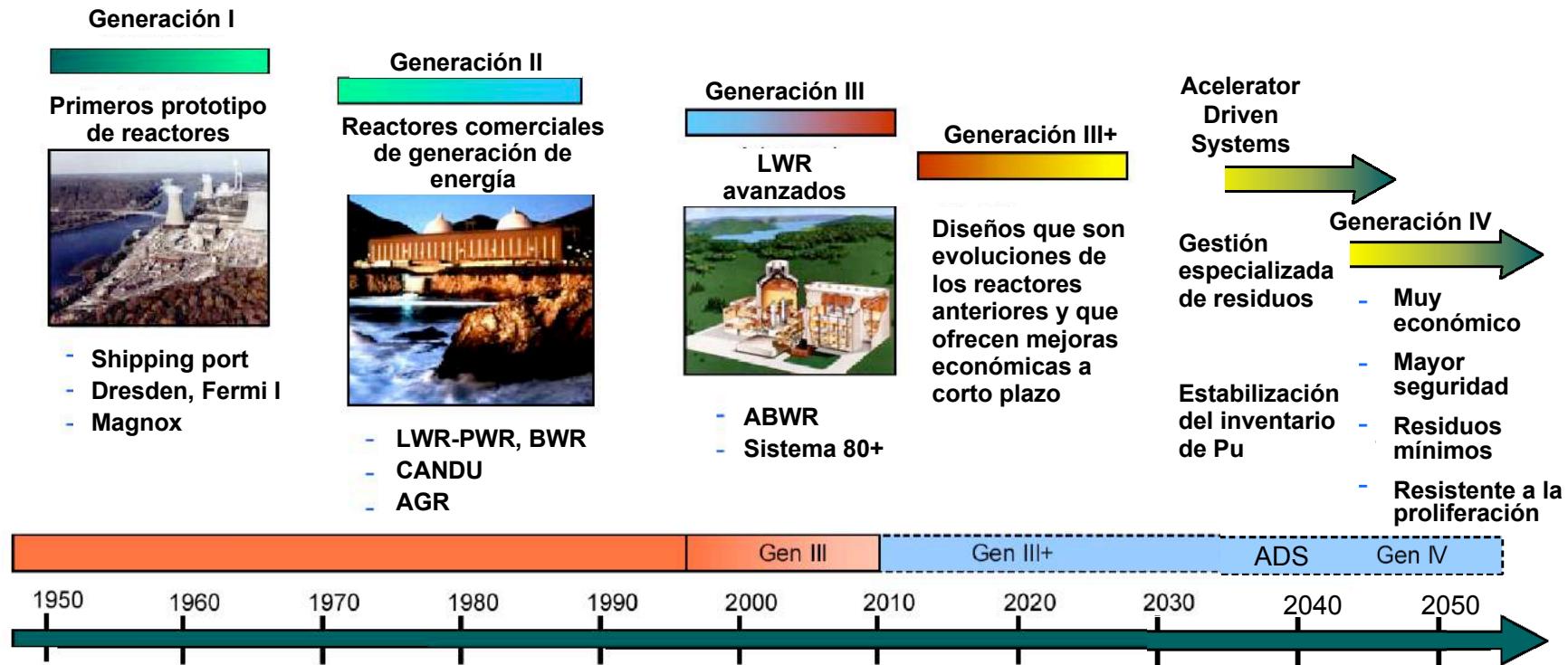
Accidentes graves en países de la OECD 1969-1999:

	Muertos por TWa	Heridos por TWa	Evacuados por TWa	Daños económicos M\$ por TWa
Carbon	137	19	0	34.7
Petróleo	387	439	7 410	940
GasNatural	66	216	4 830	110
LPG	1 810	7 340	481 000	1 920
Hidraulica	4	230	10 100	702
Nuclear	0	0	46 400	1 650

Accidentes graves en países no OECD 1969-1999:

	Muertos por TWa	Heridos por TWa	Evacuados por TWa	Daños económicos M\$ por TWa
Carbon	514	113	0	9
Petróleo	458	444	6 980	247
GasNatural	109	210	7 230	58
LPG	7 660	33 400	645 000	1 200
Hidraulica	2 190	143	70 000	498
Nuclear	53	635	232 000	583 000

Evolución de la Energía Nuclear de Fisión



¿ O abandono ?

La Energía Nuclear en el futuro

En estos momentos hay en el mundo unas 460 Centrales, pero la Energía Nuclear está en moratoria en casi todas partes

*¿ En un futuro será necesaria ?
¿ Habrá otras alternativas, más limpias y más baratas ?*

La Energía Nuclear es la única tecnología que no emite CO₂, lo suficientemente desarrollada para sustituir en pocos años a los combustibles en la generación de electricidad

Si se hace necesario el aumento de E.N...
en su contra tiene una fuerte contestación social

Miedo nuclear



La valoración subjetiva de riesgos
no coincide con la objetiva,
ni tiene porqué hacerlo.

Ninguna otra actividad industrial ha sufrido tanta presión social, aunque en cifras está muy lejos de ser la más dañina (química, automóvil,...)

La "irracionalidad ecologista" ha sido la defensa
más eficaz contra la "falta de escrúpulos racional "

Los accidentes muy graves han ocurrido en países sin presión social

Futuro ? - Reactores más seguros (y más caros)

Reactores modulares

Muchos núcleos pequeños, de 100 MW cada uno con su sistema de refrigeración independiente.

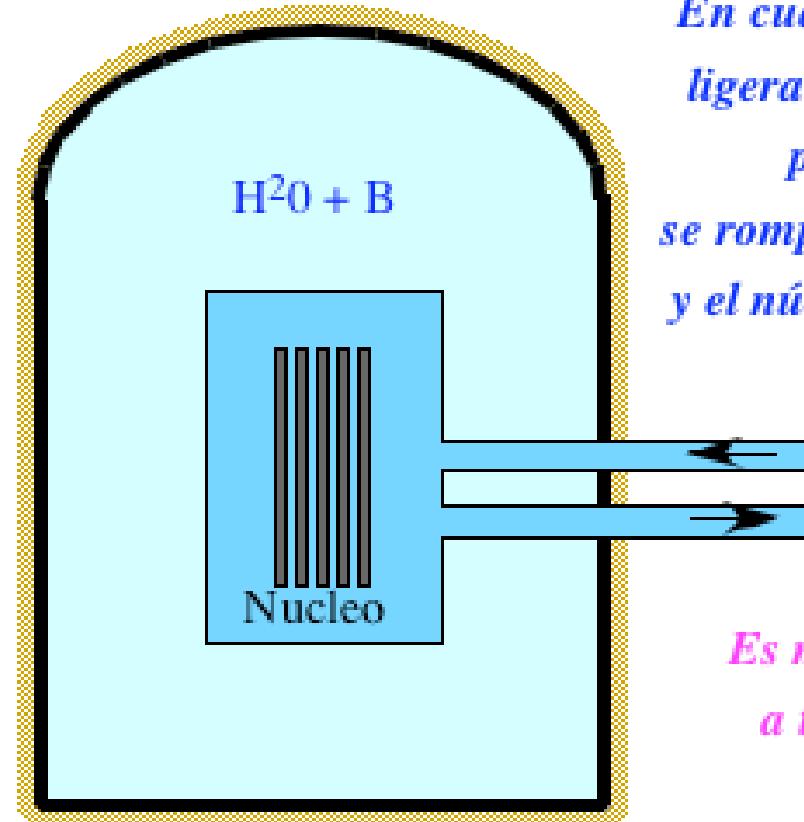
Si falla uno, no tiene potencia suficiente para causar grandes daños

Reactores con núcleo extenso

Diseñar los núcleos del reactor con una relación superficie-volumen mucho mayor.

Se aumenta la disipación de calor, y en caso de accidente grave tarda 10-20 horas en fundirse.

Reactor inmerso en agua borada



En cuanto haya una ligera diferencia de presiones se rompen las paredes y el núcleo se inunda

Es más sensible a terremotos

Reactor reproductor intrínsecamente seguro

La pareja ^{233}U - ^{232}Th puede ser también ^{239}Pu - ^{238}U

*No puede perderse el control de la reactividad
es siempre subcrítico*

Genera muchos menos residuos radiactivos

Menos eficiente en el aprovechamiento de la Energía

Tiene que demostrar su viabilidad

