

La química en la energía nuclear y en el tratamiento de los residuos radiactivos

Valentín González

22/09/2014

Máster Mina

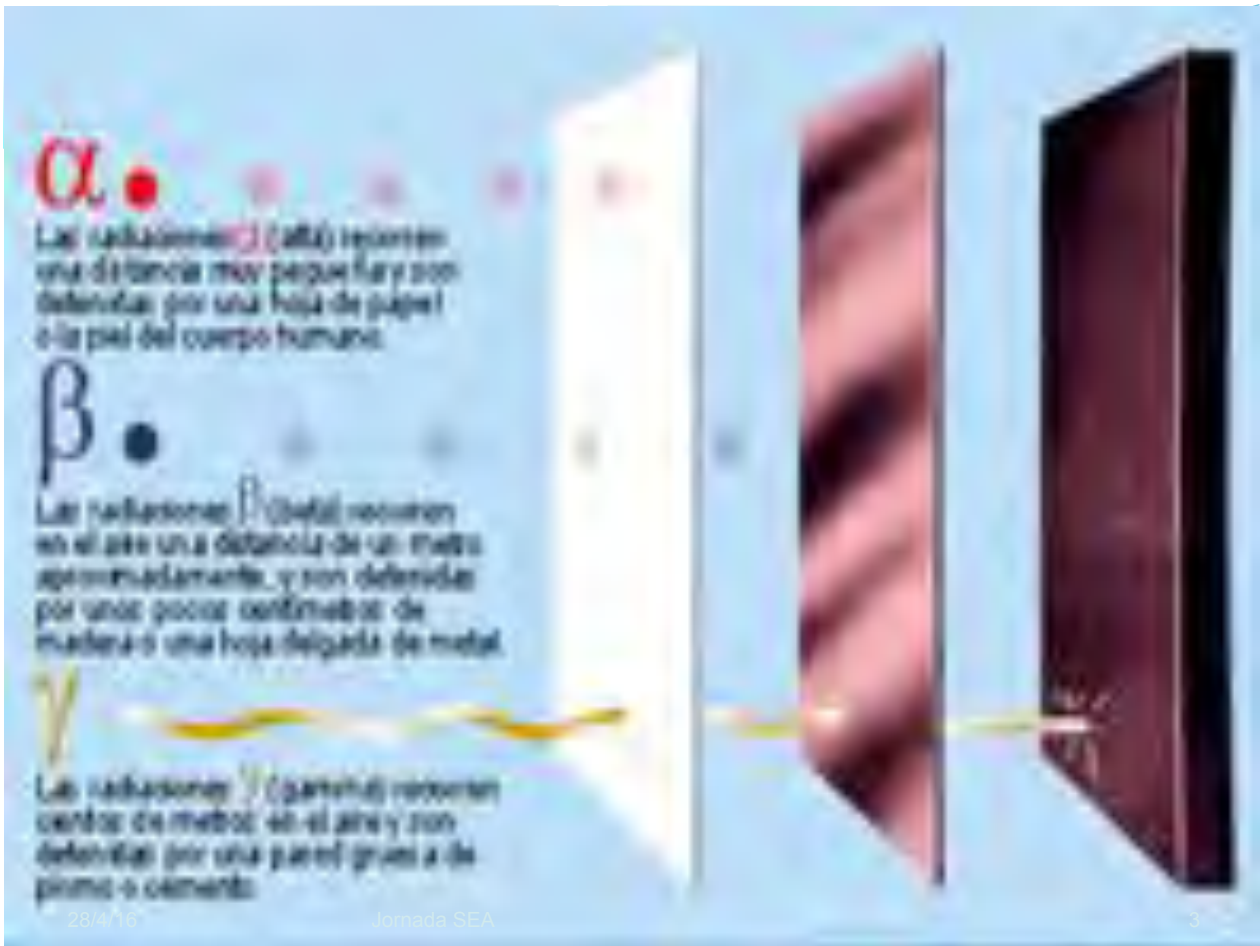
1



28/4/16

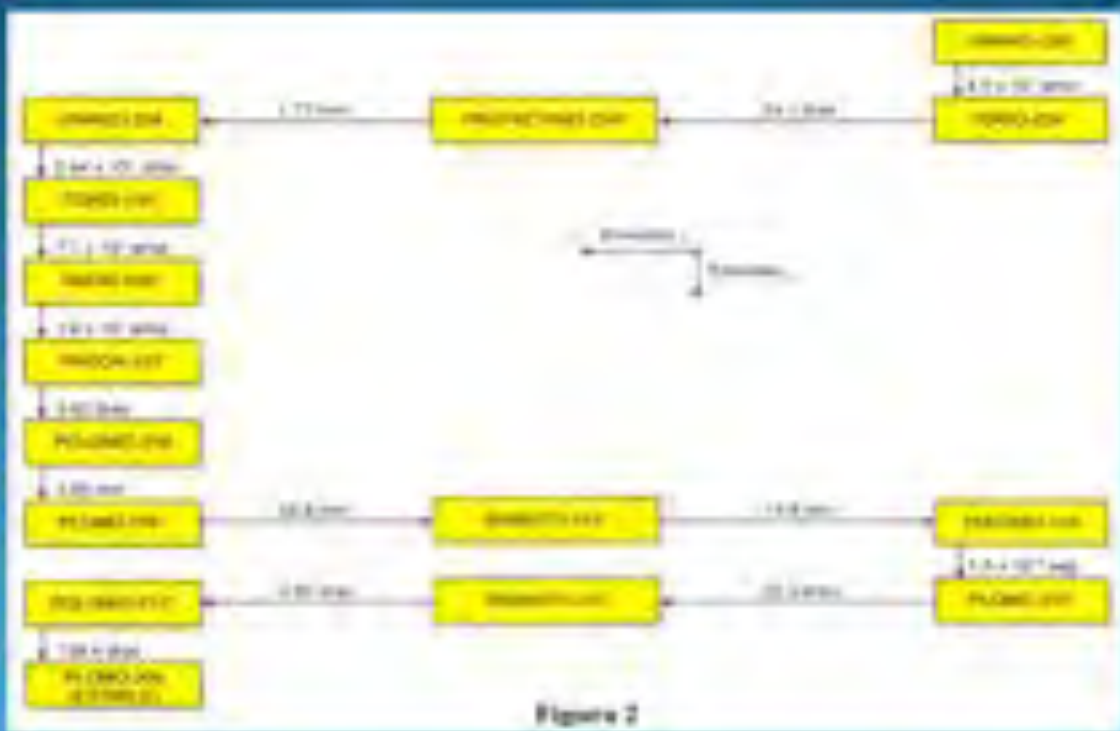
Jornada SEA

2



ELEMENTOS RADIOACTIVOS NATURALES

- **ELEMENTOS PRIMORDIALES:**
 - URANIO 238
 - URANIO 235
 - TORIO 232
 - NEPTUNIO 237
 - POTASIO 40
- **PRODUCTOS DE ACTIVACIÓN**
- **TRITIO**
- **CARBONO 14**
- **OXÍGENO 18**
- **ETC.**



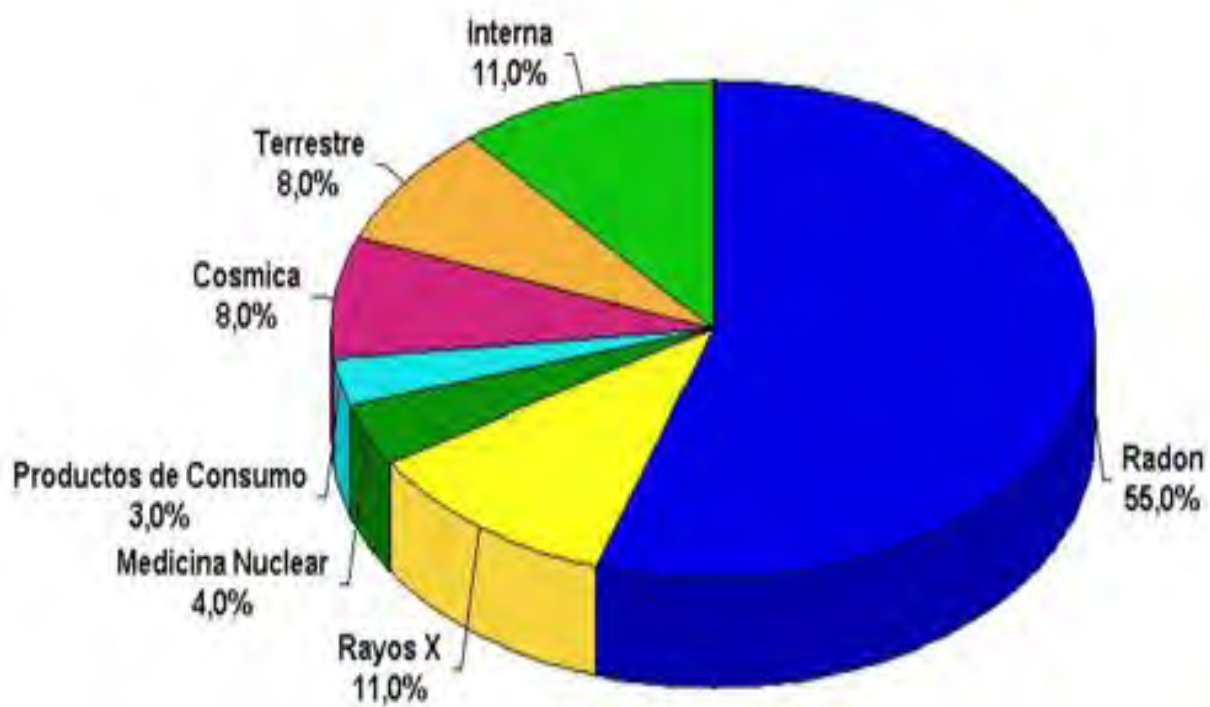


Figura 4



Uno de sus primeros usos de la radiactividad fue la terapia del cáncer de cerebro, una decisión acertada. El estudio de esta aplicación lo inició Marie Curie.

También se iniciaron aplicaciones sin una base científica; casi llegó a suponerse que la radiactividad era una especie de Bálsamo de Fierabras. Sobre esta idea se especulaba que sanaría enfermedades como artríticas, de corazón, hígado, tubo digestivo, riñones, pulmones, resfriados...



55 Ans (1911) ... ARTHRITISME ...

ARTHRITIKES Vous souffrez ! Vous n'avez pas le temps — Vous êtes loin des villes d'Europe, de l'Étranger aux Colonies — VOICI CHEZ VOUS, A PEU DE FRAIS, la Cure scientifiquement établie

Viveurs. Vivez mais... curez vous

LA CAUSE DE CES MAUX

ARTHRIISME

Vie Sédentaire
 Surmenage
 Excès de Table
 Intoxication
 Air Vicié

R
 TUBE DIGESTIF: Dyspepsie, Névrose, Constipation, Enterite...
 COEUR: Arteriosclérose, Vertiges, Phlébite, Artériosclérose...
 POINTE: Colique hépatique, Galactémie, Jaunissement...
 REINS: Congestion, Cystite, Catarrhe, Néphrite, Nématurie...
 POUIMONS: Asthme, Catarrhe, Emphysème...

LE REMÈDE SANS DANGER
UNE CURE de RADIO-OMNIASELS

GAZEL 1500 ANG
 Ampoule en RADIUM
 du Radium ÉMULSIONNÉ
 Brevet 1277461

Les Radio-Omniasels constituent la solution des vices névrotiques, et sont des Selles merveilleuses, introduisant l'activité, dissolvant, dissolvant des vices névrotiques et biliaires, dans la cure, par l'usage de ces selles merveilleuses, introduisant l'activité, dissolvant, dissolvant des vices névrotiques et biliaires, dans la cure, par l'usage de ces selles merveilleuses...

La Radio-Omniasels, par leur composition spéciale, remplissent merveilleusement, chez eux, dans toutes les maladies, les vices des vices névrotiques, catarrhaux et leur traitement approprié les divers vices névrotiques de vices névrotiques...

Le mode de l'usage des ampoules est le suivant: une ampoule par jour, avec une prise de selles...

Note: Les ampoules Radio-Omniasels sont fabriquées par la Pharmacie Française, 11, rue de Valenciennes, Paris...

La Radio-Omniasels, par leur composition spéciale, remplissent merveilleusement, chez eux, dans toutes les maladies, les vices des vices névrotiques, catarrhaux et leur traitement approprié les divers vices névrotiques de vices névrotiques...

L'usage des ampoules est le suivant: une ampoule par jour, avec une prise de selles...

Adresse: Pharmacie Française, 11, rue de Valenciennes, Paris...

28/4/16

Jornada SEA

11

52 stellen sich vor ger

Ich bin die radioaktive Substanz - Meine Strahlen massieren das Zahnfleisch - Gesundes Zahnfleisch - gesunde Zähne
 Ich bin die medizinische Seife - mein Schaum reinigt die ganze Mundhöhle bis in alle Winkel
 Ich - der Emulgator - Sorge dafür, daß „DORAMAD“ immer sähnig und frisch bleibt!
 Ich bin das Aroma - durch mich erfrischt „DORAMAD“ köstlich die gesamte Mundhöhle!
 Ich - der ganz feine Putzkörper - mache die Zähne blendend weiß, schone den Schmelz!

Das ist die radioaktive und deshalb wirksame

Doramad
 Radioaktive Zahncreme

KLEINE TUBE 45g
 GROSSE TUBE 75g

EIN ERZEUGNIS DER
 AUERGESSELLSCHAFT A.G. BERLIN N. 65

28/4/16

Fig. 5: Auer's 'radioactive' toothpaste—with special thorium ingredient

12



28/4/16

Jornada SEA

Figura 6

13

En los años 1950-1960, comenzaron a normalizarse estas aplicaciones, de forma paralela al desarrollo de una nueva disciplina de excepcional importancia para el uso de las radiaciones, que es la protección radiológica. A pesar del mayor conocimiento se continuaron importando, de forma incontrolada, agujas de radio para la terapia del cáncer y suspensiones de sulfato de radio-226 para su uso en esferas de relojes fluorescentes.

Se inició el uso de fuentes de Cs-137 y Co-60 para la terapia de tumores cancerosos.

También se comenzó a utilizar radisótopos para diagnosis médica como, por ejemplo, el tecnecio-99, que se usa en el 80% de las aplicaciones médicas, así como el tritio y el carbono-14 tanto en diagnosis como en desarrollo de fármacos.

Hoy día se tiende a no utilizar radisótopos, tanto en terapia como en diagnóstico, siendo sustituidos por aceleradores de positrones y por la diagnosis por imagen PET (Positron Emision Tomography) y continua utilizándose el TAC (Tomografía Axial Computarizada) mediante rayos X y algoritmos matemáticos.



Enrico Fermi y la pila atómica

Lise Meitner

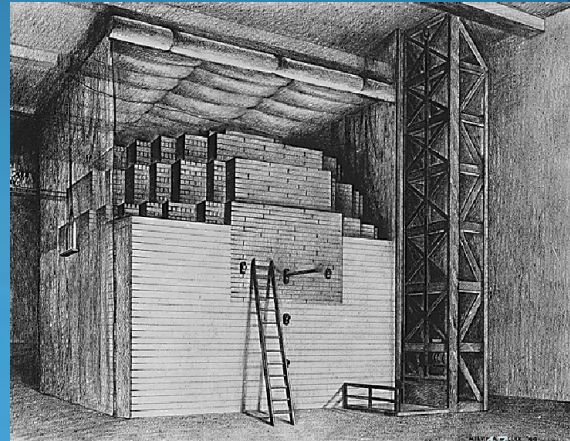


Otto Hahn

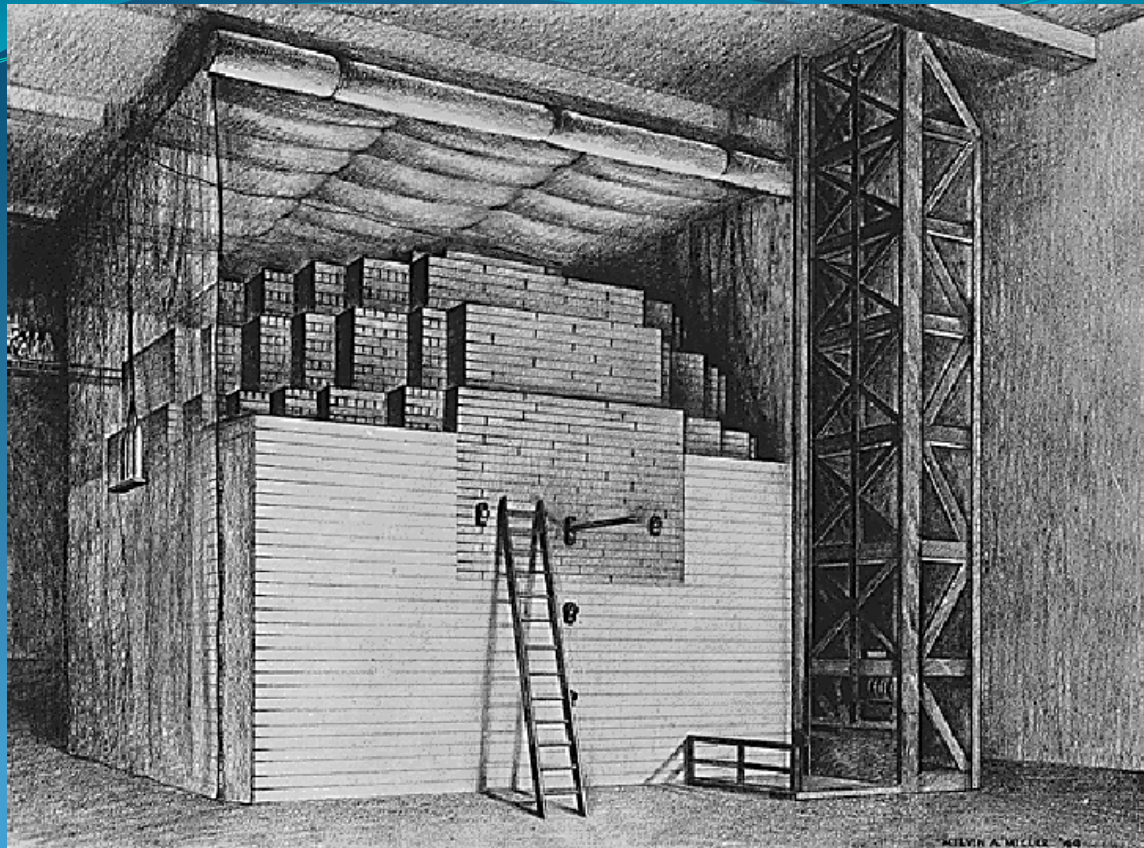


28/4/16

Jornada SEA



17



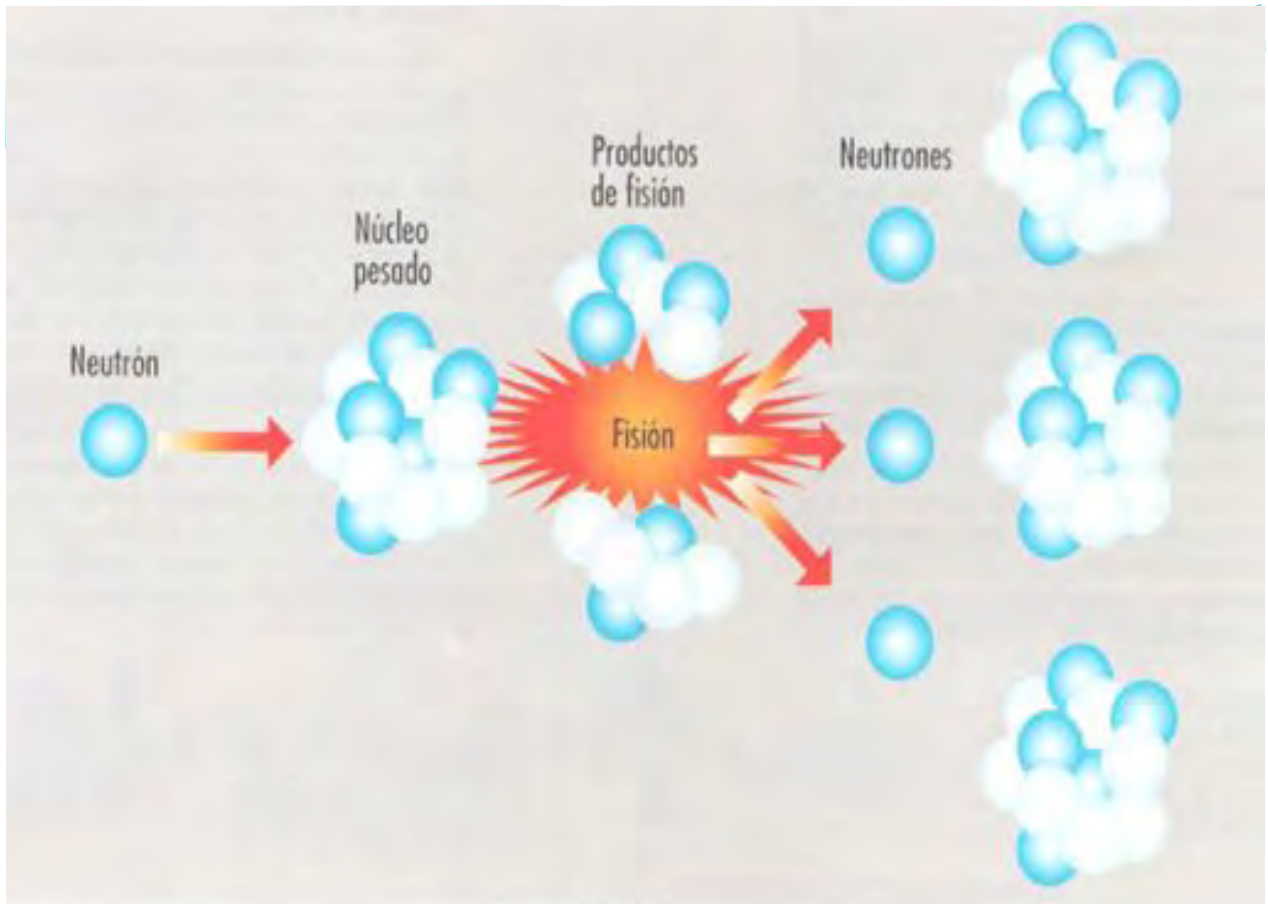
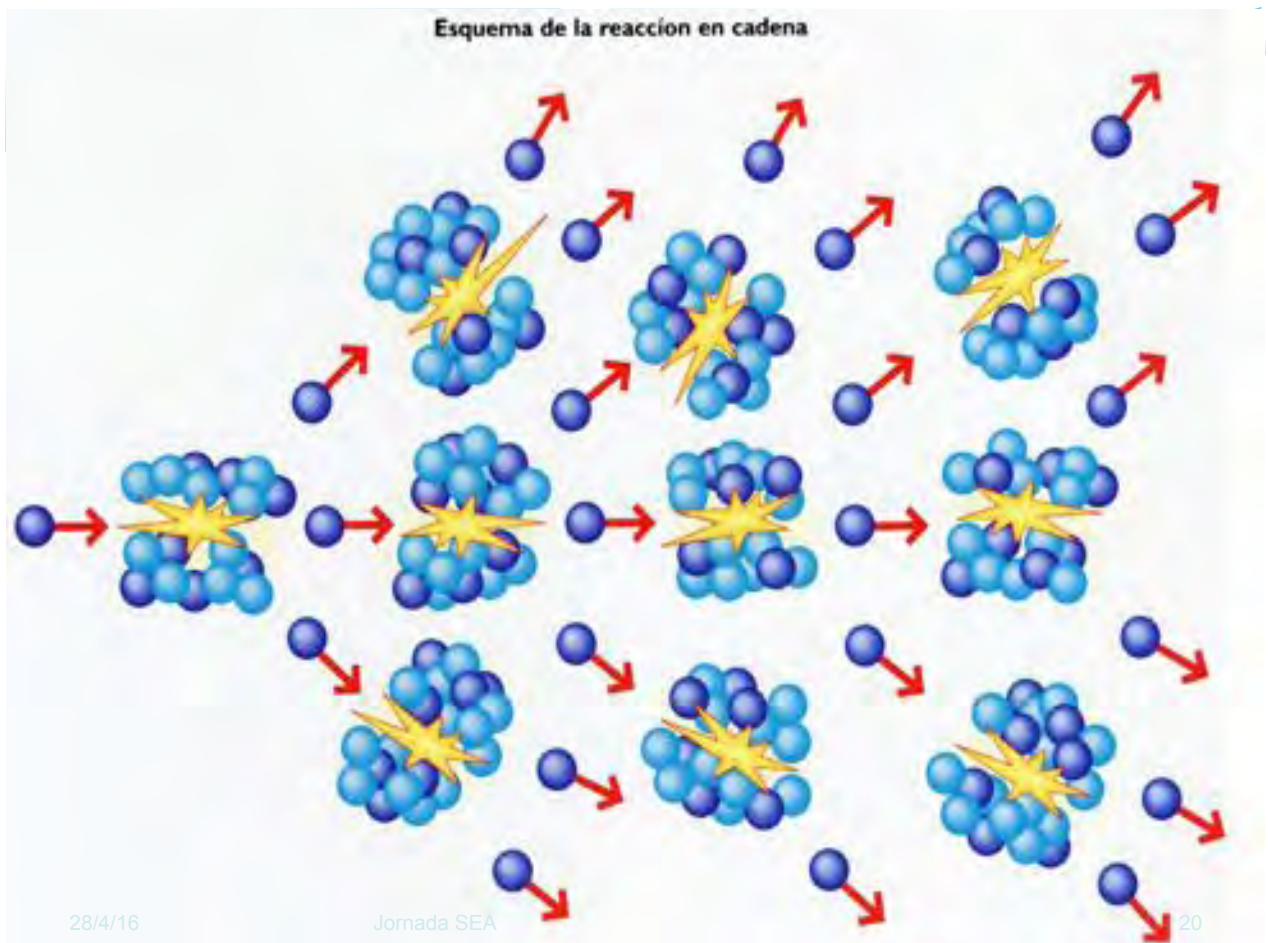


Figura 7





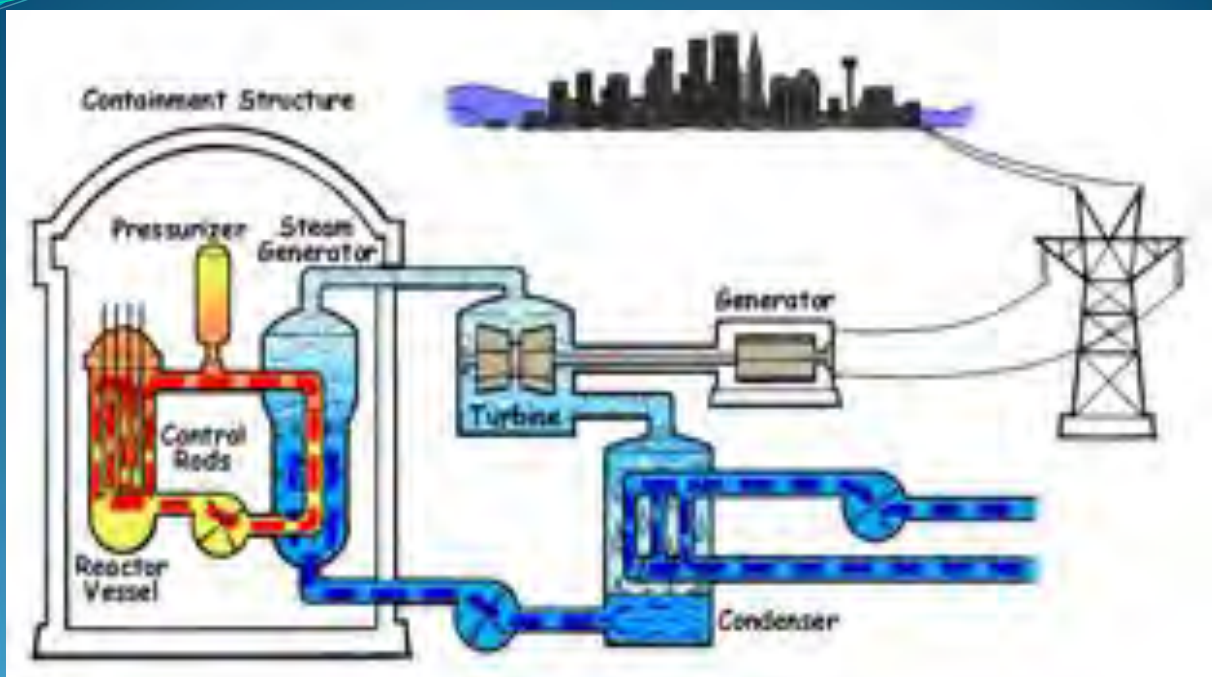
El proyecto Manhattan

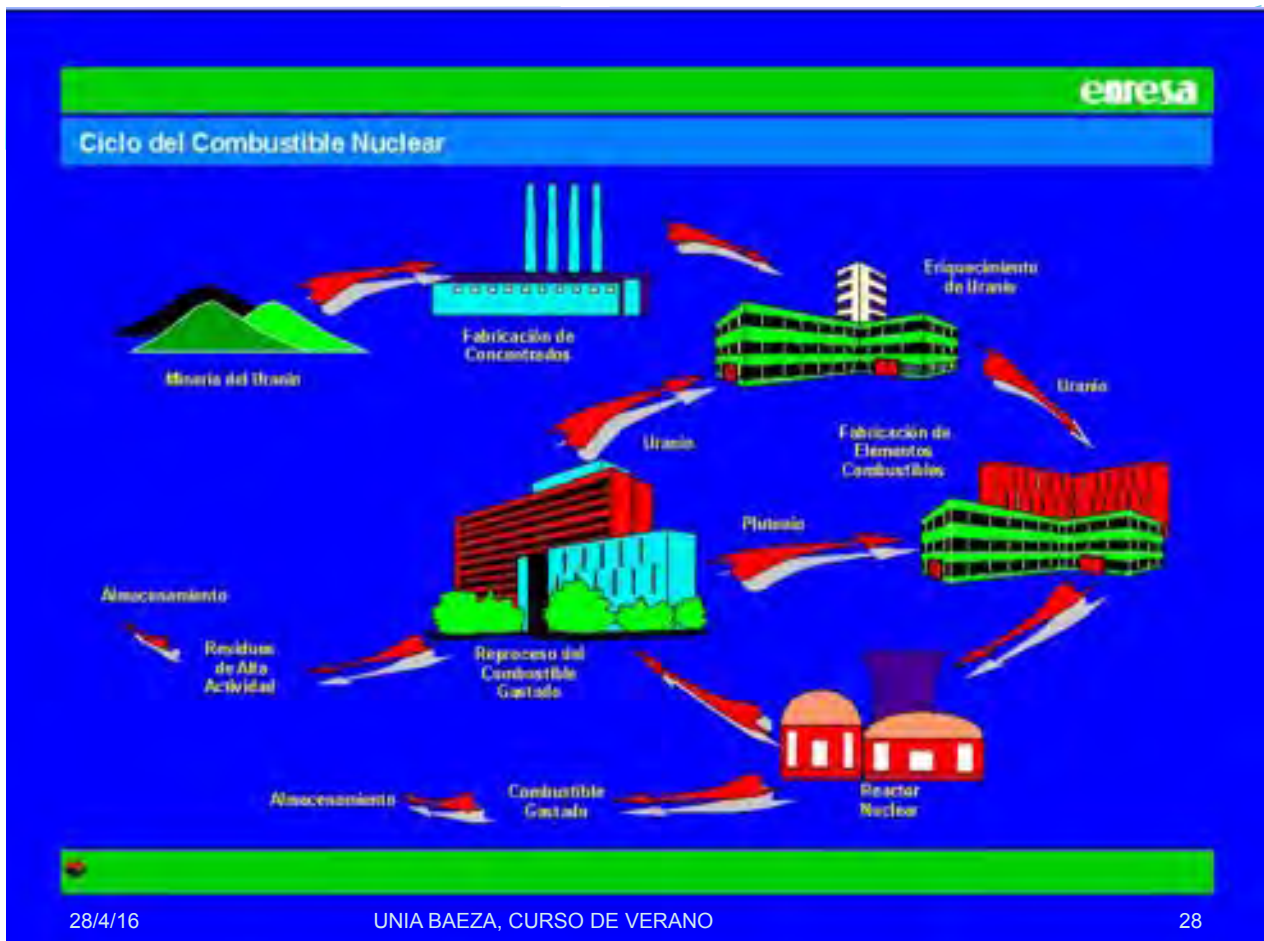
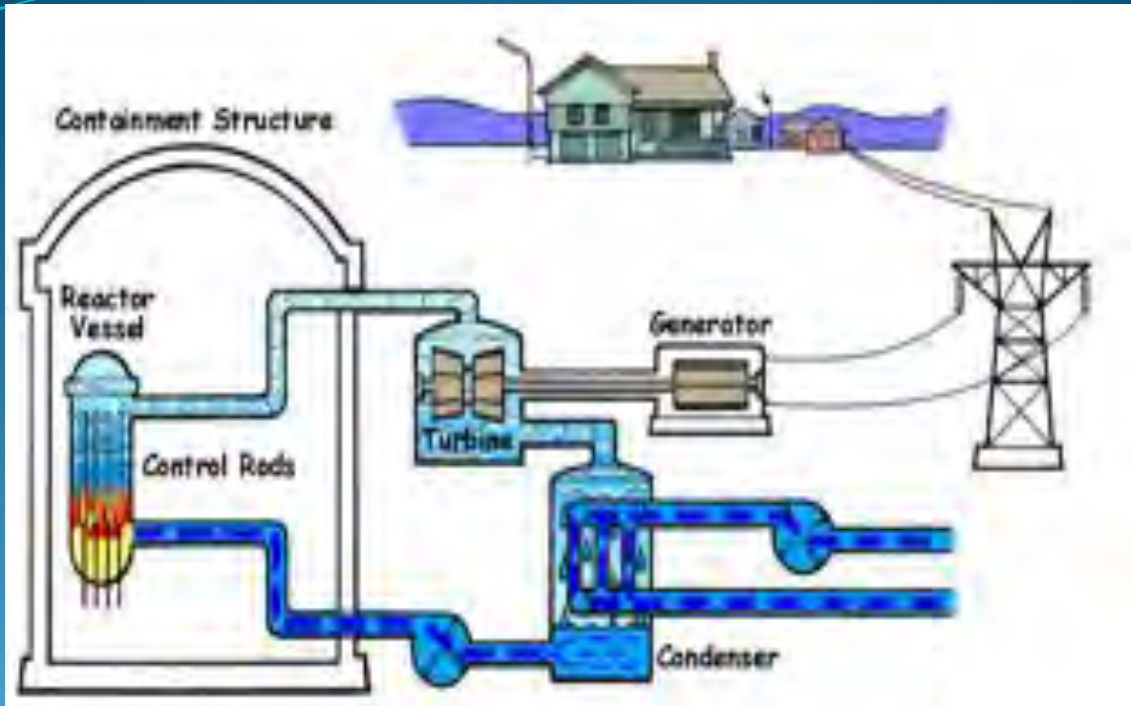


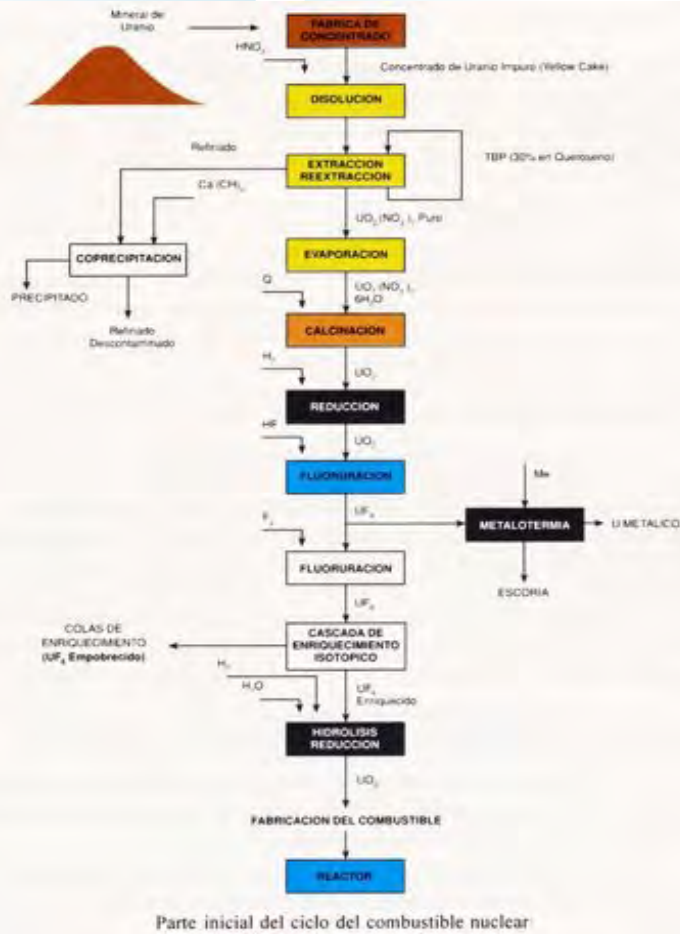


TIPOS DE REACTORES

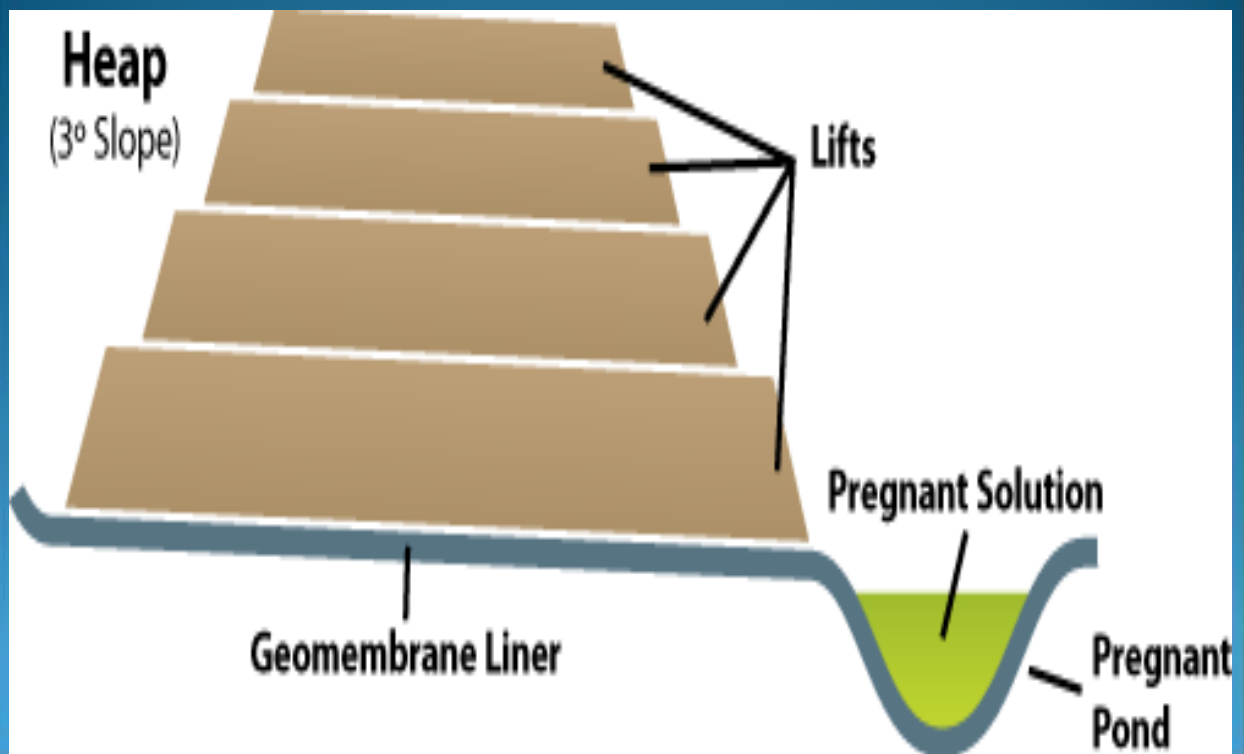
- HOMOGENEOS Y HETEROGENEOS
 - ENTRE LOS HETEROGENEOS:
AGUA LIGERA Y PESADA (PRESIÓN Y EBULLICIÓN, CANDU), GRAFITO-GAS
- TIPO DE COMBUSTIBLE:
URANIO METÁLICO, ÓXIDO DE URANIO, ÓXIDO DE PLUTONIO, CARBURO DE URANIO, ÓXIDO DE TORIO, ÓXIDOS MIXTOS, UO_2-PuO_2 .
- REFRIGERANTES: AGUA -LIGERA Y PESADA-, GASES - DIÓXIDO DE CARBÓNO, HELIO-, FLUIDOS ORGÁNICOS O INORGÁNICOS-Na-, ETC.)
- ENRIQUECIMIENTO DEL COMBUSTIBLE: SIN ENRIQUECER, LIGERAMENTE ENRIQUECIDO Y ALTO ENRIQUECIMIENTO







TOP LEACHING



CONCENTRADO DE URANIO

(Yellow cake, $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$, $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$)



31

NITRATO DE URANILO HEXAHIDRATO,

$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$



28/4/16

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

32

TRIÓXIDO DE URANIO, UO_3



28/4/1

33

DIÓXIDO DE URANIO, UO_2



TETRAFLUORURO DE URANIO, UF_4



28/4/16

35

SITUACIÓN MUNDIAL

- EXISTEN 440 REACTORES NUCLEARES EN OPERACIÓN, QUE PRODUCEN EL 15-17 % DE LA ELÉCTRICIDAD CONSUMIDA EN EL MUNDO Y 70 REACTORES EN CONSTRUCCIÓN.
- ESTADOS UNIDOS TIENE EL MAYOR NÚMERO DE CENTRALES EN OPERACIÓN, 110, SEGUIDA DE FRANCIA, CON 59, ETC.

28/4/16

UNIA, Baeza, curso de verano

36

Energía nuclear

La electricidad se genera por primera vez por un reactor nuclear el 20 de diciembre de 1951, en el EBR-I, cerca de la estación experimental de Arco, Idaho, que inicialmente produjo cerca de 100 kW (el reactor de Arco fue también el primero en experimentar fusión parcial, en 1955).



37

Energía nuclear

La primera planta de energía nuclear en Rusia y la primera en el mundo en producir electricidad, fue el reactor Obninsk 5MWe, en 1954.



Panel de control de la planta nuclear Obninsk. Foto: Ilya Varlamov



Reactor AM-1 fue cerrado 2002. Foto: Alexander Belenky / BFM.ru

38

- **Inicio del uso de la energía nuclear: se utilizaba el ciclo del combustible, con reciclado.**

- **1977, INFCE, International Nuclear Fuel Cycle Evaluation.**

Guerra fría: EEUU y otros países optan por el ciclo abierto.

Francia, Rusia, Japón, Bélgica, Suiza Reino Unido... siguen con ciclo cerrado

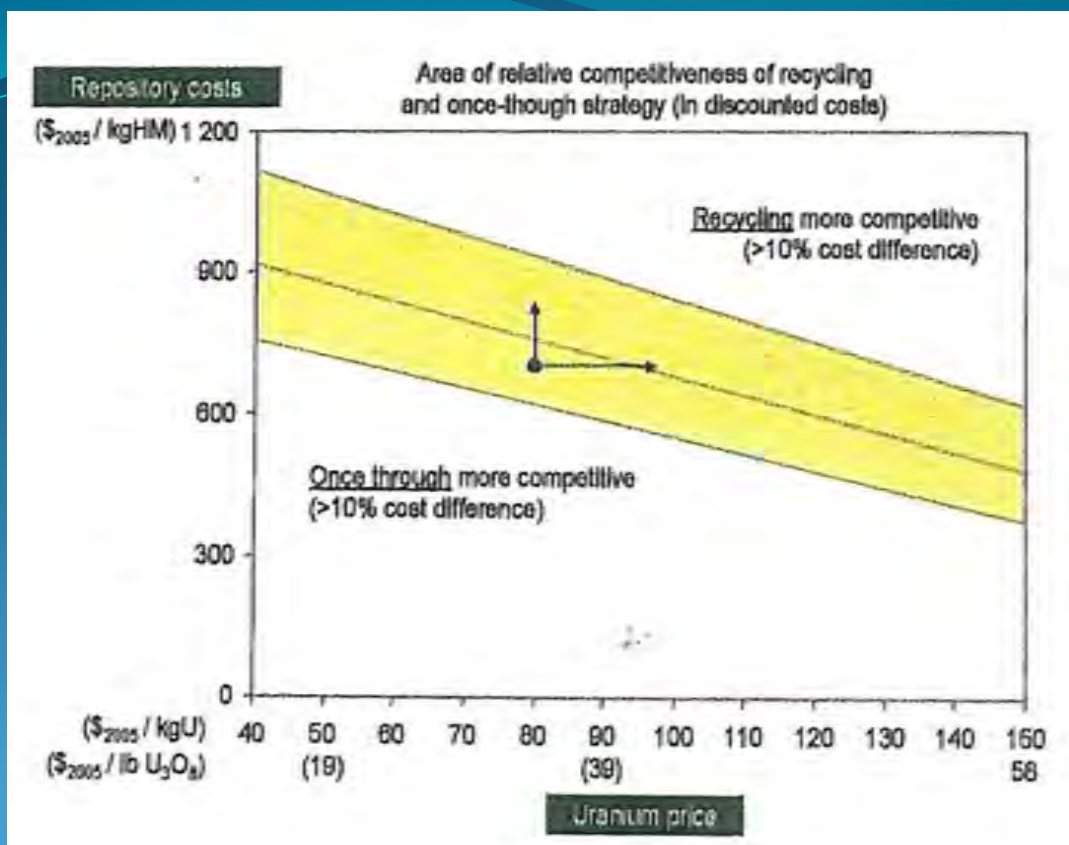


Argumentos de los partidarios del ciclo abierto en 1977:

- Preocupación por el riesgo de proliferación,
- al recuperar el Plutonio del combustible usado
- Costes demasiado elevados del reproceso-reciclado

La experiencia y el I+D en reproceso ha modificado drásticamente la situación:

- Disminución del coste, hoy análogo al coste del almacenamiento directo
- Mayor conocimiento, lo que permite estrategias de gestión de combustible avanzadas
- Clarificación de algunos puntos, como el multireciclado del Plutonio



EL RESULTADO DE LAS MATERIAS PRIMAS ENERGÉTICAS UTILIZADAS

- La fisión del Uranio produce 200 MeV de energía por átomo fisionado ($e=mc^2$).
- La combustión del Carbono produce 4 eV por átomo de C quemado a CO_2
- (1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J)
- La generación de residuos está en razón directa a la materia prima consumida, es decir, 50 millones de veces menos por átomo o 2,5 millones de veces menos en términos de masa.

Residuos Radiactivos

DEFINICION

- ✓ RESIDUO RADIATIVO ES CUALQUIER MATERIAL O PRODUCTO DE DESECHO, PARA EL CUAL NO ESTA PREVISTO NINGUN USO, QUE CONTIENE O ESTA CONTAMINADO CON RADIONUCLEIDOS EN CONCENTRACIONES O NIVELES DE ACTIVIDAD SUPERIORES A LOS ESTABLECIDOS POR EL MIE, PREVIO INFORME DEL CSN.

CRITERIOS DE CLASIFICACION

RESIDUOS DE BAJA Y MEDIA ACTIVIDAD

- VIDA CORTA O MUY CORTA: MENOR DE 30 AÑOS
- TIPO RADIACION EMITIDA : BETA / GAMMA
- NO EMISORES DE CALOR

RESIDUOS DE ALTA ACTIVIDAD

- VIDA MUY LARGA : HASTA MILLONES DE AÑOS
- TIPO RADIACION EMITIDA : BETA / GAMMA / ALFA
- FUERTES EMISORES DE CALOR

"CONJUNTO DE ACTIVIDADES TECNICAS Y ADMINISTRATIVAS CUYO OBJETO FINAL ES LA INMOVILIZACION DE LOS RESIDUOS RADIOACTIVOS Y SU AISLAMIENTO DEL ENTORNO HUMANO, GARANTIZANDO QUE NO SUPONGAN RIESGO RADIOLOGICO INDEBIDO PARA LAS PERSONAS NI PARA EL MEDIO-AMBIENTE"

Figura 4. Residuos radiactivos a gestionar en España

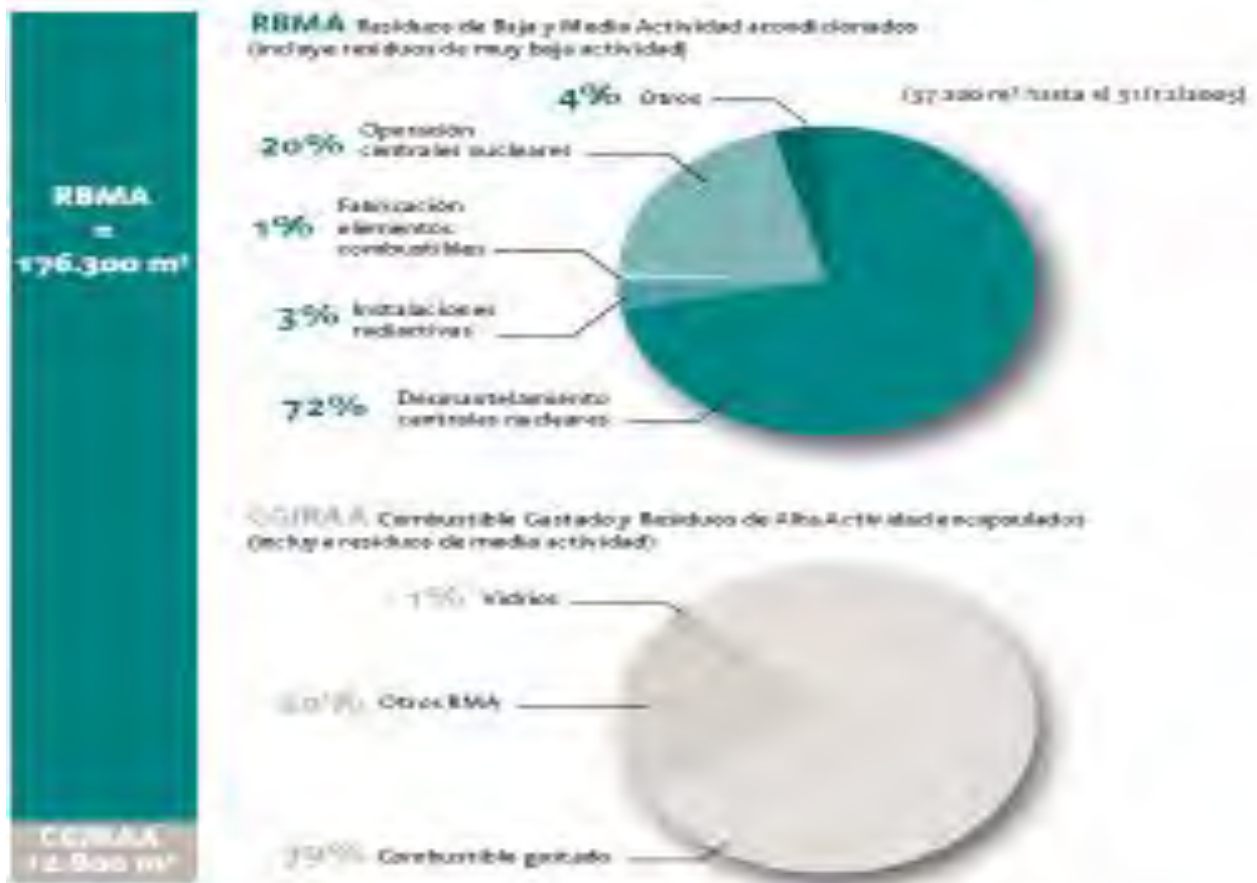
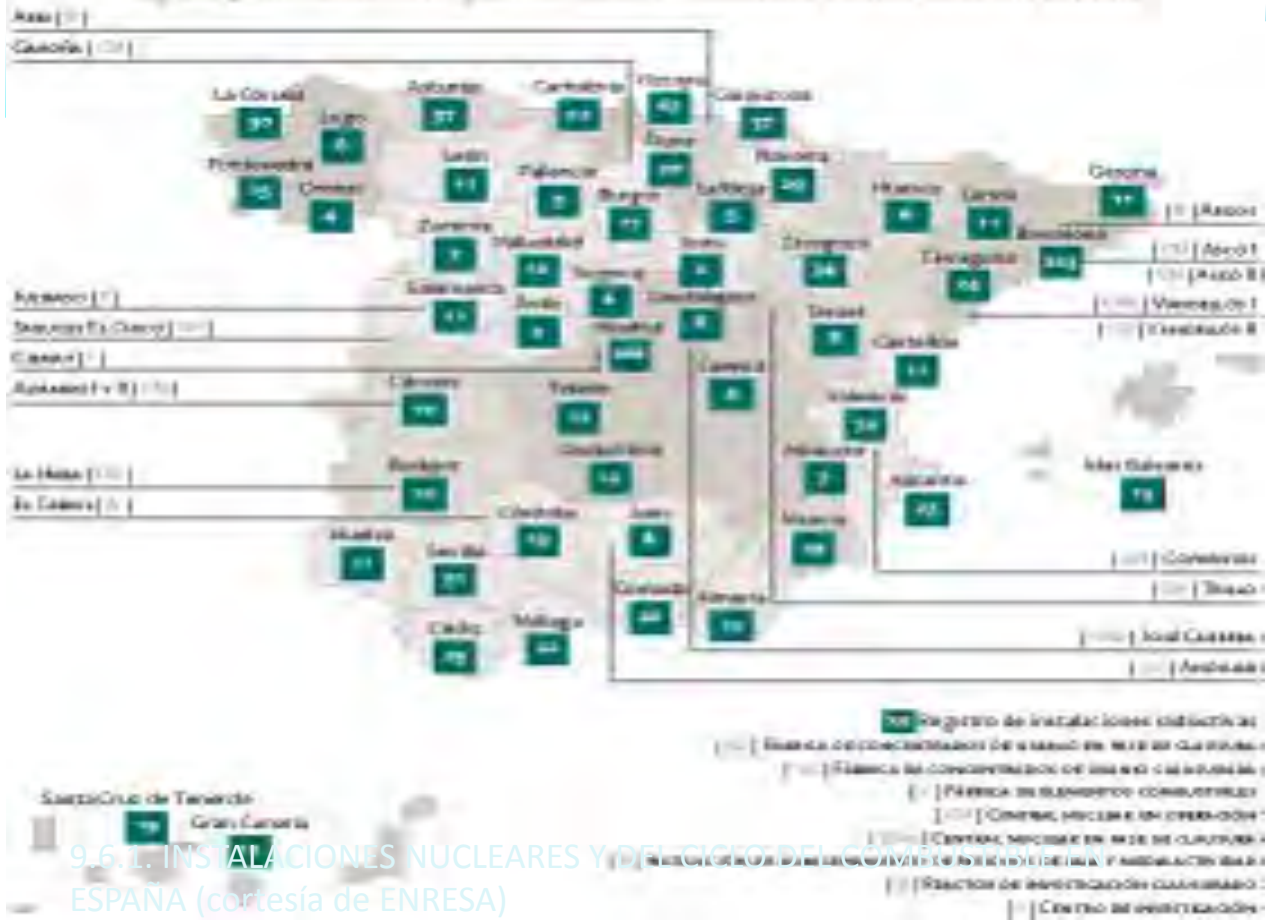


Figura 9- Instalaciones nucleares y del ciclo del combustible en España



9.6.1. INSTALACIONES NUCLEARES Y DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE EN ESPAÑA (cortesía de ENRESA)



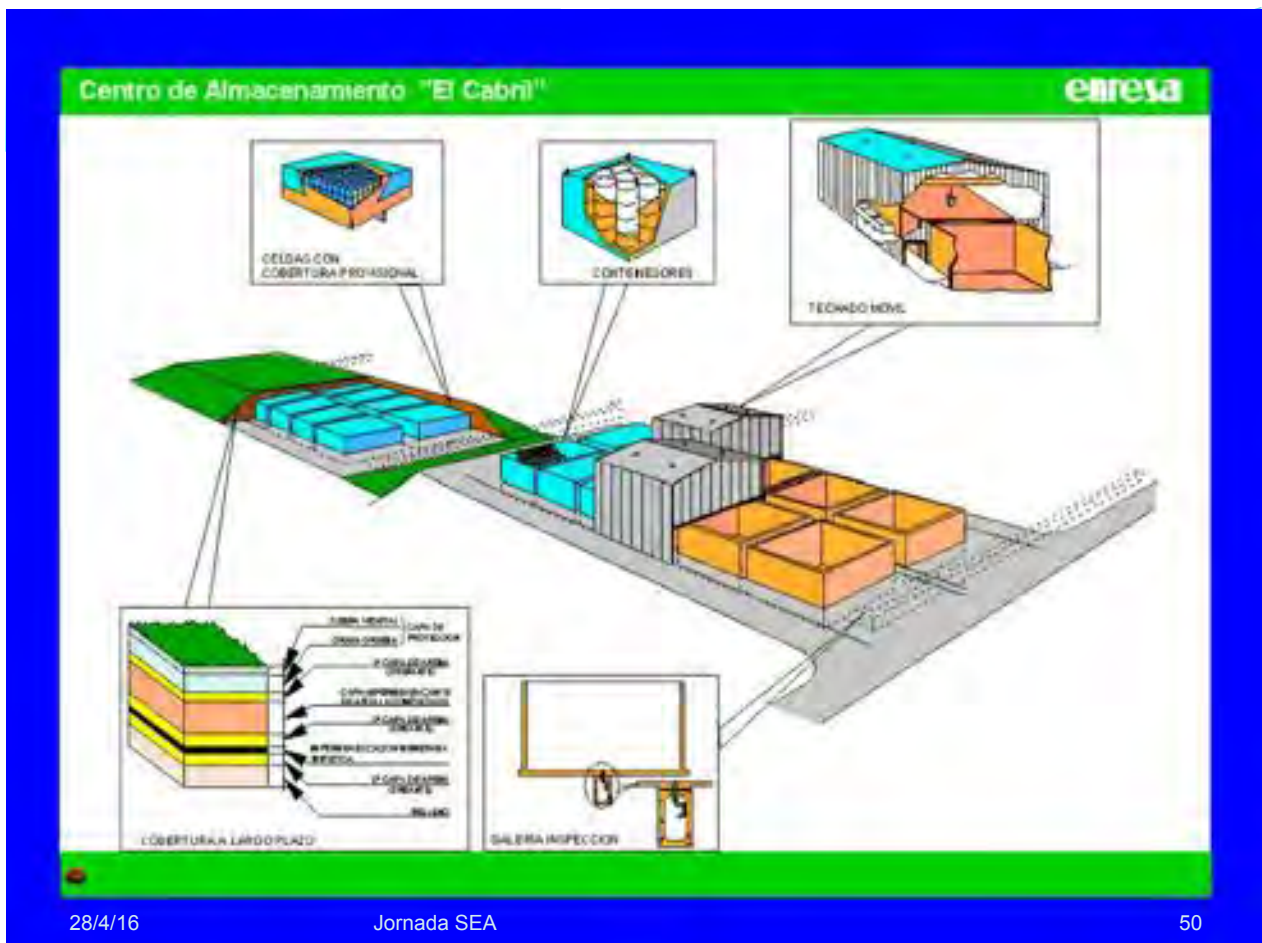
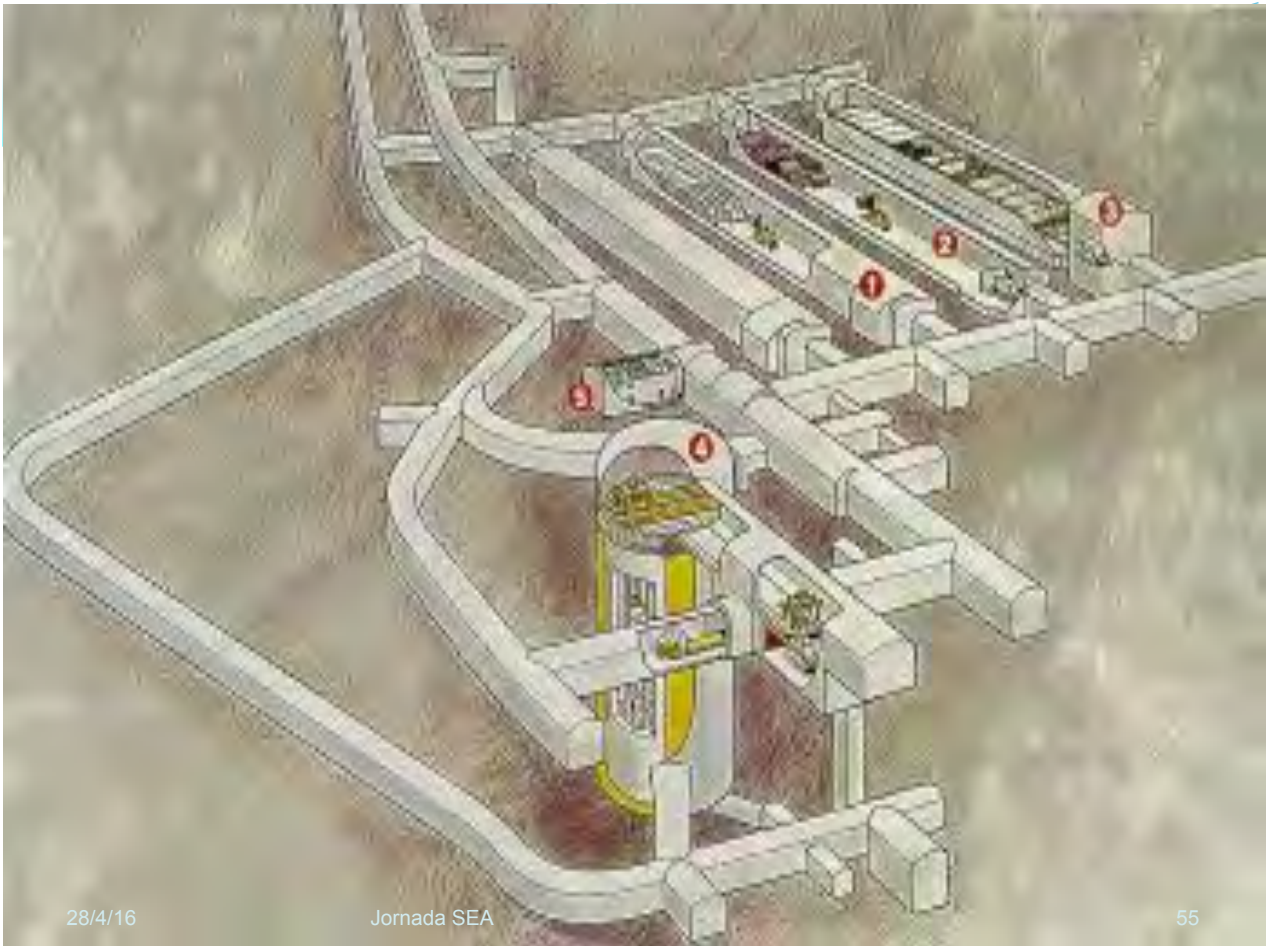






Figure 5-12: Aerial view of Urigg Low-Level Waste Site showing freight containers stacked in Vault 8





28/4/16

Jornada SEA

55

Figure 5-5: Handling of LLW drums in Morsleben Repository



28/4/16

Jornada SEA

56

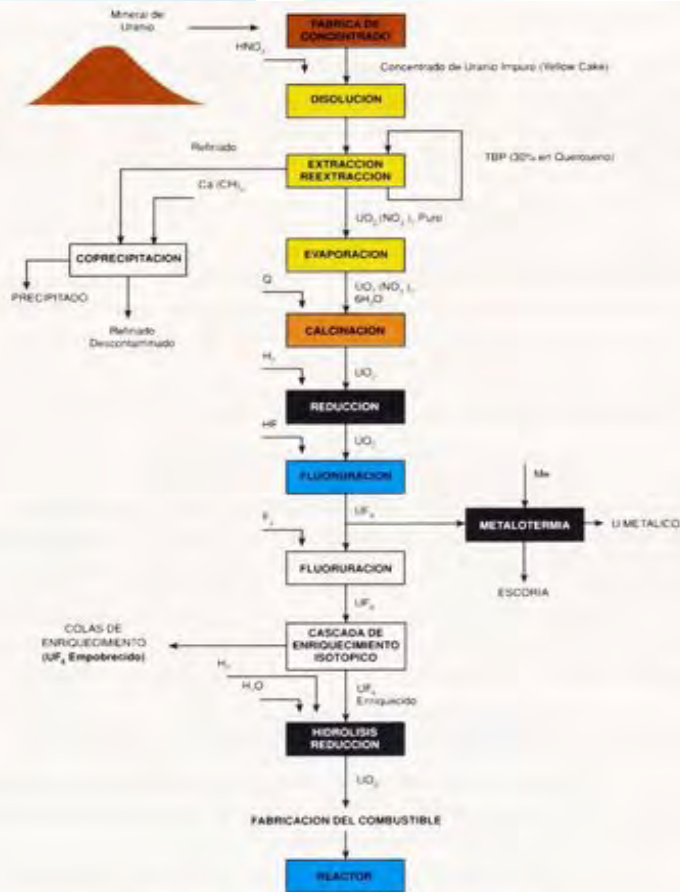


KONRAD (ALEMANIA)

La Gestión de los Residuos Radiactivos en la Unión Europea

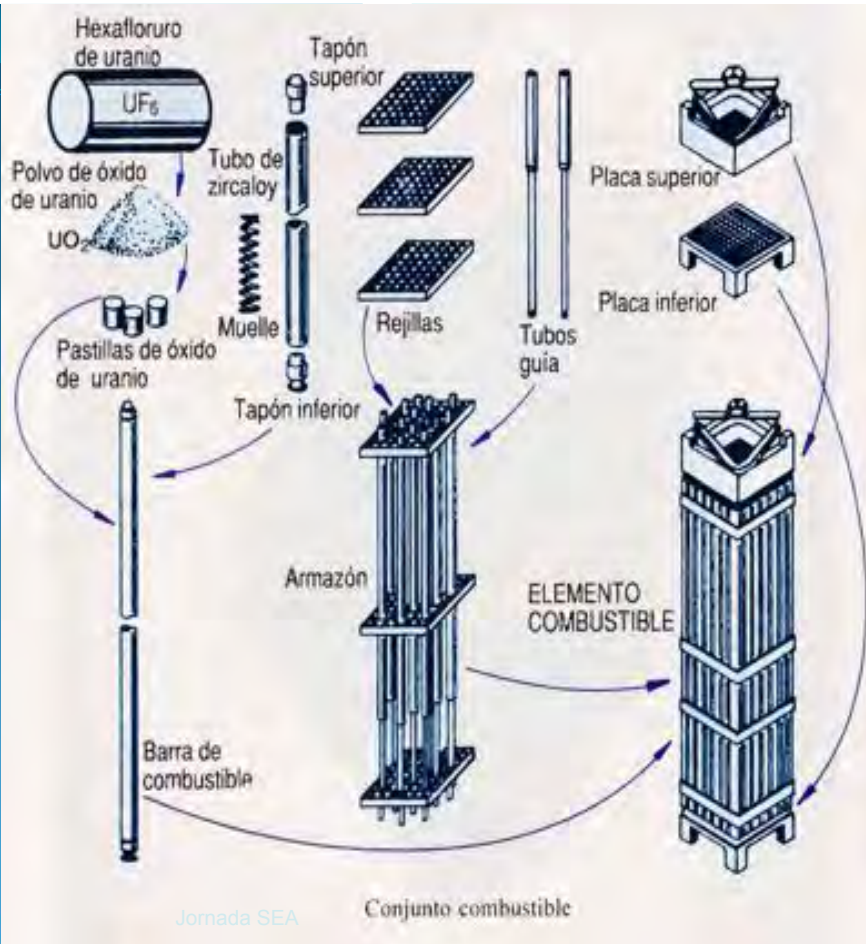
Almacenamiento Definitivo de RBMA: ROKKASHO MURA (JAPON)





Parte inicial del ciclo del combustible nuclear







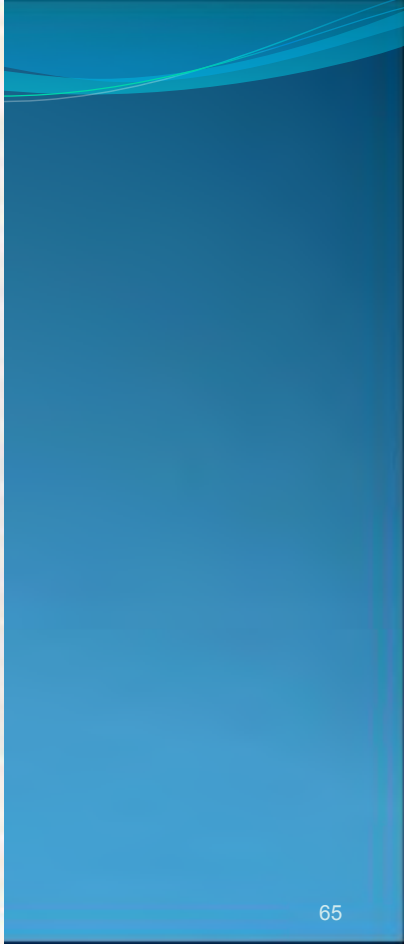
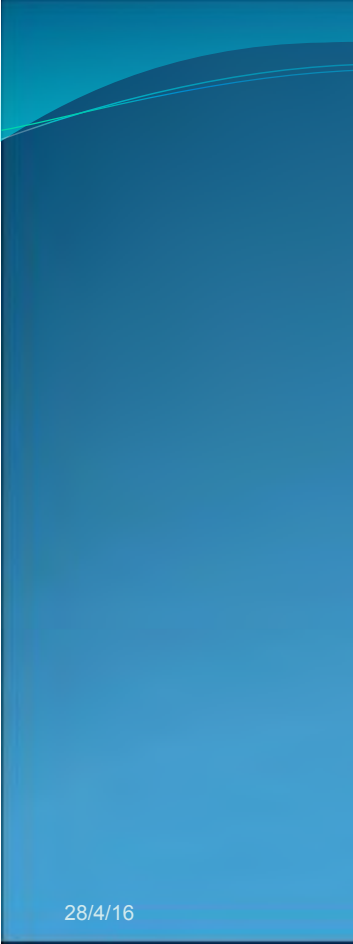
28/4/16

Jornada SEA

63



64



28/4/16

Jornada SEA
Contenedor de almacenamiento de combustible en seco

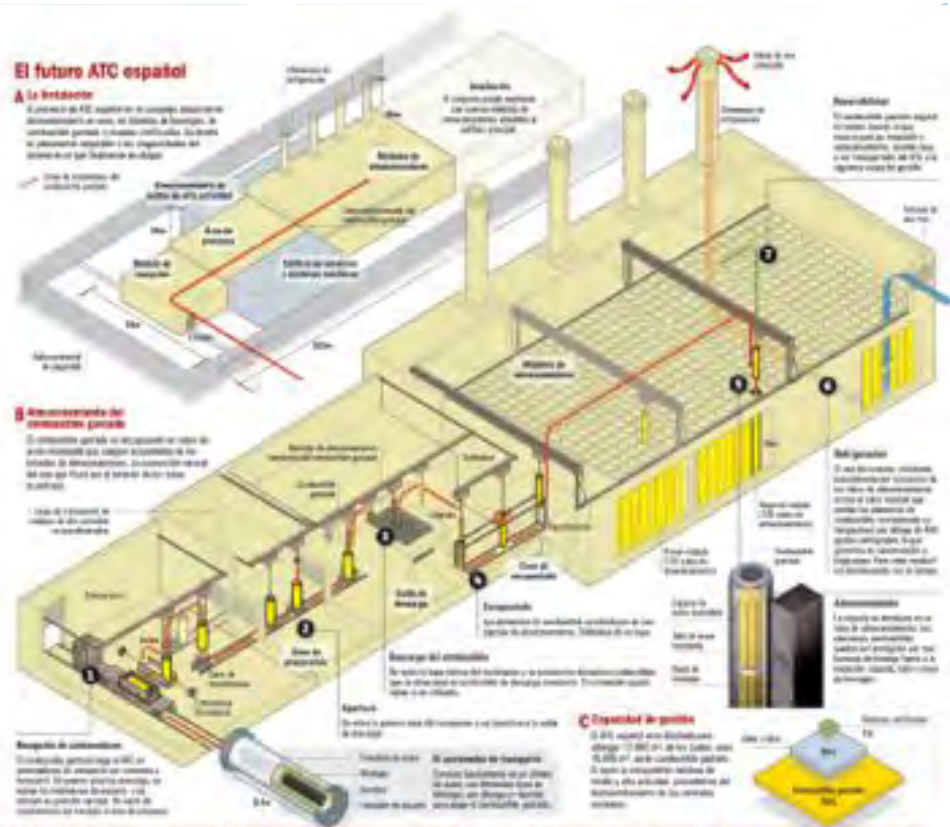
65



28/4/16

Jornada SEA

66



¿Qué información? Información sobre el combustible gastado, su gestión y su almacenamiento.

• ¿Cómo se genera? El combustible gastado se genera en las centrales nucleares durante el proceso de generación de energía.

• ¿Cómo se gestiona? El combustible gastado se gestiona mediante un sistema de almacenamiento que garantiza la máxima seguridad.

• ¿Cómo se almacena? El combustible gastado se almacena en casks de acero inoxidable, que garantizan la máxima seguridad.

• ¿Cómo se protege? El combustible gastado se protege mediante un sistema de protección radiológica que garantiza la máxima seguridad.

• ¿Cómo se recupera? El combustible gastado se recupera mediante un sistema de recuperación que garantiza la máxima eficiencia.

• ¿Cómo se reutiliza? El combustible gastado se reutiliza mediante un sistema de reutilización que garantiza la máxima sostenibilidad.

• ¿Cómo se recicla? El combustible gastado se recicla mediante un sistema de reciclaje que garantiza la máxima sostenibilidad.

• ¿Cómo se elimina? El combustible gastado se elimina mediante un sistema de eliminación que garantiza la máxima seguridad.



69

COMPOSICIÓN DE UN COMBUSTIBLE USADO

*U = 95%, enriquecimiento
0,9% en U235

*Pu²³⁹ = 1%

*Productos de fisión = 3,6%

*Actínidos menores = 0,4%



Residuos de alta vitrificados (HLW)

96 % de la radioactividad del combustible usado da lugar a residuos HLW que se vitrifican

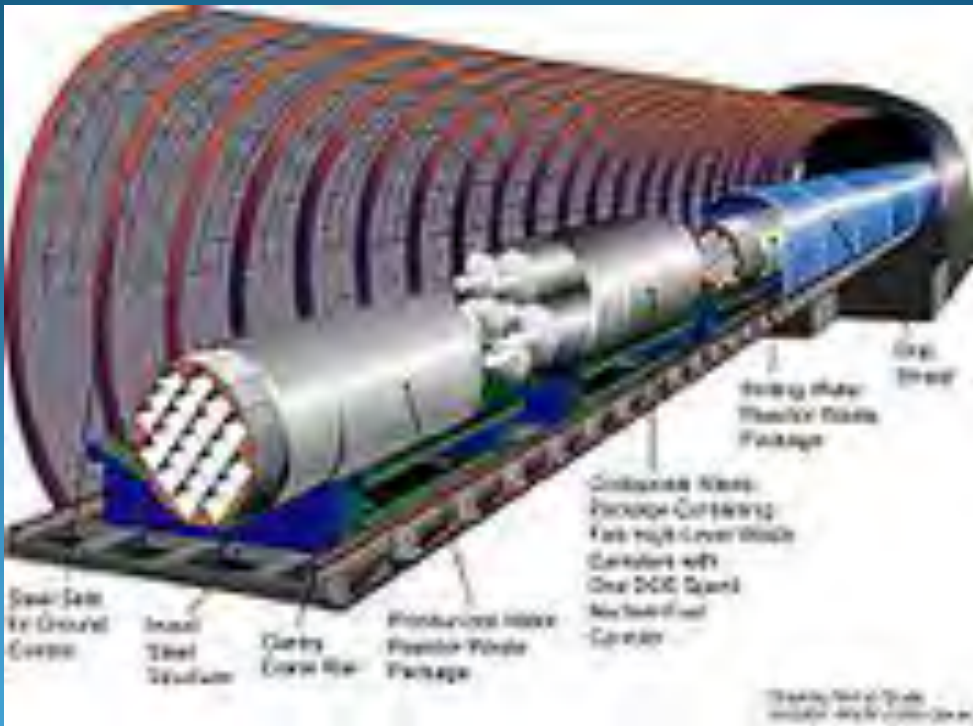
4% da lugar a residuos de media actividad y vida larga



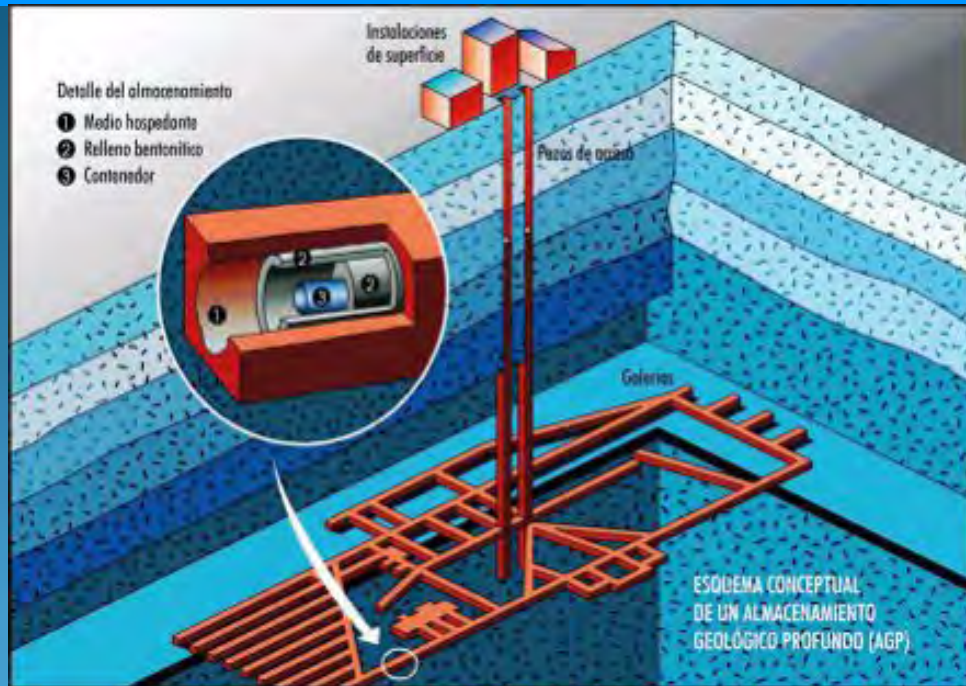
Colada de vidrio



**Residuo vitrificado
(en contenedor)**



Almacenamiento Geológico Profundo



Los residuos de alta radiactividad y vida larga han de ser almacenados de manera segura durante miles de años.

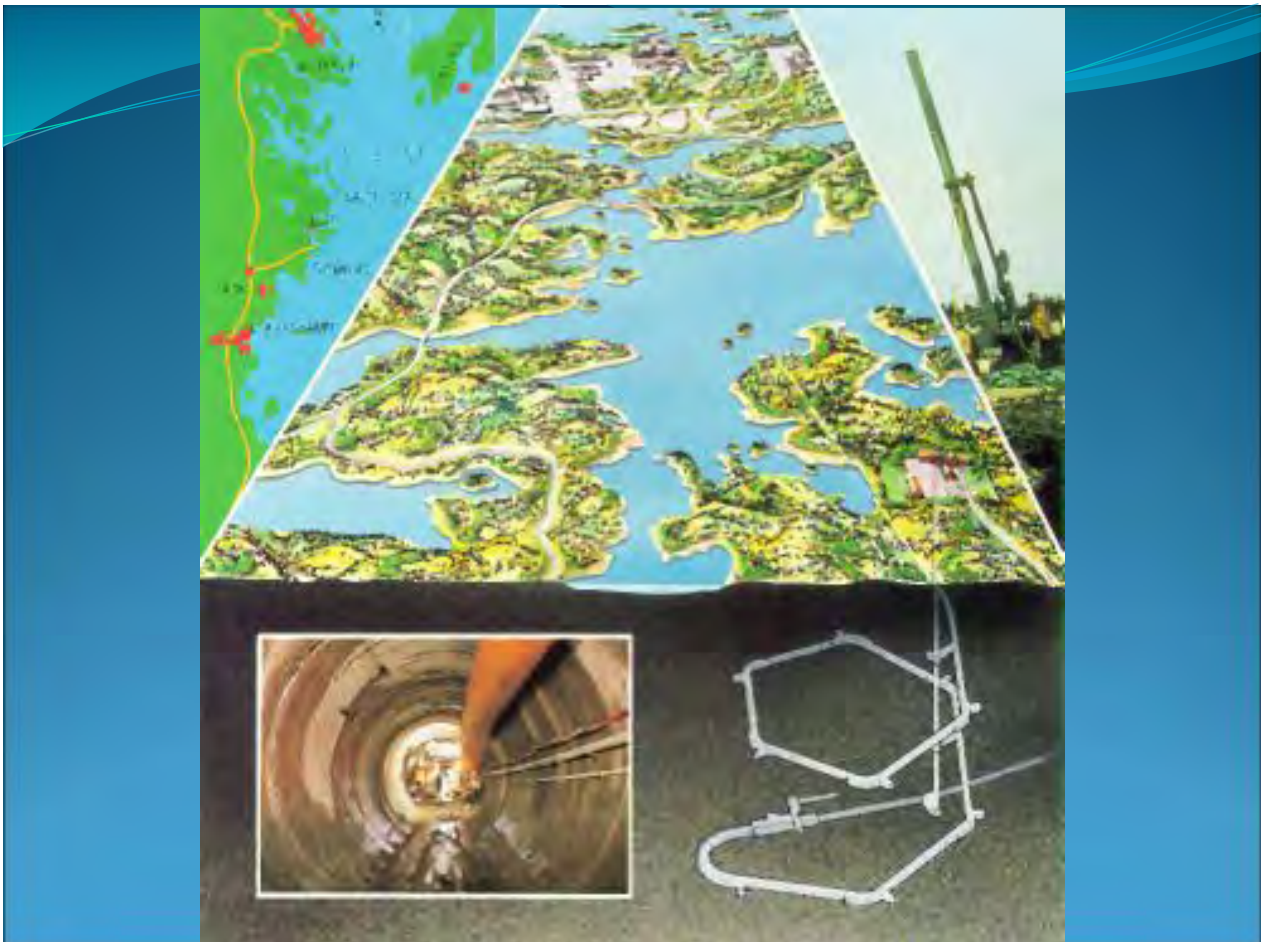
La solución técnica es el almacenamiento en formaciones geológicas, estables y con barreras de ingeniería.

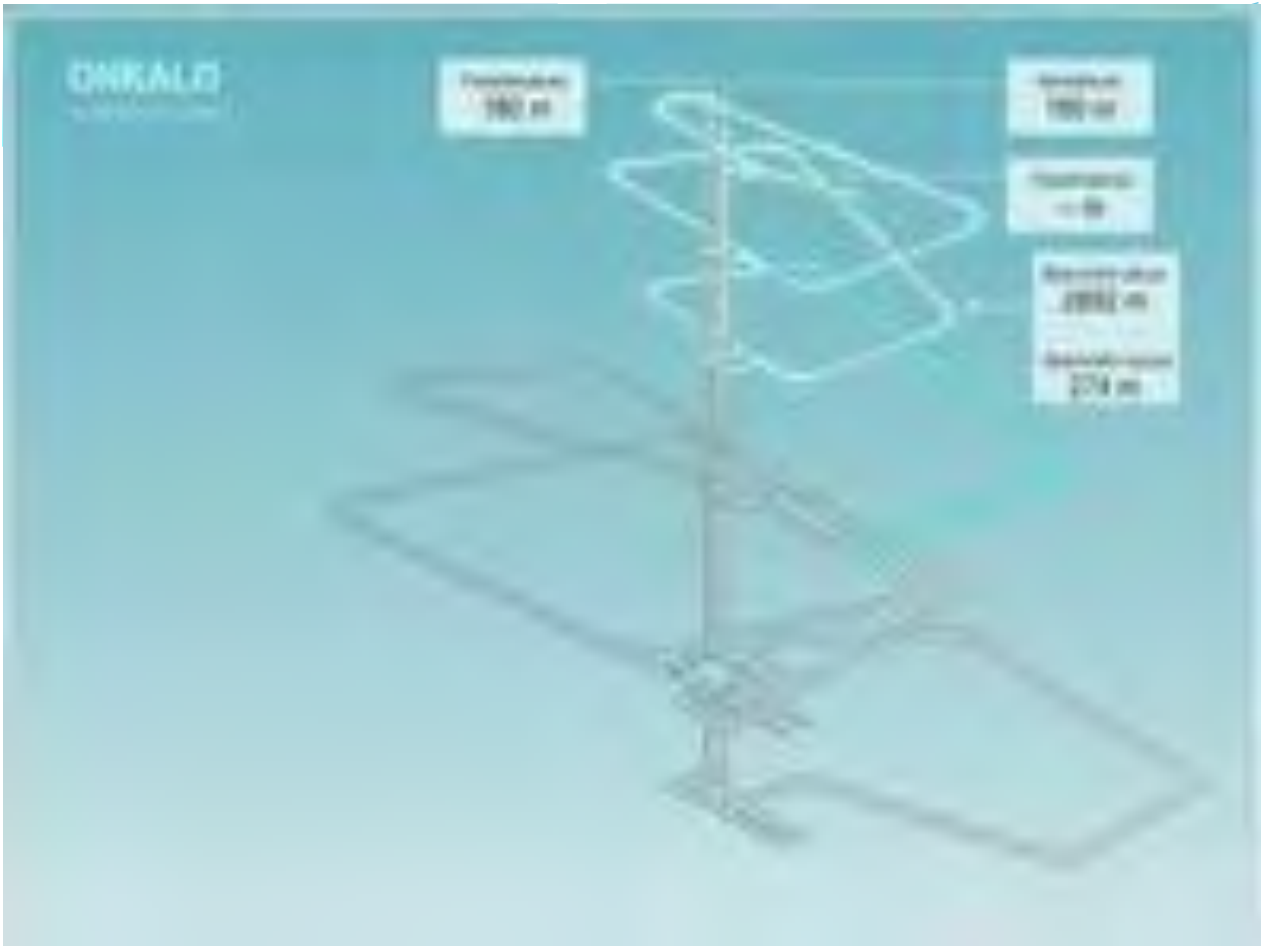
Tiene una fuerte componente política y social. Técnicamente no hay dificultades para la construcción de un AGP.

Se impone una estrategia de gestión por etapas en la que los almacenes temporales permiten ganar tiempo, ofreciendo flexibilidad, la continuación de la I+D y el diálogo entre los actores institucionales y sociales.

ANÁLOGOS NATURALES: LOS REACTORES NUCLEARES NATURALES DE OKLO, GABÓN

- EL YACIMIENTO SE FORMÓ HACE 2000 MILLONES DE AÑOS
- LOS REACTORES INICIARON LA FISIÓN HACE 1800 MILLONES DE AÑOS, AL CIRCULAR AGUA SOBRE EL YACIMIENTO
- LA FISIÓN SE MANTUVO, DE FORMA INTERMITENTE, DURANTE MEDIO MILLÓN DE AÑOS
- LOS PRODUCTOS DE DECAIMIENTO DE LOS DE FISIÓN Y ACTIVACIÓN PERMANECEN RELATIVAMENTE CERCA DEL YACIMIENTO



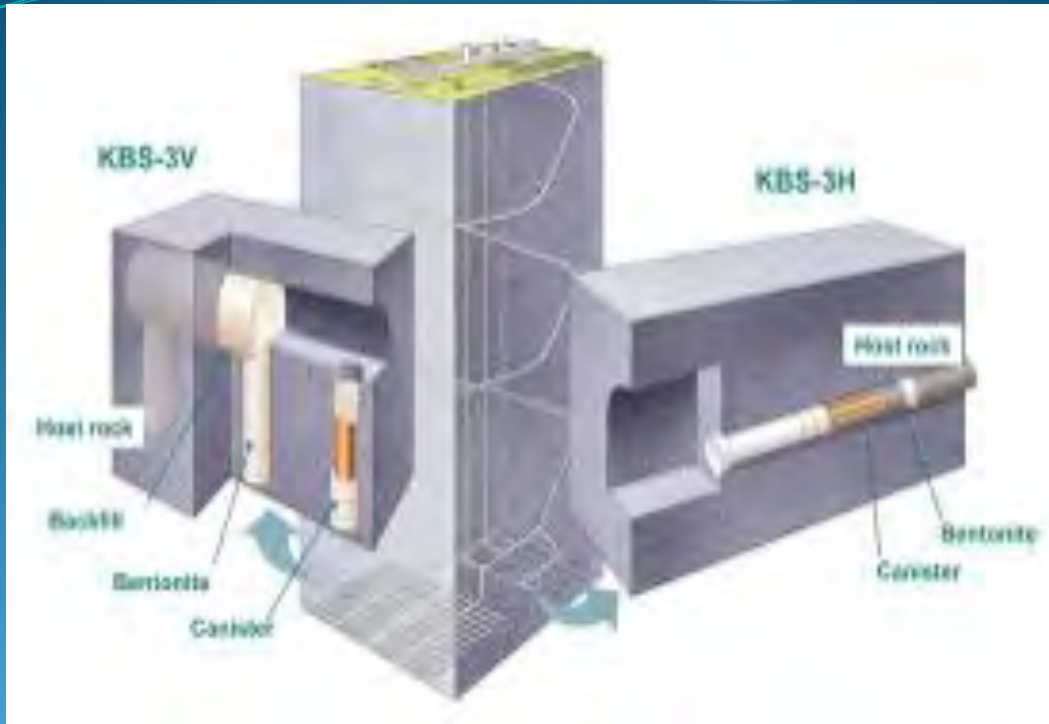




81



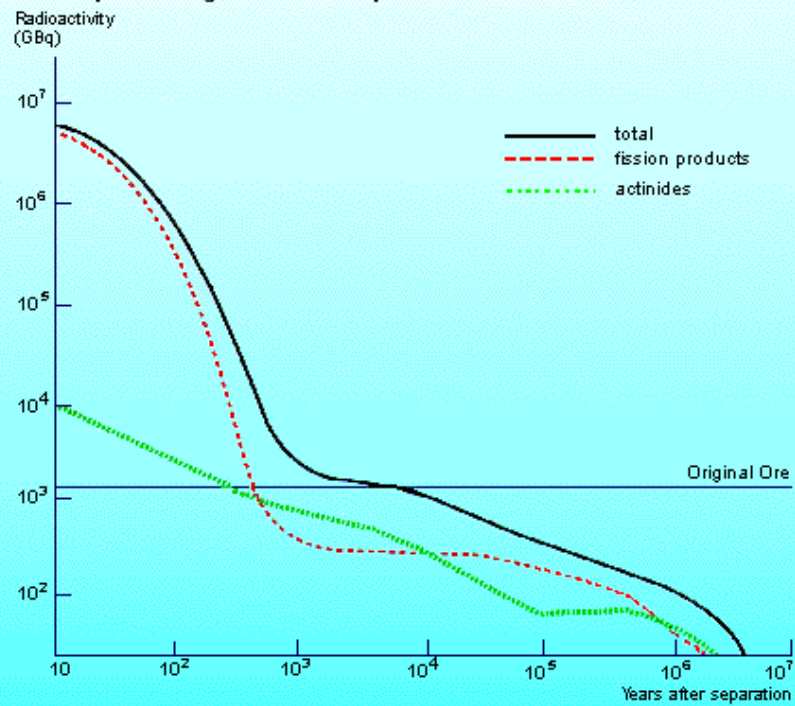
82



Almacenamiento Definitivo de RAA: REPOSITORY YUCCA MOUNTAIN (USA)



Decay in radioactivity of high-level waste from reprocessing one tonne of spent PWR fuel



Gbq = 10⁹ becquerel
 The straight line shows the radioactivity of the corresponding amount of uranium ore.
 NB both scales are logarithmic.
 Source: OECD NEA 1996, *Radioactive Waste Management in Perspective*.

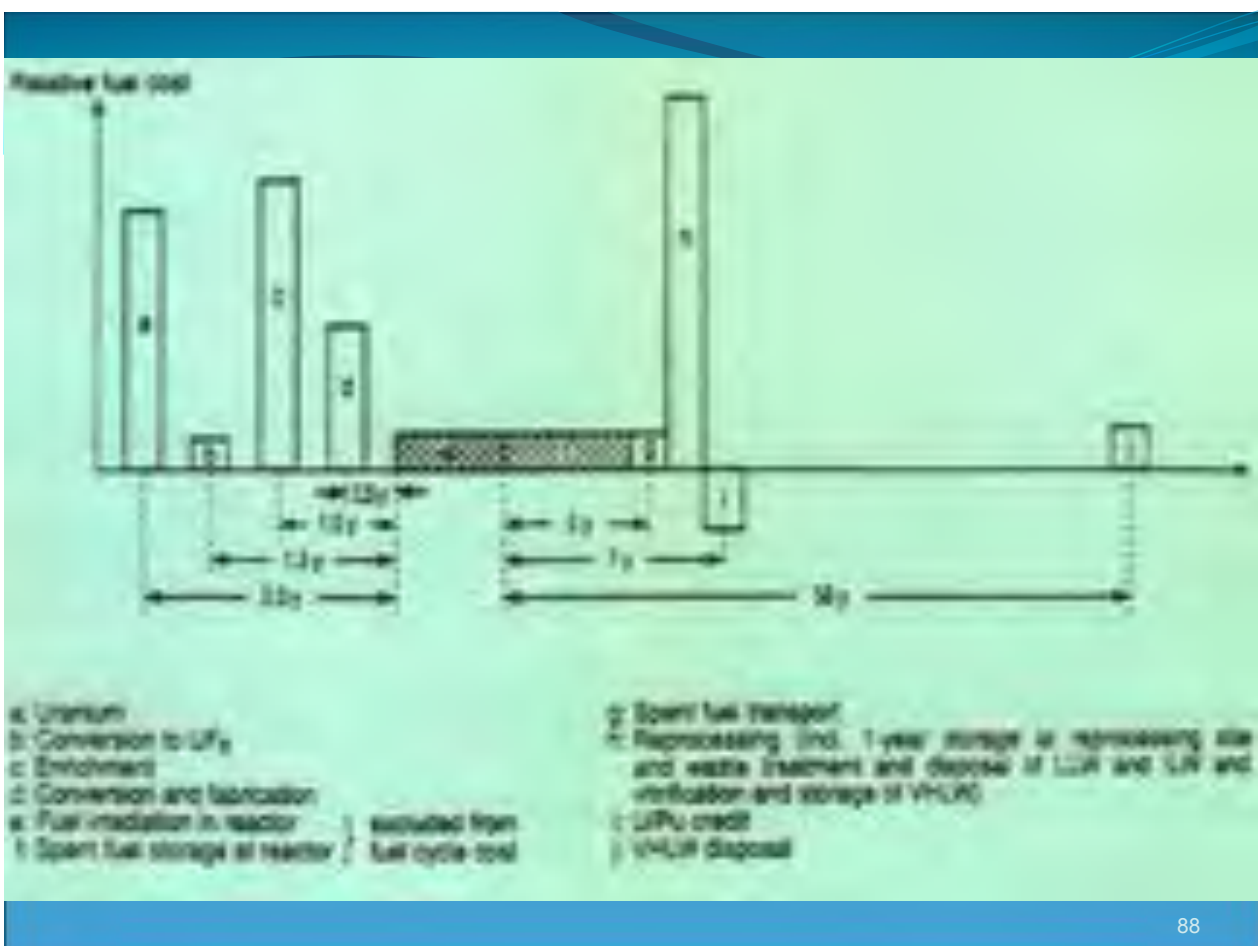
El combustible usado (i) Composición del UO_x

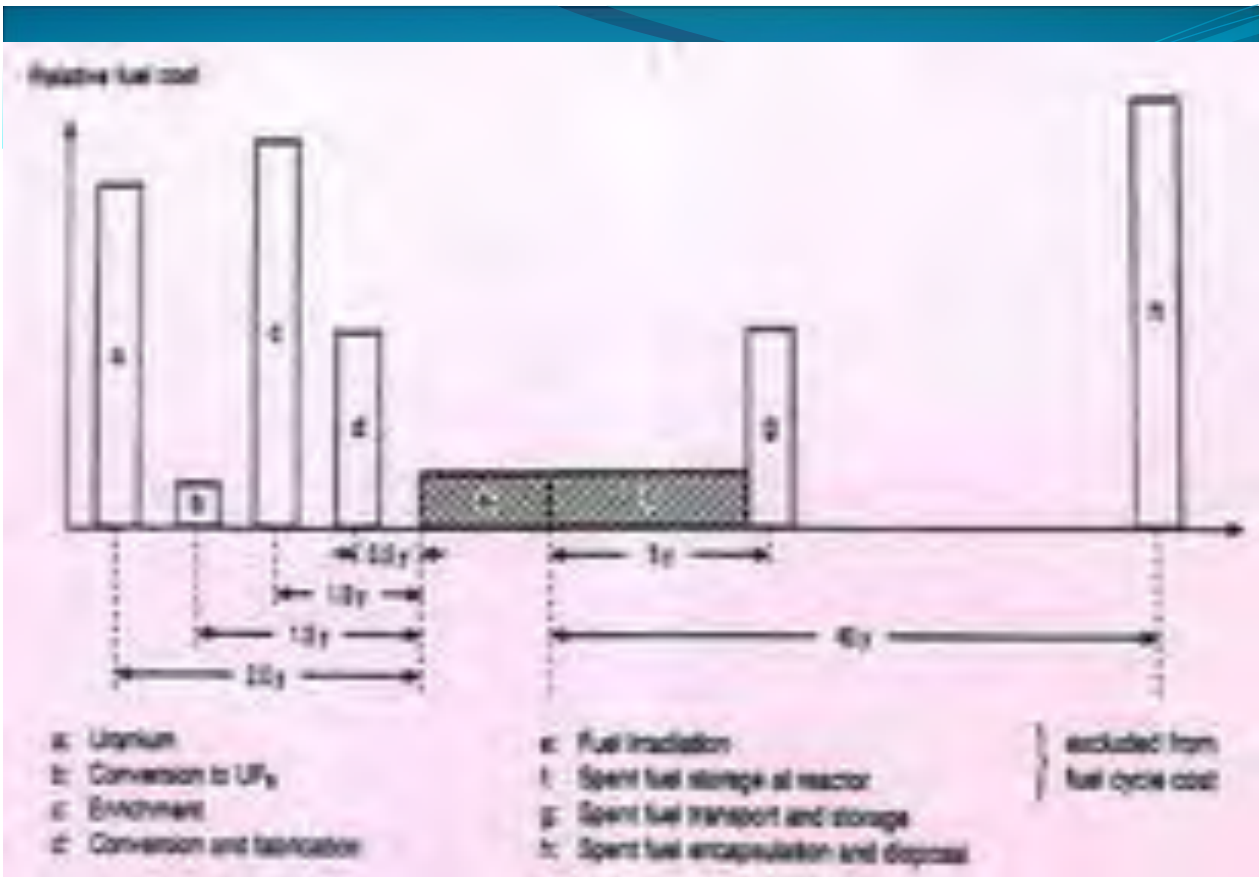
Uranio 95%: 99,1% de U²³⁸, 0,9% de U²³⁵

Plutonio 1%: 60% de Pu²³⁹, 6% de Pu²⁴¹, 26% de Pu²⁴⁰, 6% de Pu²⁴² y 2% de Pu²³⁸

Productos de fisión 3,6%: Cesio¹³⁷, Estroncio⁹⁰ en altas proporciones y muchos otros

Actínidos menores 0,4%: Americio, Curio, etc.





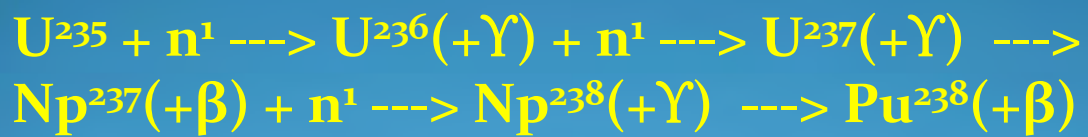
El combustible usado (ii)

Contenido en plutonio del combustible MOX usado

Plutonio 238.....	3%
Plutonio 239.....	34%
Plutonio 240.....	37%
Plutonio 241.....	15%
Plutonio 242.....	11%

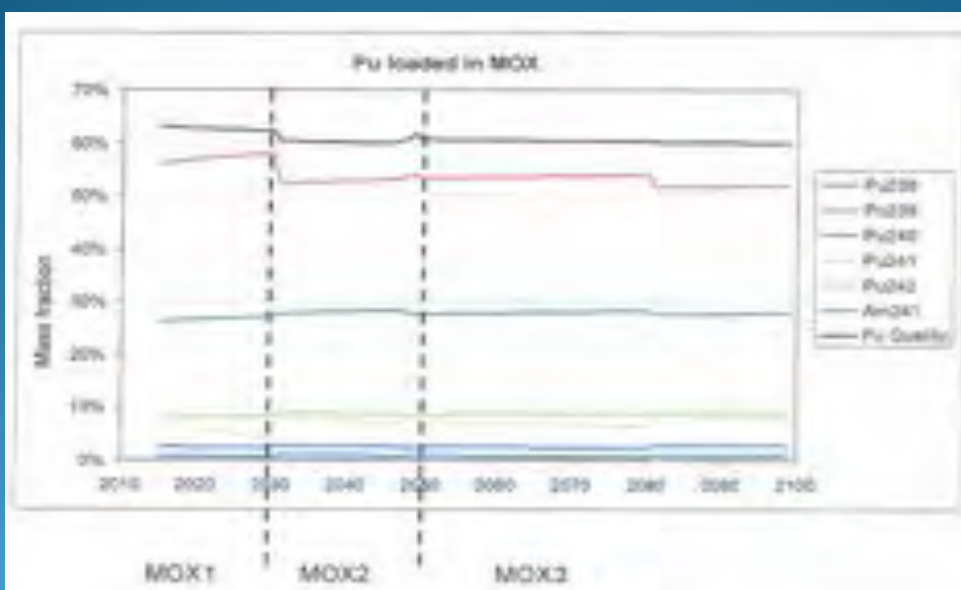
Multireciclado: Radisótopos problemáticos

Pu^{238} y Am^{241}



Nuevas estrategias de reproceso y multireciclado: Restricciones en la fabricación del MOX

- Contenido máximo en Pu en las pastillas de MOX < 11%
- $(\text{Pu}^{238} + \text{Am}^{241}) / (\text{Pu} + \text{Am}^{241}) < 3,4\%$
- Contenido medio de Pu en el combustible MOX < 9,7%



Ventajas asociadas al Multireproceso

- Reducción de volumen de los residuos finales /5
- Disminución de radiotoxicidad/10
- Se utilizan las infraestructuras existentes
- No salvaguardias por la ausencia del Plutonio
- Ahorro en Uranio natural (y en enriquecimiento)
- Más flexibilidad en la gestión del combustible: multireciclado interviene 20 años después de descarga inicial de UOx
- Mantiene abierta la opción del uso de reactores de 4ª Generación como transmutadores, permitiendo una transición ordenada

BENEFICIOS TANGIBLES DEL RECICLADO

- RECUPERACIÓN DEL URANIO
- RECUPERACIÓN DEL PLUTONIO
SOBRANTE: ALMACENAMIENTO SIN SALVAGUARDIAS
- PRODUCTOS DE ACTIVACIÓN Y ACTÍNIDOS MENORES
- ELIMINA INCERTIDUMBRE EN EL PROCESO GLOBAL

BENEFICIOS INTANGIBLES DEL RECICLADO

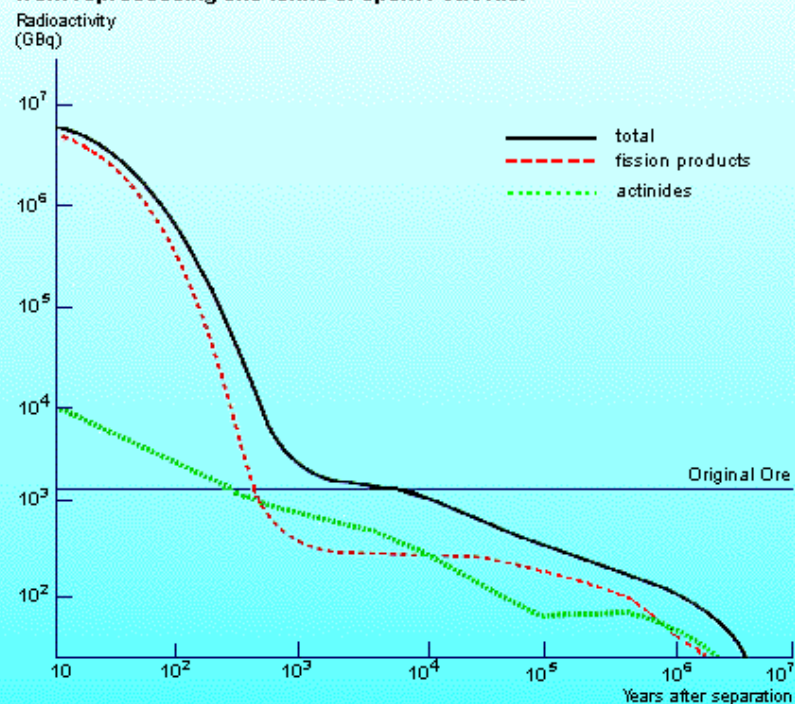
- QUEMADO DEL PLUTONIO COMO MOX
- LAS RADIACIONES BETA-GAMMA DEL VIDRIO DECAEN EN UNOS 600-800 AÑOS
- DISMINUYE SIGNIFICATIVAMENTE LA RADIOTOXICIDAD: FACTOR DE 10
- SE OPTIMIZA EL USO DEL COMBUSTIBLE
- RESPONDE A DEMANDAS DEL PÚBLICO FRENTE A LOS RESIDUOS RADIATIVOS

28/4/16

Jornada SEA

97

Decay in radioactivity of high-level waste from reprocessing one tonne of spent PWR fuel



Gbq = 10⁹ becquerel

The straight line shows the radioactivity of the corresponding amount of uranium ore.
NB both scales are logarithmic.

Source: OECD NEA 1996, *Radioactive Waste Management in Perspective*.

Los accidentes nucleares

Three Mile Island en Harrisburg 1979: *El síndrome de China*



Acumulación de errores al tomar decisiones bajo estrés y multiplicidad de elementos y controles de seguridad

28/4/16

Jornada SEA

99

Chernóbil: 1986

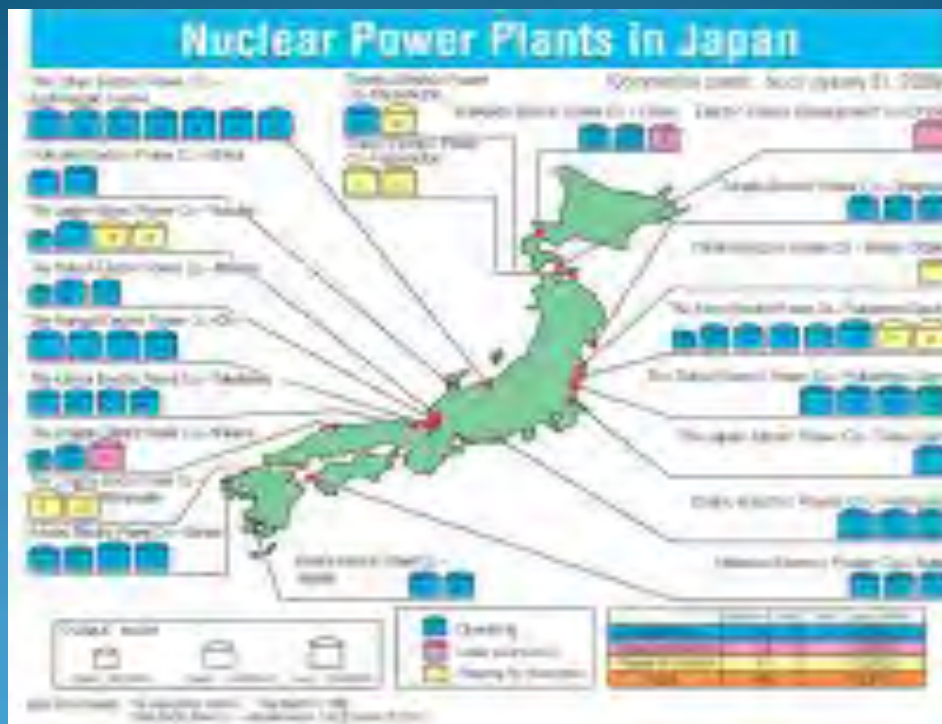


28/4/16

Jornada SEA

100

EL ACCIDENTE DE FUKUSHIMA





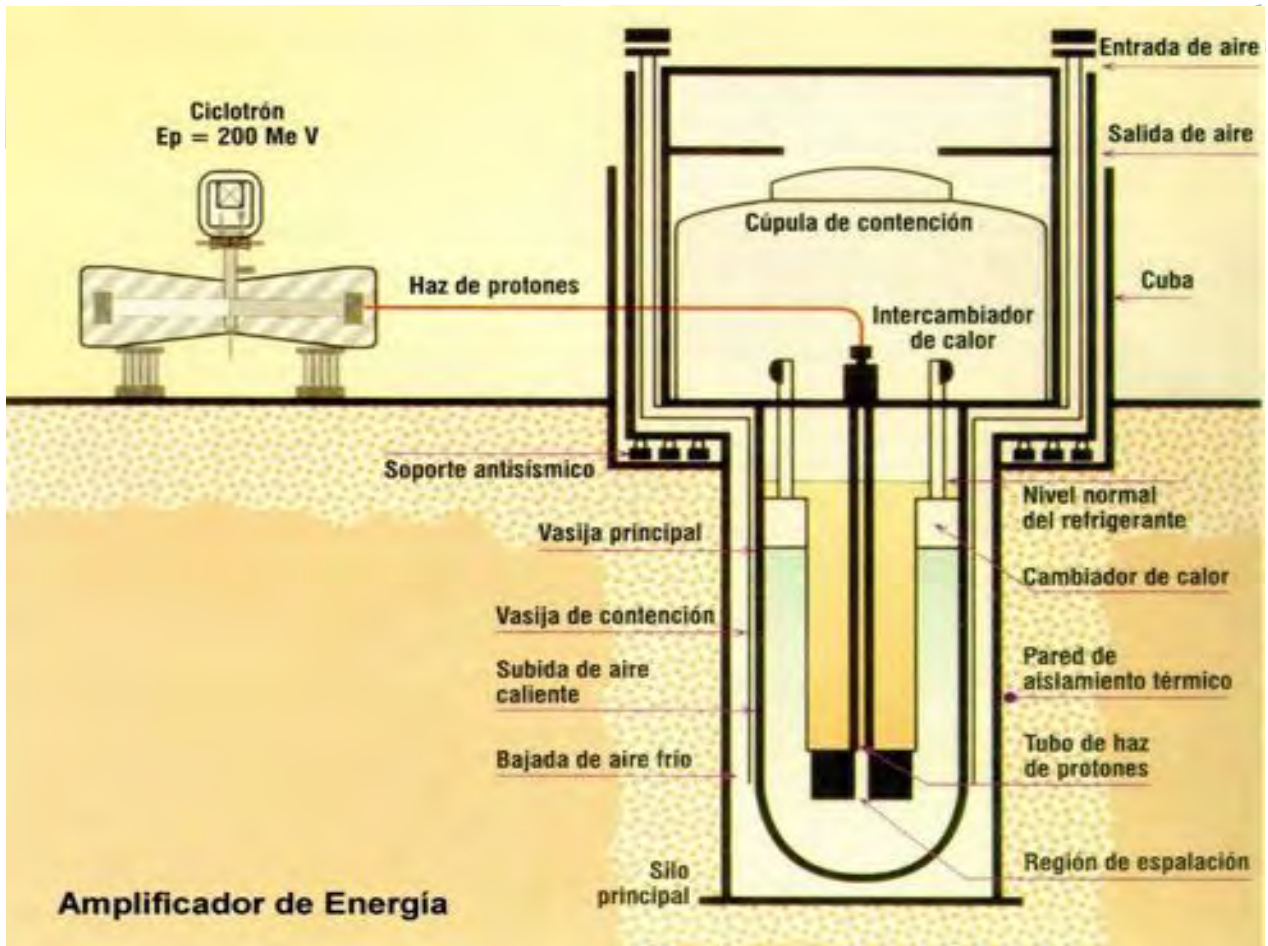


28/4/16

Jornada SEA

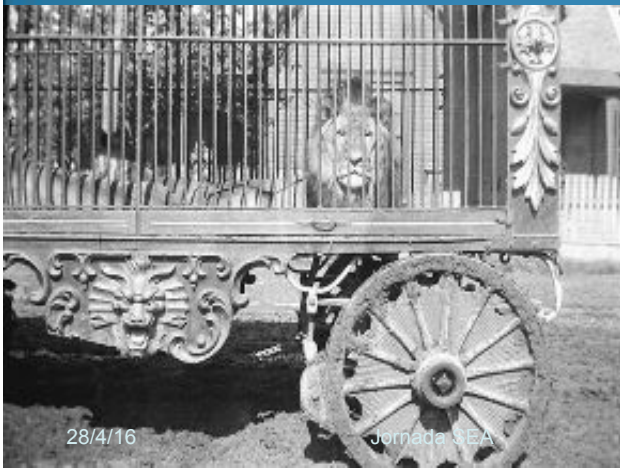
105





RIESGO=Probabilidadxdaño

- Fumar..... 10^{-3}
- Automóvil..... 10^{-4}
- Avión..... 10^{-5}
- Reactor..... 10^{-6}
- Almacén de residuos rad... 10^{-7}



SCAR



109



ENERGÍA NUCLEAR ¿PARA
QUÉ?
EN CASA NOS BASTA CON
LOS ENCHUFES

KERNENERGIE, WOZU? BEI UNS
STROMM KOMMT AUS DER
STECKDOSE

SÍNDROMES NIMBY Y
NIMEY

NOT IN MY BACKYARD

NOT IN MY ELECTION YEAR