

El desafío nuclear.

Ponencia presentada por

Prof. Eduardo D. Greaves y Prof. Haydn Barros.
Laboratorio de Física Nuclear, Universidad Simón Bolívar.

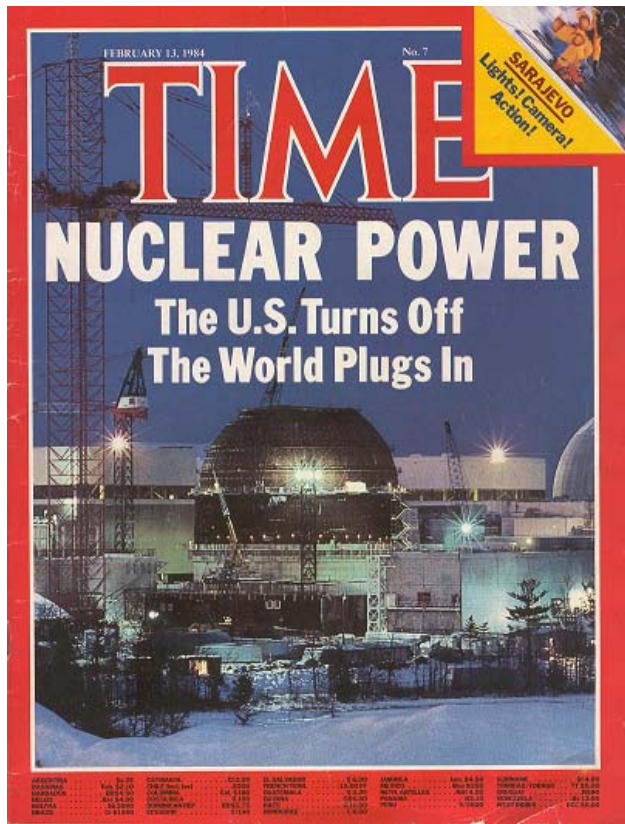


(www.nuclear.fis.usb.ve)

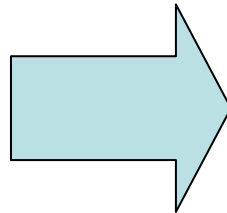
Simposio: Usos Pacíficos de la Energía Nuclear.
Colegio de Ingenieros de Venezuela.

Caracas, 30 de Septiembre de 2006

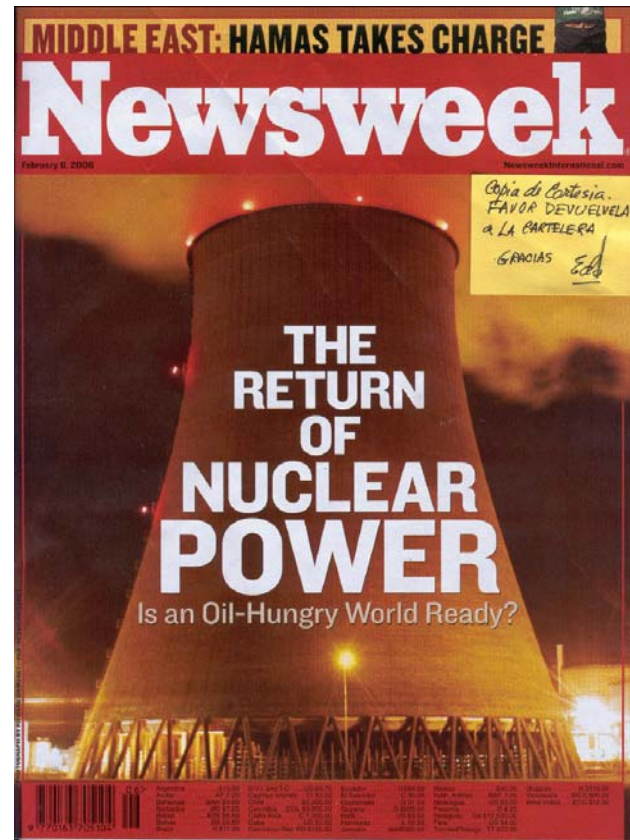
El Renacimiento de Energía Nuclear: Las carátulas de estas ediciones separadas 22 años y siete días son emblemáticas del cambio de actitud referente a la energía nuclear



Febrero 13, 1984



**22
AÑOS**



Febrero 6, 2006

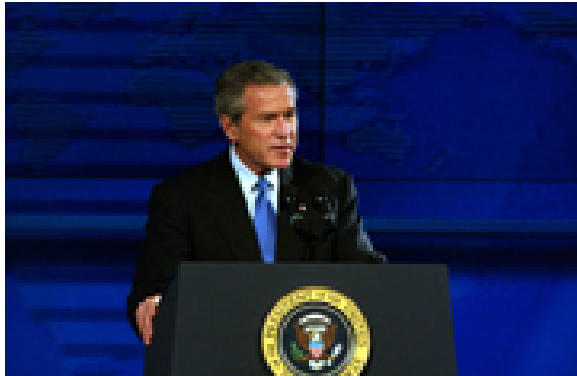
Laboratorio de Física Nuclear,
Universidad Simón Bolívar

Factores determinantes del Renacimiento de la Energía Nuclear:

(Por parte de USA y países de 1er mundo)

- **Calentamiento global:** La necesidad de migración a una tecnología energética menos contaminante de gases causantes de efecto invernadero.
- **Independencia del tercer mundo:** La necesidad de independizarse de fuentes externas, no confiables, de suministro de energía.
- **Terrorismo:** La necesidad de migración a tecnologías no proliferativas resistentes a posibilidad de uso terrorista.
- **Control del futuro energético.** El propósito del control económico de la ciencia y la tecnología requerida para la generación FUTURA de energía. (En términos de los próximos 25 años).

El gobierno norteamericano a través de su presidente George W. Bush ha anunciado al mundo dos programas relacionados a la energía nuclear:



Advanced Energy Initiative(AEI)

Esta es la vertiente NACIONAL norteamericana. Busca invertir, en USA, en la necesaria **investigación y desarrollo** de las nuevas tecnologías que permitan implementar la generación nuclear de energía eléctrica

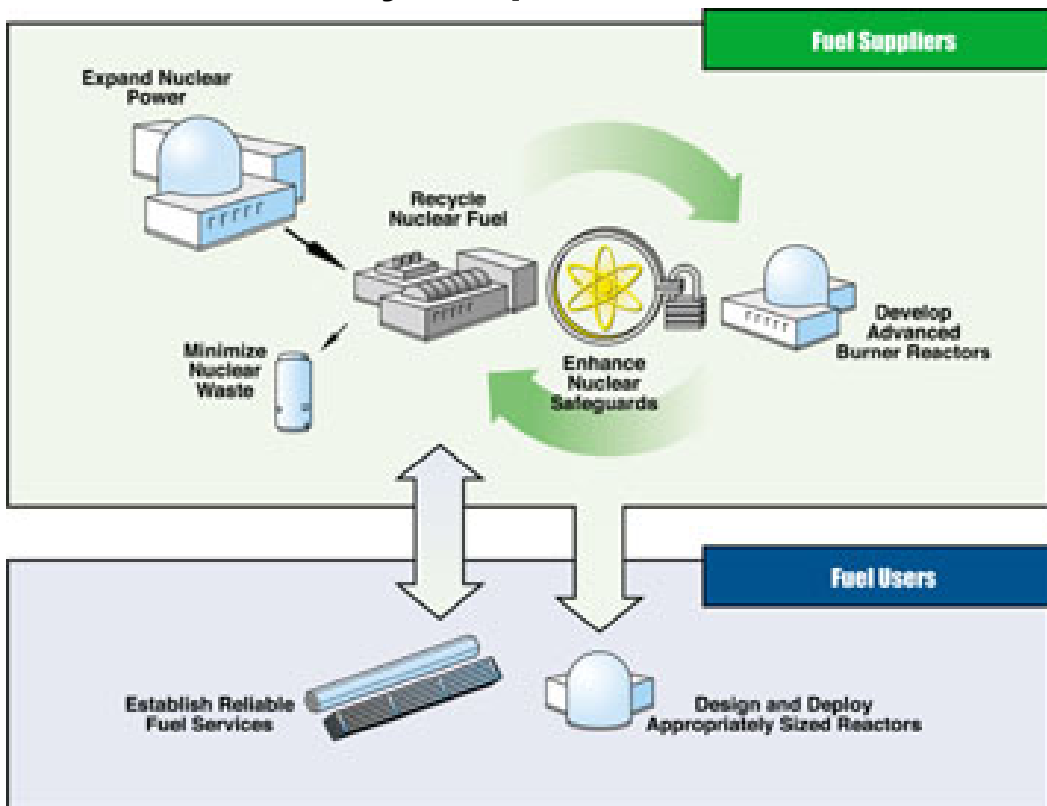
The Global Nuclear Energy Partnership

Greater Energy Security in a Cleaner, Safer World

Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) Junio 15, 2005. Esta es la vertiente INTERNACIONAL. Busca desarrollar un **consenso mundial** que permita la expansión del **uso** de energía nuclear para la producción de electricidad libre de la generación de gases de invernadero. Se pretende que sea una fuente económica que atienda la demanda creciente de energía, que use un ciclo nuclear que sea seguro y que a la vez sea resistente a la proliferación de armas nucleares.

El “**Global Nuclear Energy Partnership (GNEP)**” tal como claramente lo expresa la pagina Web del programa (<http://www.gnep.energy.gov/>)(ver diagrama) busca establecer dos clases de países:

- 1) Los países “**suplidores de energía**” que tienen la ciencia actualmente y serán los suplidores de la tecnología (USA, Europa Unida, Rusia, China)
- 2) Los países “**consumidores de la energía**”: Bloque árabe, bloque suramericano y bloque asiático: es decir el tercer mundo



Está muy clara la intención de USA de controlar a futuro (20-50 años) el mercado mundial de la energía e independizarse por esta vía de la situación actual de dependencia de los países productores de petróleo para pasar a una situación de control hegemónico mundial en el mercado energético.

Los elementos que se pueden usar como combustibles nucleares son el uranio, torio y plutonio

- **Uranio:** Composición isotópica natural: $^{238}\text{U} = 99.3 \%$, $^{235}\text{U} = 0.7\%$ (fisionable) Requiere Enriquecimiento en ^{235}U . **Tecnología actual desarrollada**
- **Torio:** Composición isotópica natural: $^{232}\text{Th} = 100 \%$ (no fisionable) Requiere conversión a ^{233}U (fisionable) **Tecnología posible recomendada**
- **Plutonio:** ^{239}Pu Fabricado en reactores: $\text{U-238} + n = \text{U-239} \rightarrow \text{Pu-239}$. **Fabricado para bombas. Recientemente reconvertido para potencia**

La tabla muestra los Isótopos fisionables. Estos son los isótopos con los cuales se puede generar energía eléctrica en plantas nucleares. Con todos ellos se pueden también hacer bombas atómicas, si bien el Pu 239 (plutonio) es el más conveniente para ese desafortunado fin. El dominio de la tecnología de la producción pacífica de energía eléctrica, da la capacidad y el conocimiento para el desarrollo de los usos bélicos. Tal como el conocimiento de la metalurgia e ingeniería mecánica permite la construcción de tractores o de tanques de guerra.

Table 14-2. Characteristics of fissionable materials bombarded with thermal neutrons, $v_n = 2200$ m/sec

Target nucleus	σ_F , barns	σ_γ , barns	ν	η
U ²³³	524	69	2.51	2.29
U ²³⁵	590	108	2.47	2.08
Natural uranium	—	—	2.47	1.33
Pu ²³⁹	729	300	2.91	2.08

ν = neutrones totales, n = rápidos

Fuente: H. A. Enge, Nuclear Physics, Addison-Wesley 1966



Mineral

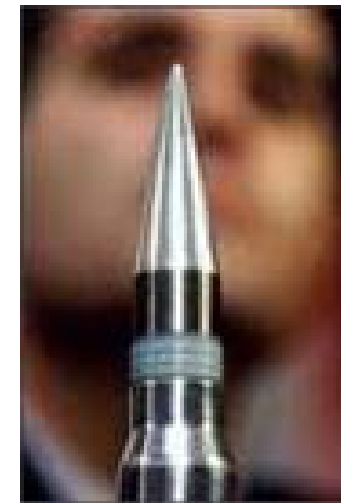
URANIO



Yellow Cake (U_3O_8)

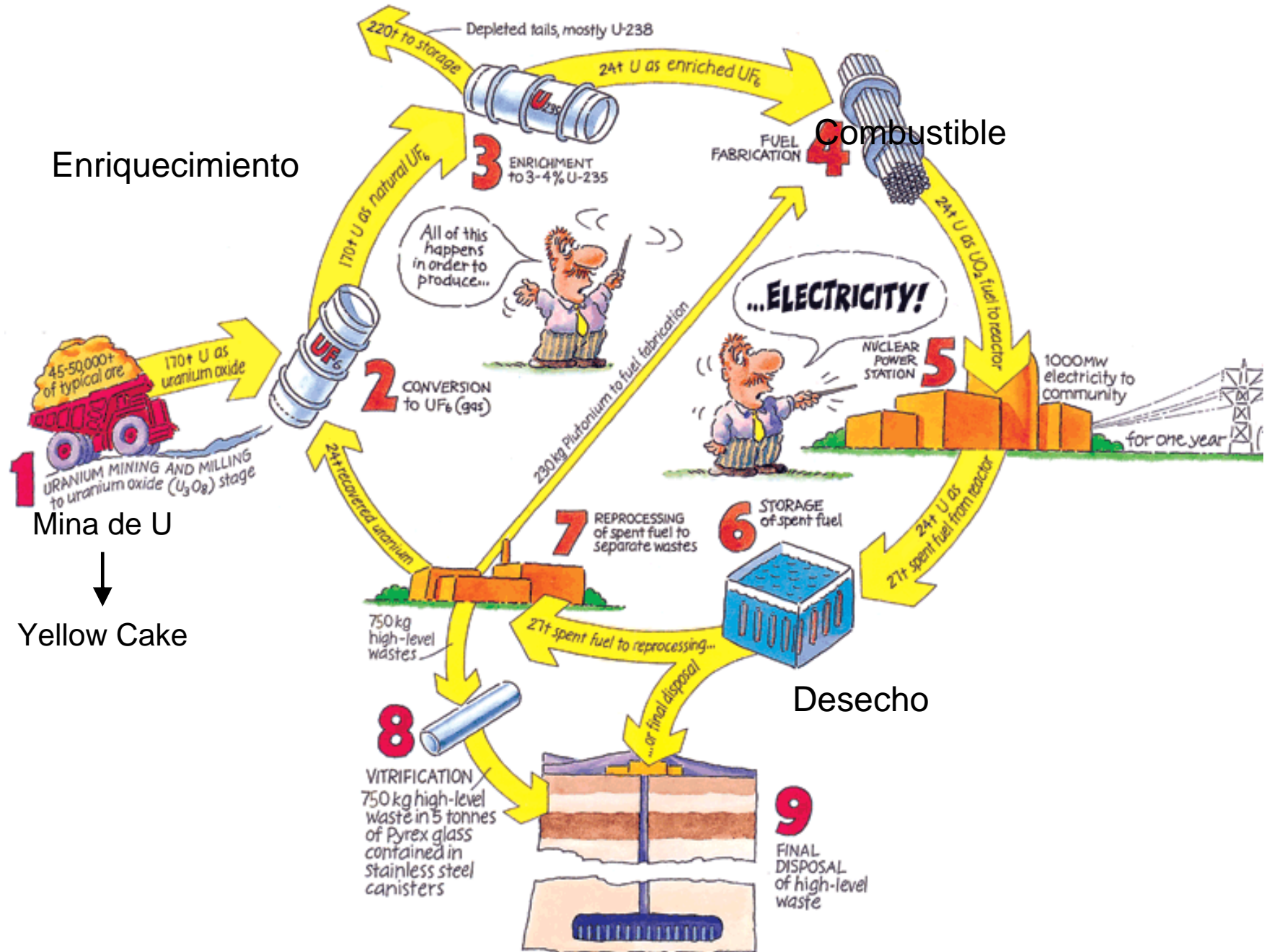


$U F_6$ Hexafluoruro de Uranio (A temperatura ambiente es un sólido pero se convierte en un gas con ligero calentamiento)



Metal

Esta comiquita muestra los pasos en la industria del Uranio (U)



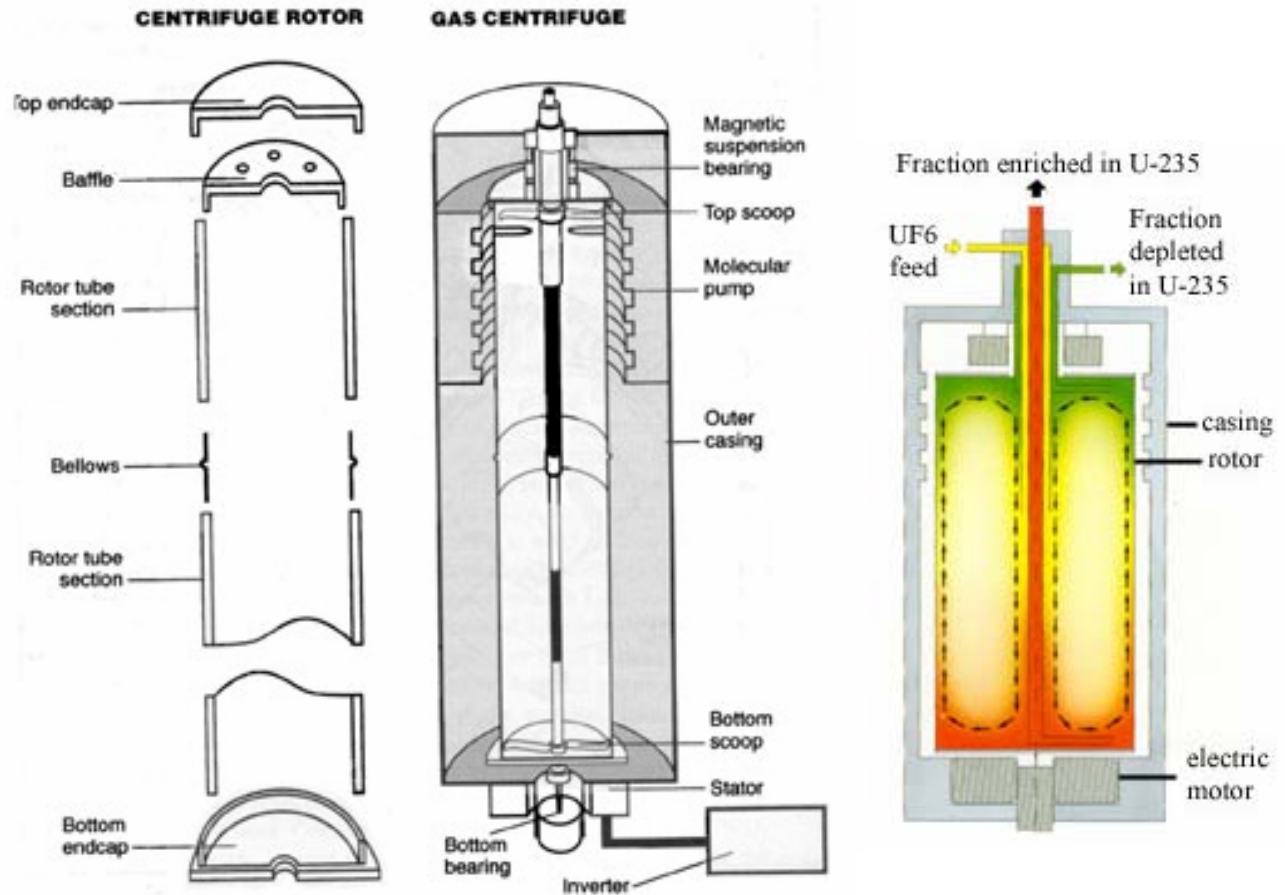
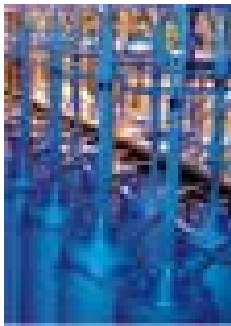
El uranio natural, tal como sale de una mina contiene dos partes: El U238 que es la mayor parte: 99.3% y el U235 que es solo 0.7%. Sólo el U235 (la menor parte) sirve para generar energía (o hacer bombas). Por lo tanto es necesario “enriquecer” el uranio en U235 si se lo desea usar para generar energía. La plantas nucleares usan uranio enriquecido hasta 4-5%. En cambio para hacer bombas con uranio como combustible hay que enriquecerlo hasta cerca de 90%.

Métodos de enriquecimiento del uranio en U235

- Difusión (Proceso viejo usado para las primeras bombas y plantas nucleares)
- **Centrifugación (Proceso comercial actual)**
- Separación isotópica mediante toberas
- Uso de Láser para separación Isotópica y enriquecimiento de uranio
 - **AVLIS (Atomic Vapor Laser Isotope Separation)** Átomos de U-235 y U-238 absorben luz a diferentes frecuencias (colores)
 - **MLIS (Molecular Laser Isotope Separation)** Uranio en forma de hexa-fluoruro de Uranio en fase gaseosa se irradia con láser sintonizado para reducir el U235 a penta-fluoruro y separarlo (Planta operativa en Rusia)

Centrifugación

Diseño del Dr. Gernot Zippe (entre 1945-1950 en Rusia)



Source: Albright, D. and Hibbs, M., 'Iraq's shop-till-you-drop nuclear program', *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 48, no. 3 (Apr. 1992), pp. 32 and 33.



tiene plantas en Alemania, Holanda e Inglaterra

Planes actuales para la instalación de nuevas plantas de Centrifugación



USEC's American Centrifuge technology is based on U.S. centrifuge technology, a proven, workable technology developed by DOE from 1960 through the mid-1980s.

Technology performance will be evaluated prior to initiating construction of the American Centrifuge Plant in Piketon.

In [April 2005](#), the company announced that USEC and its contractors have begun manufacturing centrifuge machine components in Oak Ridge, Tennessee for use in the American **Centrifuge Demonstration Facility in Piketon, Ohio.**

In [April 2006](#), the NRC issued the final Environmental Impact Statement for the American Centrifuge Plant. This document can be downloaded from the [NRC's website](#).



Centrifugación en IRAN

Supuesta planta de enriquecimiento de uranio por Centrifugación Natanz (40 Km SE de Kashan, Iran; 150 Km norte de Esfahan. Compare las fotos Pregunta: Uso de photoshop? Búsquelo Ud mismo con Google Earth: Use las coordenadas.



Foto publicada en USA Año 2003



33 43' 33.67"N, 51 43' 20.85" E Año 2006

Información tomada de la página web del
Nuclear Engineering Department, Atomic Energy Organization of Iran
Roshandasht, 15Km sureste de Esfahan

**NUCLEAR FUEL
RESEARCH AND
PRODUCTION
CENTER
ESFAHAN
(NFRPC)**

**Subrayado:
Programas iguales
que se desarrollan
actualmente en la
USB: Evidencia de
los usos pacíficos
de las ciencias
nucleares en IRAN
(y en Venezuela)**

Nuclear Engineering Department with modern laboratories, appropriate equipment and technical knowledge is able to support engineering services in the field of nuclear engineering. Below, there is a list of our laboratories and reactors with the related facilities, **current projects and abilities**: General nuclear experiments: Operating plateau for the Geiger tube; radioisotope half life determination; detector resolving time measurement; linear absorption coefficient measurement; gamma ray spectroscopy using NaI(Tl); alpha spectroscopy by surface barrier detector; beta spectroscopy by surface barrier detector; high resolution gamma ray spectroscopy using HpGe detector; absolute activity measurement with coincidence techniques; gamma coincidence experiment; Compton scattering Subcritical reactor: Neutron source strength measurement; neutron activation analysis; measurement of neutron age in H₂O; measurement of diffusion and migration length in H₂O; measurement of delay neutron precursors. Zero Power Reactor: Flux Measurement lab.: absolute neutron flux measurement; relative neutron flux measurement; buckling and reflector saving measurement; Cadmium ratio measurement; spectrum parameter measurement; thermal and epithermal spectrum measurement; reference thermal column for neutron spectroscopy. Dynamic lab.: heavy water reactivity worth measurement; effective photo neutron coefficient measurement; period of reactor measurement; measurement of reactivity worth of control and safety rods by PNS and ASJ methods; measurement of prompt neutron decay constant by VTM and EPS methods; measurement of beff; transient experiments. Static lab.: Initial conversion ratio measurement; measurement of fast fission ratio (25d) and ratio of epithermal to thermal absorption

Uranio en Venezuela

Esta tabla representa la síntesis de los esfuerzos de exploración del estado venezolano hasta la fecha.

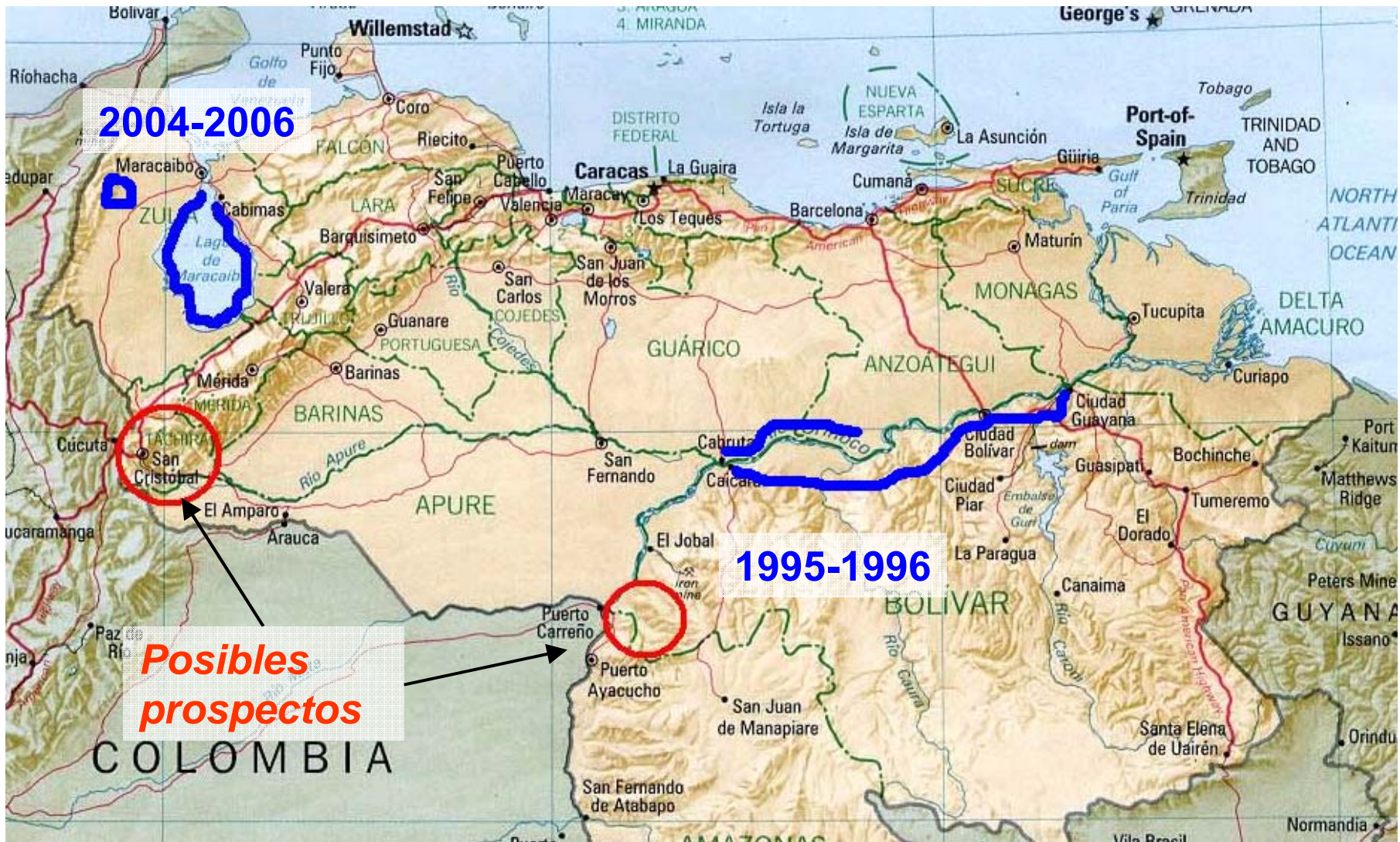
Principales prospectos uraníferos identificados y en estudio (1981). Sus asociaciones geoquímicas, edad y formación geológica a la que se relacionan.

MEM 1981

PROSPECTO	LOCALIZACION	ppmU	ASOCIACIONES GEOQUIMICAS	EDADES m.a.	FORMACION GEOLOGIA
AGUAMENA	Límite Edo. Bolívar y T.F. Amazonas	700-2000	Sn-Nb-Ta-Th-U	1.500	Granito de Parguaza
RIO URICO	Dto. Roscio-Edo. Bolívar	?	FeS ₂	1.800	Roraima
EL BAUL	Edo. Cojedes	10-2000	Th-U	270	Granito de Piñero
MESA DE CHAUCHA	Dto. San Cristóbal Edo. Táchira	200-7000	Ag-Cu-U	150	La Quinta
LOS CAÑOS	Dto. Uribante Edo. Táchira	100-2000	Ag-Cu-U	150	La Quinta
LAS TAPAS-LOS MONOS-FILA EL TORO	Dto. Libertador Edo. Táchira	50-400	F-P-Si-U	80	Navay
LA MOLINA-EL COROZO	Edo. Táchira	10-200	F-P-Ca-U	70-65	Colón y La Luna

Fuente: A.Bellizzia, N.P.de Bellizzia y S. Rodriguez.: Uranio en: Minerales de Venezuela Bol. Geologia MEM No 8(1981) pp. 56-57

Trabajos de prospección radioactiva por la USB

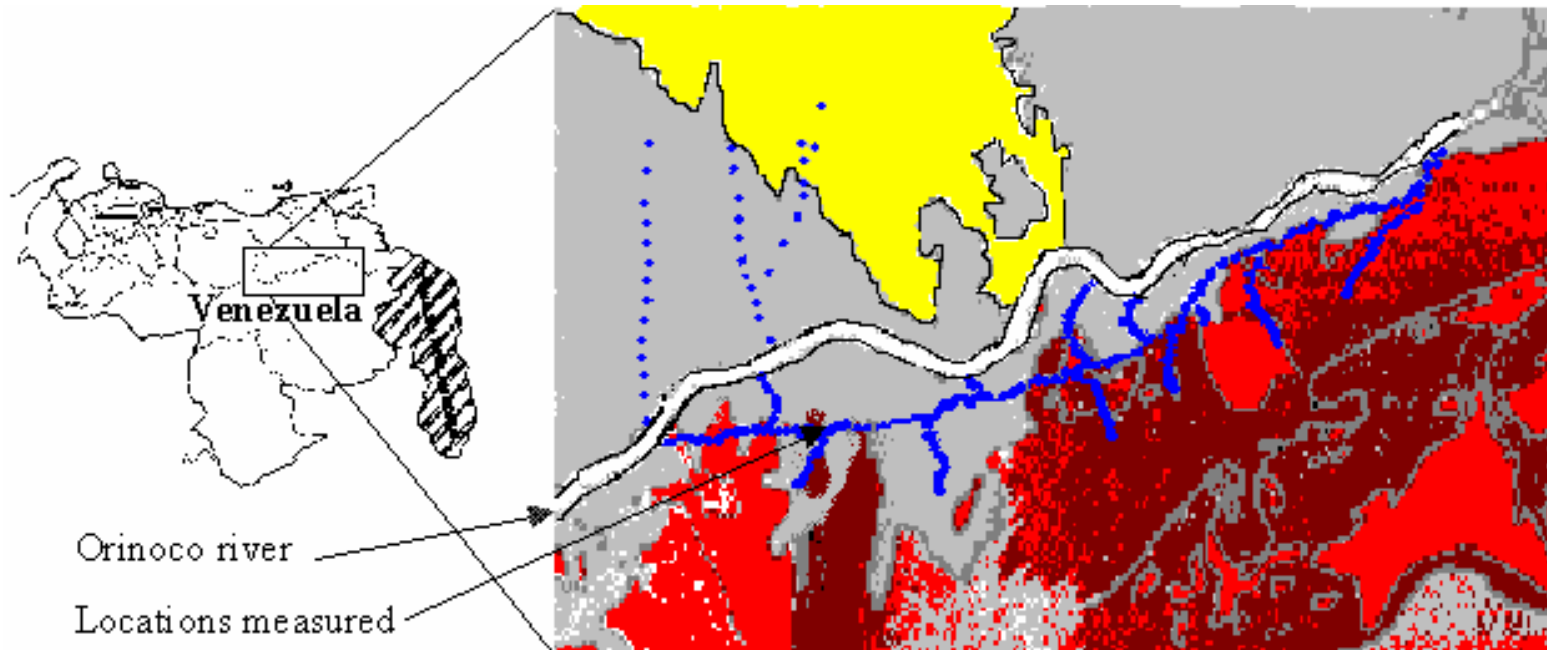


Trabajos de prospección radioactiva por la USB



Trabajos de prospección radioactiva por la USB

Región monitoreada y su mapa geológico.



Orinoco river
Locations measured

Legen

- Cenozoic (cuaternary): sedimentary basin
- Metamorfized precambric (acid intrusives)
- Metamorfized precambric (basic intrusives)
- Cenozoic (Neogenic)

Metodología de medición usada por la USB.



- La altura del detector fue de 1 m por encima de la superficie terrestre
- Tiempo de medición 450 segundos



- Equipo **Exploranium** espectrómetro **GAMMA** de 256 canales y equipo **Scintrex GIS 5**
- Lecturas del **K, U y Th**
- Detallado registro de la radiactividad ambiental.
- Mediciones intersecciones de las **mallas de 5 Km** de lado ubicadas por medio de un **GPS Navigator**.
- **Mediciones de Radón** en el suelo se realizaron con el equipo **Marcus** introduciendo su tubo en el suelo hasta una profundidad de 80 centímetros.

Torio (Th)

- No se usa actualmente en la generación comercial de energía. Reactores experimentales quemando Th han funcionado largos periodos de tiempo en varios países (USA, Canadá, Alemania, India...)
- Composición isotópica natural: $^{232}\text{Th} = 100\%$. No es fisionable pero es FÉRTIL: Absorbe un neutrón y se transforma en ^{233}U fisionable
- Se considera como combustible potencial del futuro

Ventajas

- 3 veces mas abundante que el Uranio
- Se puede sacar 40 veces mas energía que al uranio (con reprocesamiento)
- Mejor que U-235 o Pu-239 en que produce mas neutrones por cada fisión.
- Se puede armar un ciclo reproductor similar pero mas eficiente que con uranio o Plutonio para quemarlo
- Se puede hacer un ciclo mas resistente a la proliferación de armas nucleares
- $\text{Th-232} + n$ da Th-233 que decae en Protactinium 233 que decae en U-233 que es fisionable.
- Russia desarrolla en el Instituto Kurchatov de Moscú con la compañía Americana Thorium Power financiado por USA, un combustible nuclear basado en torio y plutonio para los reactores Rusos: VVER-1000.

Torio Reservas mundiales

País	Reservas (toneladas)
Australia	300 000
India	290 000
Norway	170 000
USA	160 000
Canada	100 000
South Africa	35 000
Brazil	16 000
Other countries	95 000
World total	1 200 000

Torio en Venezuela

- El torio ha sido identificado en yacimientos en Venezuela
- Cerro Impacto en el Distrito Cedeño del Estado Bolívar (Norte del estado Amazonas).



Cerro impacto

- Prominencia norte-sur de 6 Km de largo, 2 km de ancho, localizada 6° N; $65^{\circ} 10'$, Distrito Cedeño Estado Bolívar
- Es un yacimiento laterítico con altos contenidos de Nb, Torio Cerio y tierras raras .
- Es un posible prospecto para la recuperación del torio

Cerro impacto

- Se han realizado estudios metalúrgicos para el procesamiento del mineral:
 - ED Greaves (1976). IC, Inglaterra (Tesis, Mariscal Ayacucho)
 - ED Greaves y M Manrique (1992) Proyecto USB. (Conicit)
 - Otros (UCV, Tesis)
- Para la fecha actual (2006) No se ha establecido proceso económico para la extracción del torio, niobio o las tierras raras de este yacimiento.
- **El contenido energético del torio en Cerro Impacto es *potencialmente mayor* que el de la Faja Petrolífera del Orinoco.**
- Es recomendable el continuar ensayos de extracción. En particular procesos pirometalúrgicos de clorinación y recuperación en carbón activado. Proposición del Prof. Milton Manrique (USB, 2006).

Plutonio

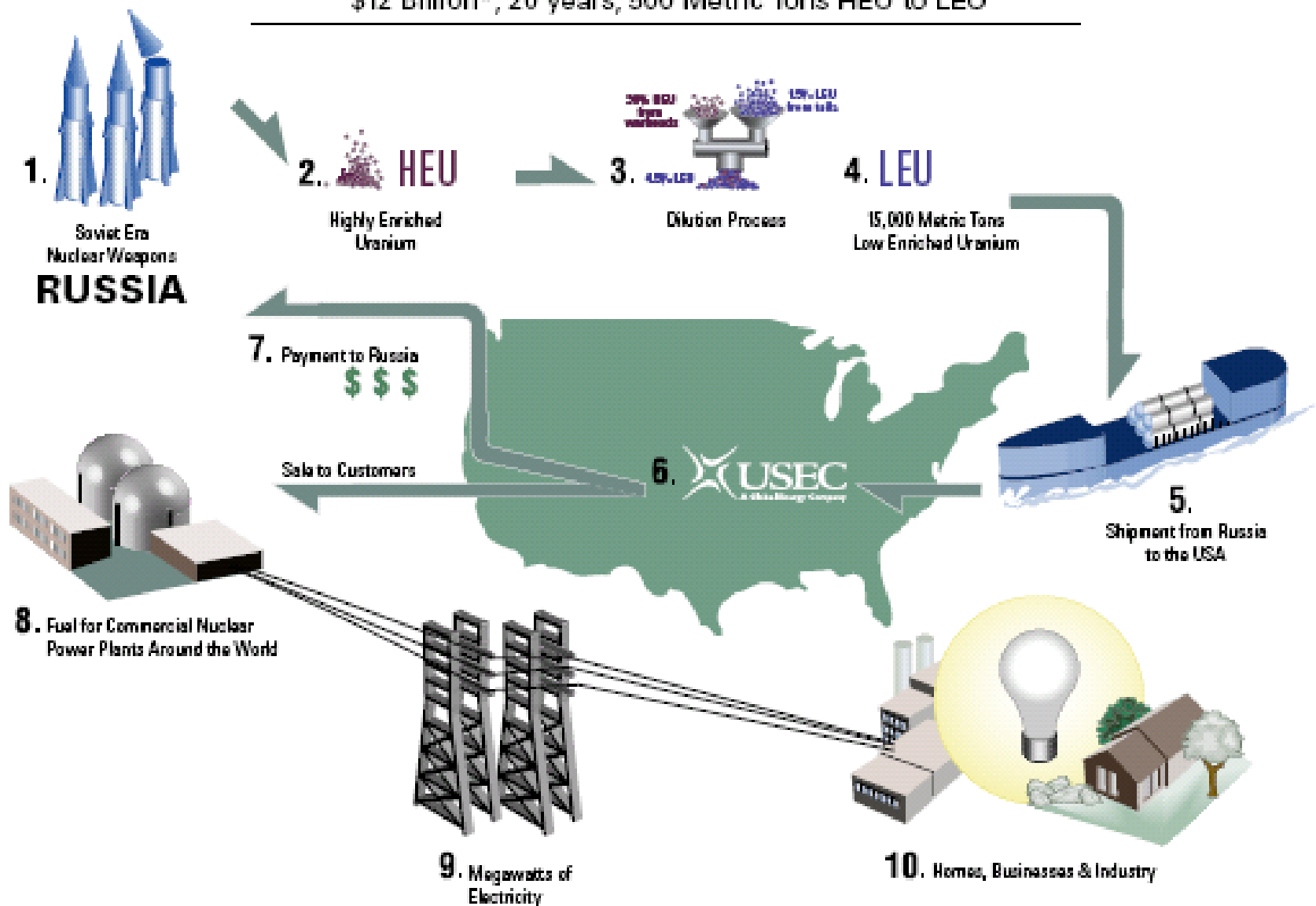
Su uso para generar energía

- Se estima la existencia en Rusia de 150 toneladas de Plutonio (en ojivas nucleares) de calidad para bombas.
- Se estima otro tanto o mas en USA en ojivas nucleares.
- Existe un depósito cercano a CHELYBINSK, Rusia, donde hay almacenadas cercano a 13000 latas, cada una contiene 2.5 Kg. de dióxido de plutonio. (Con tres latas hay suficiente para una bomba)
- Acuerdo USA - Rusia (inicios década 1990) para convertir el plutonio de los armamentos producidos por la guerra fría y usarlo para la generación de energía
- Programa: **Megatones a Megavattios**

Megatons to Megawatts: A Snapshot

U.S.-Russian Contract between USEC and TENEX (for MINATOM)

\$12 Billion*, 20 years, 500 Metric Tons HEU to LEU



*\$9 billion for SWU purchases; \$4 billion of natural uranium transferred for Russian disposition

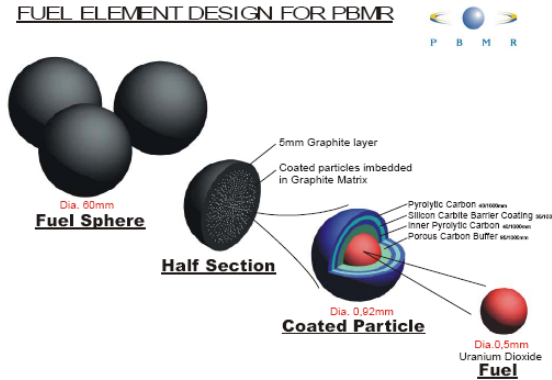
Nuevos Conceptos en el diseño de Reactores

- Uso de ciclo de combustible no proliferativo
- Seguridad inherente en el diseño
- Uso del reprocesamiento y recuperación del combustible no quemado
- Minimización del volumen de los desechos
- Reducción de la vida media de los desechos (a valores máximos de 50 años)
- Separación y quemado de los Actínidos, elementos de vida media larga del combustible quemado.
- Reactor de lecho de esferas (Pebble bed Reactor)
Concepto de “Seguridad inherente”

Reactor de lecho de esferas

[MIT/INEEL Modular Pebble Bed Reactor](#), Andrew C. Kadak,
Massachusetts Institute of Technology, March 22, 2000

FUEL ELEMENT DESIGN FOR PBMR



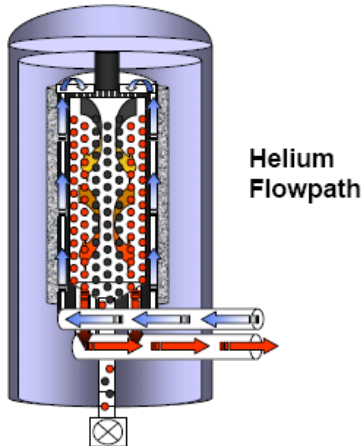
AVR: Jülich
15 MWe Research Reactor



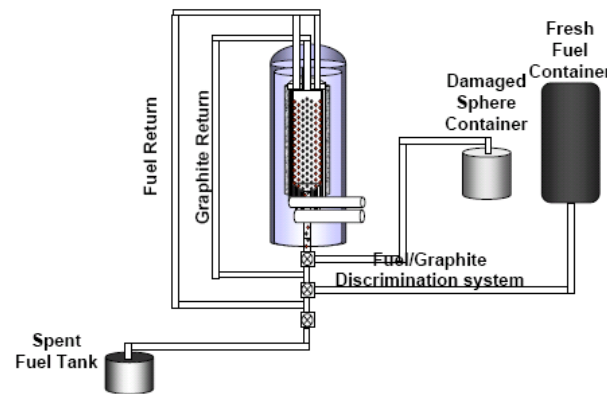
THTR: Hamm-Uentrop
300 Mwe Demonstration Reactor



Reactor Unit



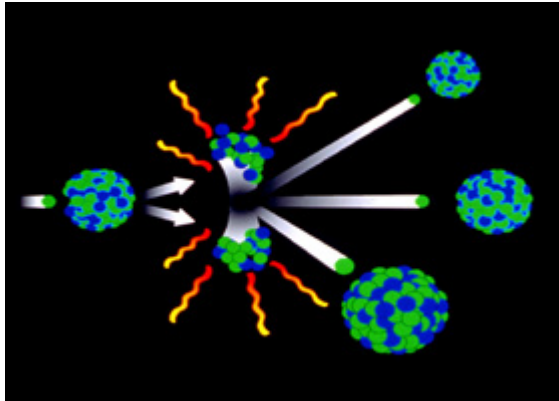
Fuel Handling & Storage System



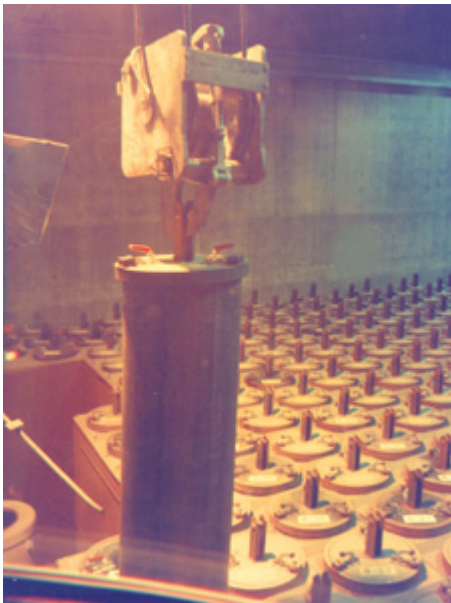
HTR-10 China
First Criticality Dec.1, 2000



El Combustible nuclear quemado contiene lo siguiente:



- Productos de fisión
- U-235 no fisionado
- Pu-239 Plutonio
- Actínidos
- Cantidades de U-238 no reaccionado



Idaho Chemical plant Fuel storage facility

- **Sin procesamiento esto es:**
 - Material altamente radioactivo
 - De vida media de miles de años

Politica vieja:

Almacenaje del combustible quemado



Piscina de almacenamiento

Métodos de reprocesamiento

- Metodos viejos
 - Fosfato de Bismuto [Bismuth Phosphate](#) process, Desarrollado por [Oak Ridge National Laboratory](#) (ORNL) en 1943-1945 para hacer la bomba atómica
 - Hexone o Redox methyl isobutyl ketone as the extractant
 - **Butex, β,β' -dibutyoxydiethyl ether**

•Metodo Actual: **PUREX: Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction.**

Métodos húmedos futuros

UREX (URanium EXtraction) Sin extracción del Plutonio

TRUEX (TRAnsUranic EXtraction) Extracción de los actínidos (Am/Cm) emisores alfa de vida media larga

DIAMEX (Alternativa a **TRUEX**) Desarrollo en Europa por empresa francesa CEA

SANEX (S elective ActiNide EXtraction). Para evitar la extracción de los lantánidos que tienen sección eficaz alta y entorpecen el quemado de los actínidos

UNEX (UNiversal EXtraction) desarrollo en Rusia y República Checa Para extracción de los radioisótopos más molestos (Sr, Cs y actínidos menores: neptunium, americium, curium, berkelium, californium, einsteinium, and fermium).

Metodos de reprocesamiento

- Métodos Piro metalúrgicos (Futuros)
 - **PYRO-A** Método para extraer actínidos. Usa Sales fundidas y la extracción se realiza por electro deposición (Libre de agua)
 - **PYRO-B** Desarrollado para procesamiento de combustible en reactores de transmutación que no utilizan uranio (Libre de agua)



The Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP) en UK. Tratamiento comercial de combustible usado de UK e importado de reactores de todo el mundo. Separa el uranio y el plutonio del resto de los desechos. El edificio negro a la derecha es la planta de vitrificación para esos desechos.

Composicion de combustible, usado y reprocesado

	Combustible Nuevo %	Combustible Usado %	PUREX	UREX+ with ATW
Actínidos				
Uranium-235	3.3	0.80	MOX Fuel	MOX Fuel
Uranium-238	96.7	94.30	Reused or LLW	Reused or LLW
Plutonium-239	0	0.89	MOX Fuel	MOX or ATW
Actínidos	0	0.10	0.10	MOX or ATW
Estable/Vida Corta	0	3.00	3.00	3.00
Cesium/Strontium	0	0.30	0.30	0.30
Iodo/Technetium	0	0.10	0.10	ATW
DESECHO TOTAL		100 %	3.5 %	3.3 %

LLW =Low Level Waste; MOX = Metal OXide fuel
 ATW =Accelerated Transmutation of Waste

En sombreado: Material al repositorio de desechos

Con la tecnología actual de reprocesamiento del combustible usado es posible:

- Método PUREX: Reducir los desechos del 100 % actual a 3.5 % con recuperación del combustible producido (Pu239)
- Método **UREX+ con ATW**: Reducir los desechos del 100 % actual a 3.3 % con:
 - 1.- Separación del combustible no quemado,
 - 2.- Recuperación del combustible producido,
 - 3.- Separación de los actínidos que son la parte del desecho que tiene vida media mas larga,
 - 4.- Quemar los actínidos en un reactor especial que produce energía adicional
 - 5.- Vitrificar los productos de fisión con vidas medias de 50 años máximo

El remanente del proceso de reprocesamiento es:

- Uranio 335 Combustible para otros reactores
- Plutonio 238, combustible para otros reactores
- Uranio 238, Desecho no radioactivo
- Actínidos menores con vida media muy larga
- Productos de fisión de vida media corta < 50 años
Desecho vitrificado
- Cesio / Estroncio (para usos industriales)
- Tecnecio / Iodo (Para usos médicos)
- ENERGIA obtenida del quemado de los actínidos

Resultado del reprocesamiento



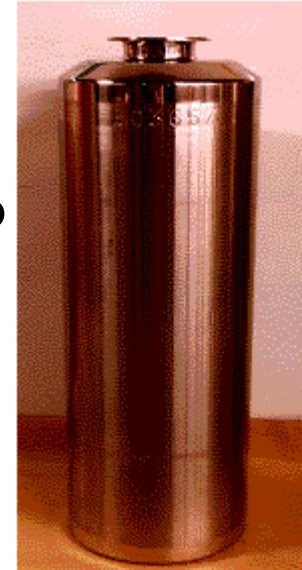
Mixed Oxide (MOx) Nuevo Combustible.

ATW (Accelerated Transmutation of Waste)

- Transmutación de los actínidos alfa emisores de vida media larga en productos de fisión de vida media corta + ENERGIA

(proyecto futuro)

Desecho radioactivo vitrificado y encapsulado en acero (vidas medias menores a 50 años)



Algunas preguntas:

- Que política debe seguir Venezuela?
- Vamos a ingresar en el “**Global Nuclear Energy Partnership (GNEP)**” ?
- Que deberíamos estar haciendo ahora?
- Que hacer con el “**ex-Reactor**” del **IVIC**?

Conclusiones

- Hay un renacer a nivel mundial de la energía nuclear con perspectiva de nuevos desarrollos impulsados por las grandes potencias.
- Existen nuevas tecnologías para la generación de energía nuclear bien investigadas que sólo aguardan trabajo de desarrollo para su implementación a nivel comercial
- Los nuevos conceptos de reactores incorporan elementos de seguridad inherentes que los hacen resistentes a los accidentes nucleares del pasado.
- Existen ciclos de combustible, notablemente el que utiliza el Torio 232 como material fértil, que aprovechan mucho más la energía nuclear del combustible ya que durante su consumo producen más combustible (U233), son resistentes a la proliferación de bombas por cuanto no producen plutonio y simultáneamente sirven para quemar el plutonio existente actualmente.
- Incluyendo en el esquema de generación de energía nuclear el reprocesamiento del combustible, el problema de los desechos adquiere una dimensión y perspectiva totalmente distinta convirtiéndose en un problema manejable.
- Es probable que la energía nuclear se convierta en el proceso más utilizado para atender el incremento de la demanda de generación de energía eléctrica en un futuro mediano (10-25 años)
- Venezuela debería tomar los pasos para participar activamente en los desarrollos de las nuevas tecnologías. Crear los cuadros de personal capacitado que pueda asesorar al Estado, sustentar la participación del país en las nuevas tecnologías energéticas. Mantener la posición de Venezuela como país productor de energía en el futuro.