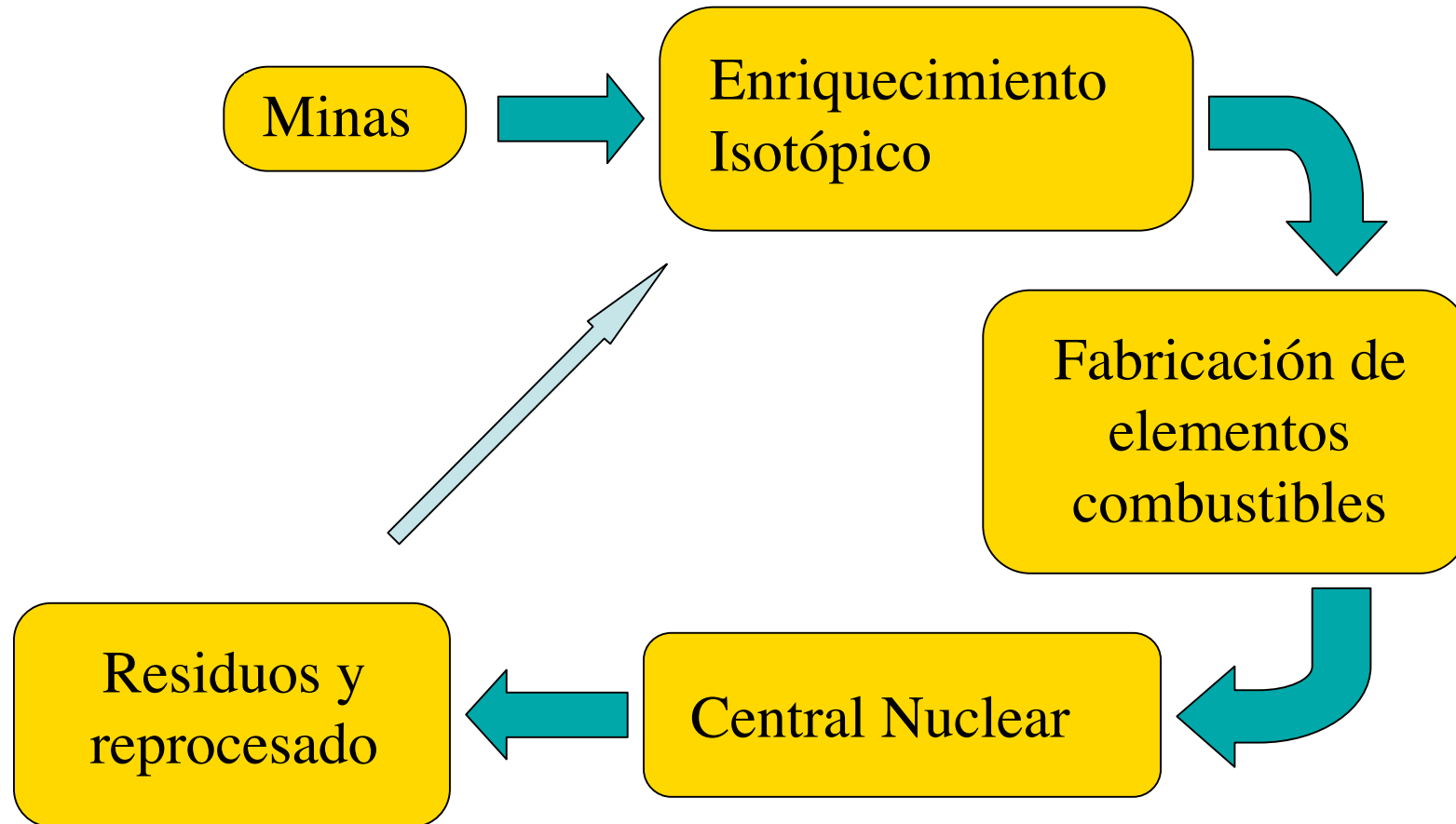




# *Física y Tecnología Energética*

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

# El ciclo del combustible nuclear



# Minería del Uranio

El Uranio 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 Uranio ( Junto a la mina )**

*Se convierte el mineral en  $U_3O_8$  ( 70% U )*

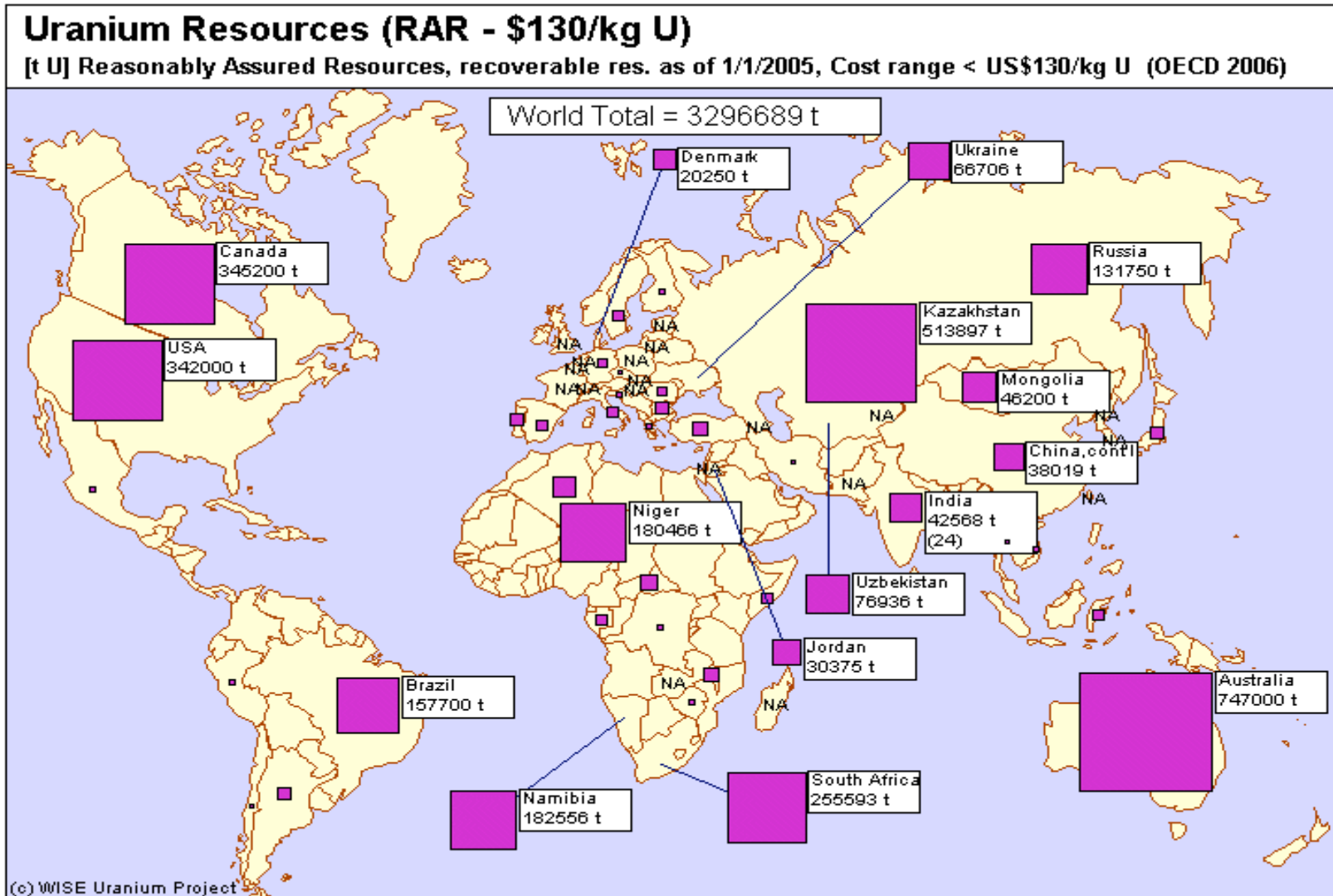
**Seguridad en las minas**

*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 Uranio



t = metric tonne · NA = Data not available

# Enriquecimiento isotópico del Uranio

El U natural: **99.3 %  $^{238}\text{U}$  y 0.7 %  $^{235}\text{U}$**   
Para Reactores Convencionales: **1 - 3 %  $^{235}\text{U}$**   
Para Reactores Rápidos: **30-90 %  $^{235}\text{U}$**

*Hay que enriquecer el Uranio en su contenido en  $^{235}\text{U}$*

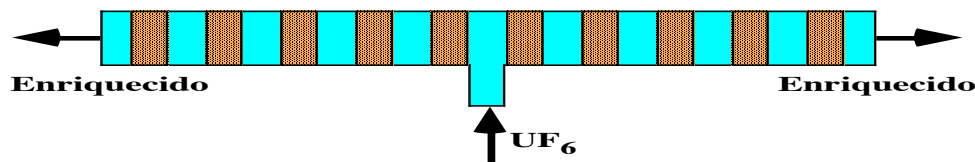
$^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  iguales propiedades químicas  
pequeña diferencia en las masas

El  $\text{U}_3\text{O}_8$  se convierte en  $\text{UF}_6$  ( gas a  $56^\circ\text{C}$  )  
y se separan los isótopos por...

# Enriquecimiento isotópico del Uranio

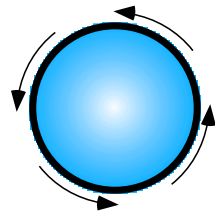
- Difusión gaseosa

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



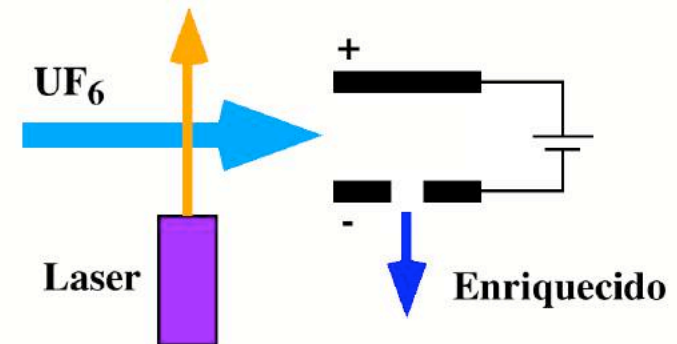
- Centrifugación

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



- Separación por láser

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



# Fabricación de elementos combustibles

## Enriquecimiento de Uranio ( ton SWU/año)

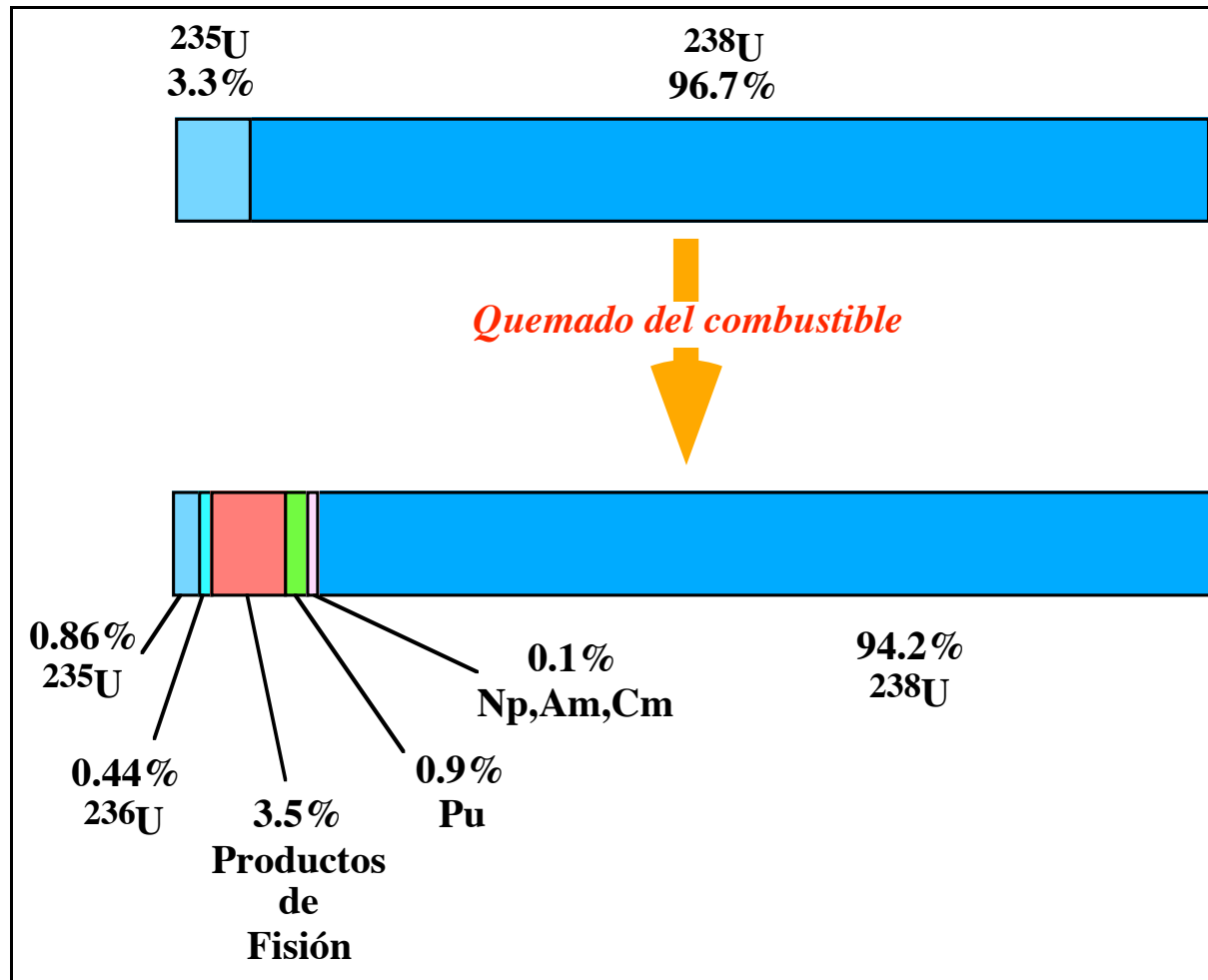
EURODIF (Francia, Italia, Bélgica, España)	difusión	10 800
URENCO (Reino Unido, Holanda, Alemania)	centrifuga	5 850
DOE (USA)	difusión	8 000
TECHNABEXPORT (Rusia)	centrifuga	20 000
China	centrifuga	1 300
Japón, Pakistán, Brasil, Sudáfrica		5

**El polvo de  $UF_6$  enriquecido se convierte en  $UO_2$   
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





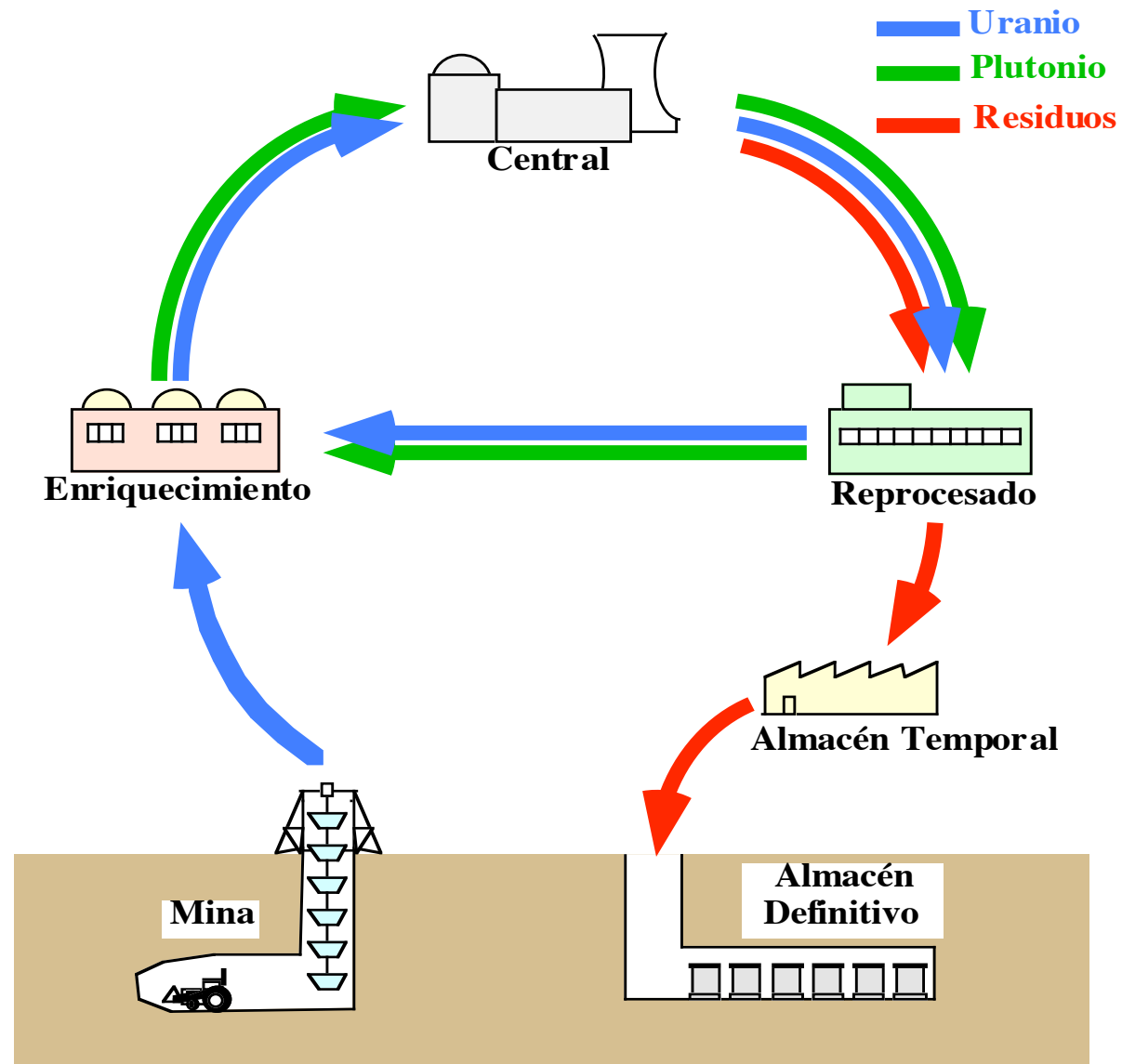
# Residuos y reprocesado

**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*



# El ciclo del combustible con reprocesado



# Residuos radiactivos

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

## **Minas y Fábricas de Concentrados de Uranio**

*1 m<sup>3</sup> por kg de U. Baja actividad y larga vida media*

## **Enriquecimiento y Fabricación de Elementos Combustibles**

*0.4 m<sup>3</sup> por Tm de Combustible. Baja actividad y larga vida media*

## **Centrales Nucleares**      *en una central de 1000 MW*

### **- Activación neutrónica y material contaminado**

*500 m<sup>3</sup> al año. Baja actividad, vida media corta*

### **- Combustible quemado**

*20 Tm al año, 0.5 m<sup>3</sup> por Tm. Alta actividad y vida media larga.*

## **Desmantelamiento de instalaciones**

*Una Central de 1000 MW al desmantelarla genera 250 m<sup>3</sup> de alta actividad, 2000 m<sup>3</sup> de actividad media y 15 000 m<sup>3</sup> de baja actividad*

**Además: los hospitales, centros de investigación,.. generan en un país como España 10 000 m<sup>3</sup> al año, de residuos de alta actividad y corta vida media.**

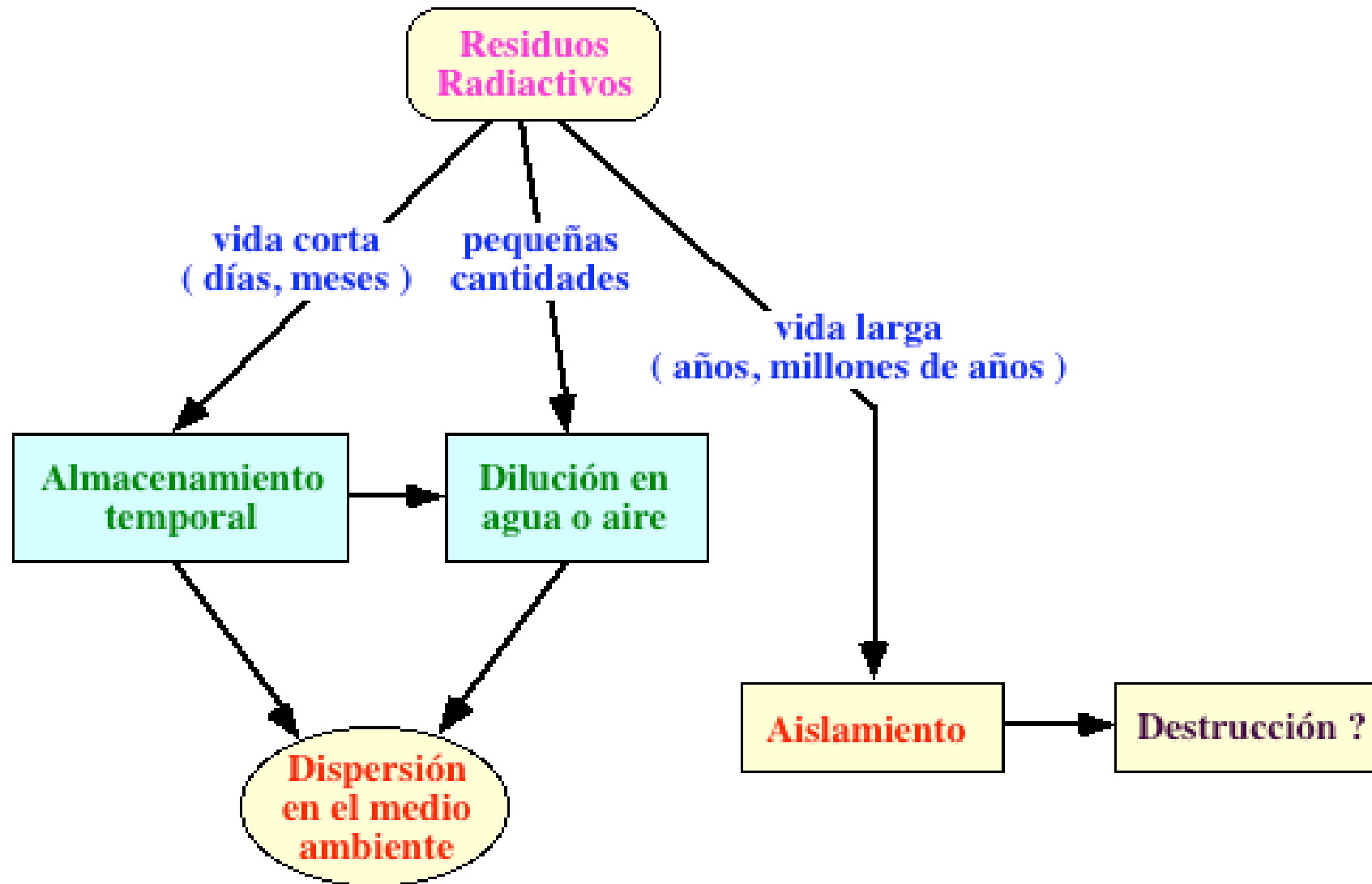
# Residuos radiactivos

*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 m<sup>3</sup> de Residuos de Baja Actividad  
9 000 m<sup>3</sup> de Residuos de Alta Actividad

**En el Mundo:** 30 000 millones de Tm de escoria de las minas  
10 millones m<sup>3</sup> de Residuos de Baja Actividad  
450 000 m<sup>3</sup> 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)

## \* Envío 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**

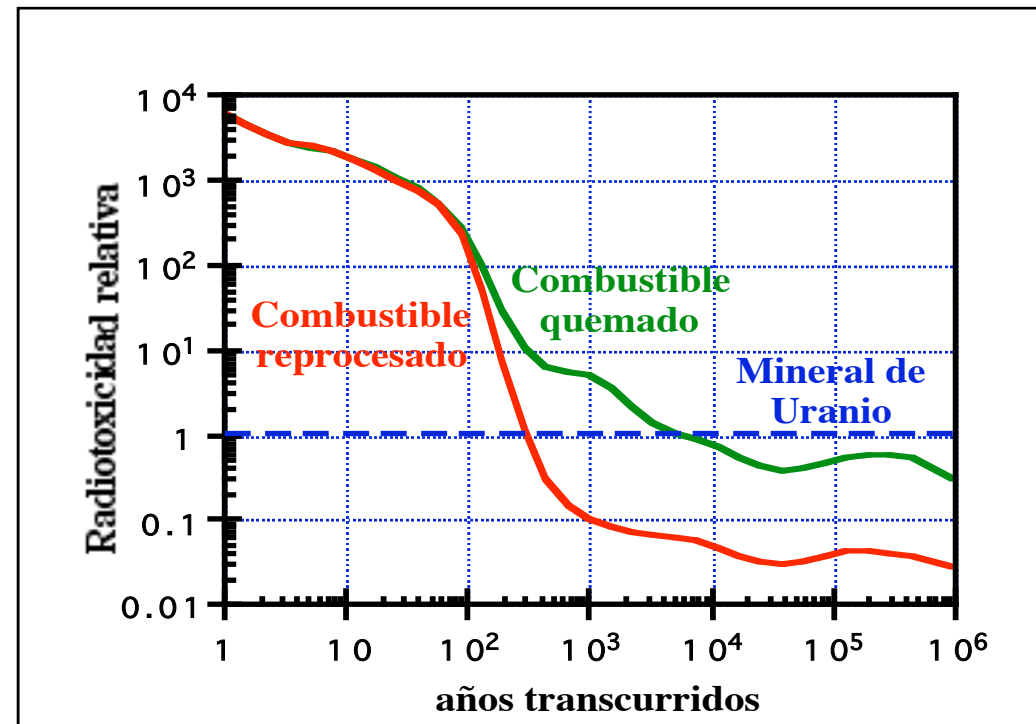
**Al nivel del mineral del Uranio natural:**

**-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 m<sup>2</sup> por contenedor

( España: 10 centrales x 30 años x 10 cont x 100 = 0.3 Km<sup>2</sup> , 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 Uranio

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

## Residuos acumulados de baja actividad

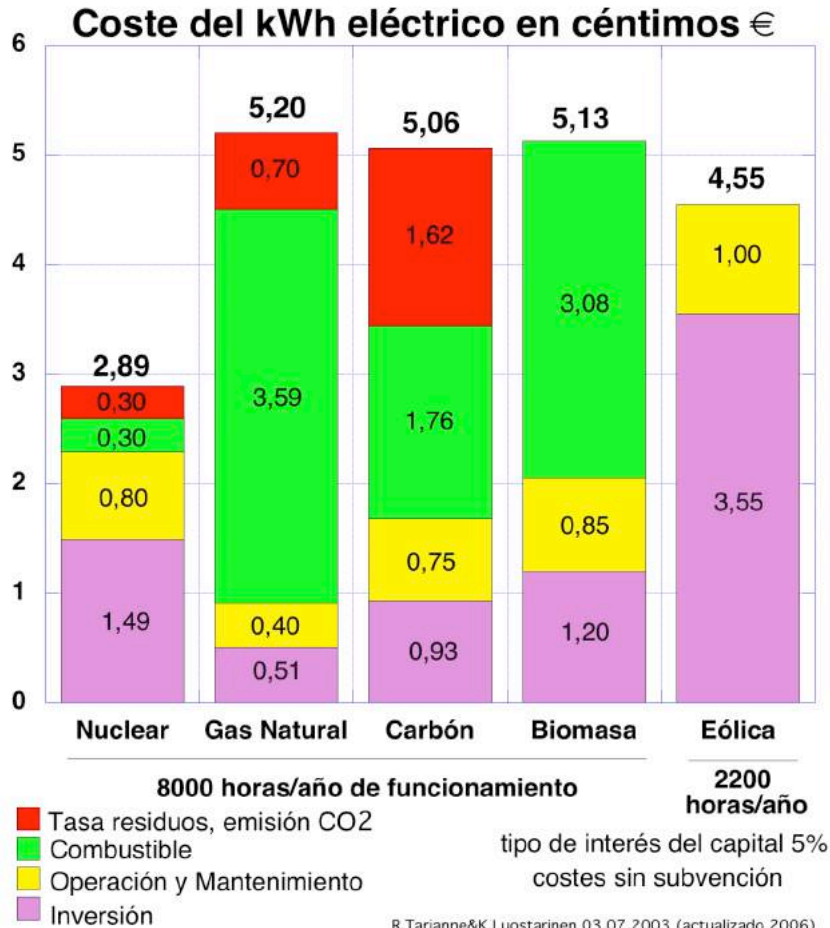
El Cabril 3 400 m<sup>3</sup>  
Centrales 16 700 m<sup>3</sup>

## 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*

<b>Carbón</b>	<b>1 500 años</b>
<b>Petróleo</b>	<b>60 años</b>
<b>Gas</b>	<b>120 años</b>
<b><math>^{235}\text{U}</math></b>	<b>100 años</b>
<b><math>^{239}\text{P}</math>-<math>^{238}\text{U}</math></b>	<b>6 000 años</b>
<b><math>^{233}\text{U}</math>-<math>^{232}\text{Th}</math></b>	<b>30 000 años</b>

# La Energía Nuclear y los Combustibles fósiles

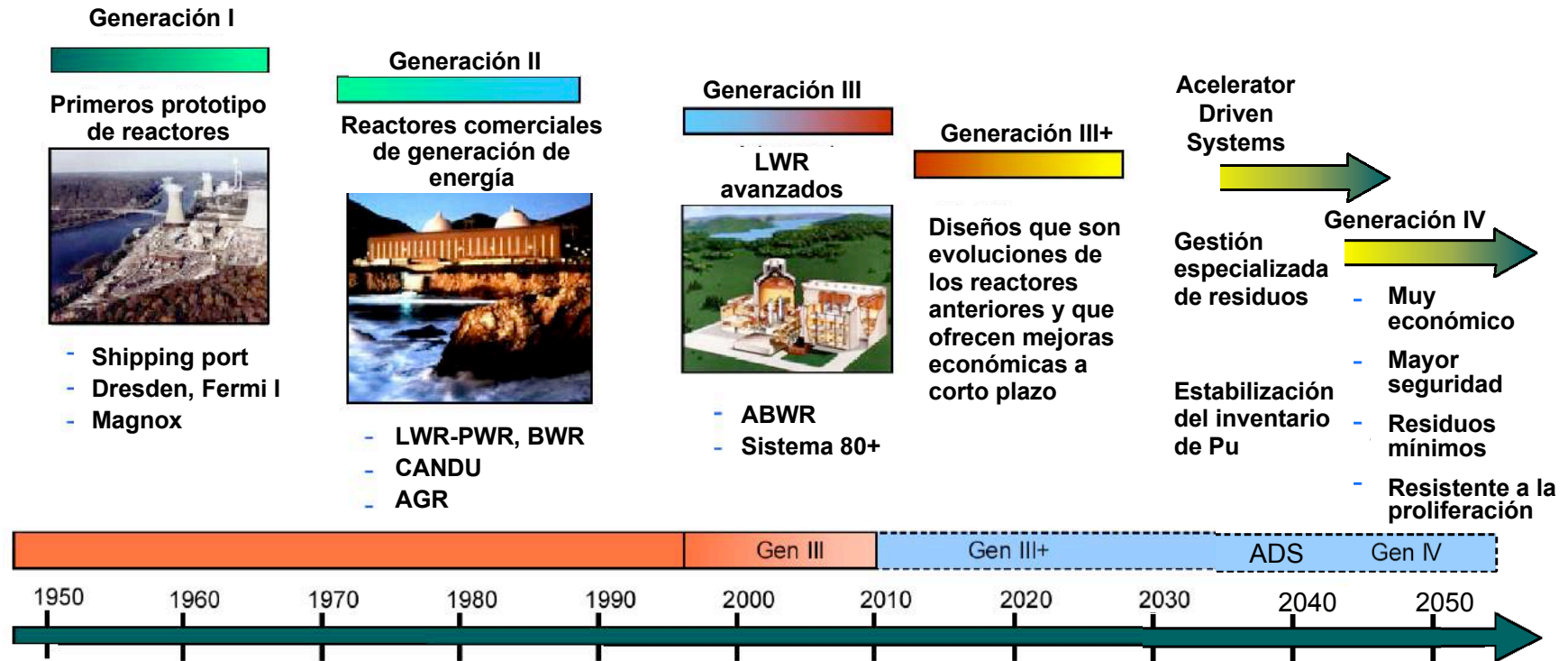
## Accidentes graves en países de la OECD 1969-1999:

	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 CO<sub>2</sub> 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.*

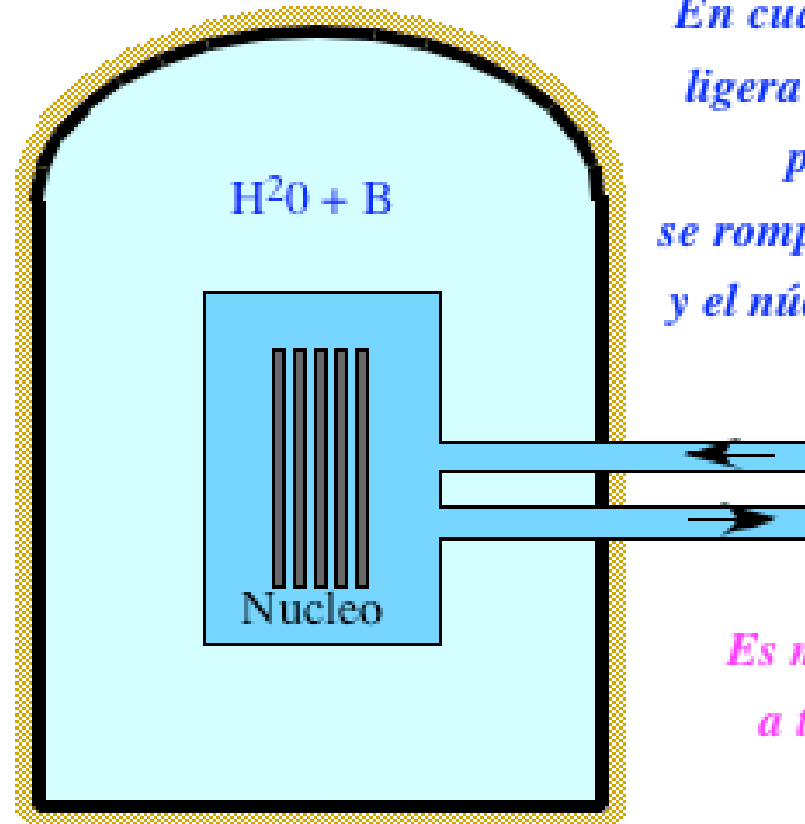
*Si falla uno, no tiene potencia suficiente para causar grandes daños*

## 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  $^{233}\text{U}$  -  $^{232}\text{Th}$  puede ser también  $^{239}\text{Pu}$  -  $^{238}\text{U}$

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

