



ENTREGA N° 13

EL TORIO, OTRO COMBUSTIBLE NUCLEAR

Autores: R. Solanilla/ J. Bertoni

- **El Torio es más abundante en la naturaleza que el uranio**
- **Es fértil en lugar de fisionable, y puede ser utilizado juntamente con material fisionable como combustible nuclear**
- **Combustibles de Torio pueden generar uranio 233, fisionable**

El uso del Torio como una nueva fuente de energía primaria ha sido un proyecto tentador durante muchos años. Extraer el valor de su energía latente de manera económica continúa siendo un desafío que habrá de requerir una considerable inversión en I&D.

LA NATURALEZA Y LAS FUENTES DE TORIO

El Torio aparece en la naturaleza como un metal ligeramente radiactivo y fue descubierto por el químico sueco Jons Jakob Berzelius, que lo llamó así en homenaje a Thor el Dios Escandinavo del Trueno. Se lo encuentra en pequeñas cantidades en la mayor parte de rocas y suelos, donde es cerca de tres veces más abundante que el uranio. Los suelos contienen comúnmente un promedio de 6 partes por millón (ppm) de Torio.

El Torio existe en la naturaleza en forma de un único isótopo-Th 232- que decae muy despacio por emisión alfa (su vida media es del orden de tres veces la edad de la Tierra, catorce mil millones de años), Las cadenas de decaimiento del torio natural y del uranio dan lugar a pequeñas trazas de Th-228, Th-230 y Th-234 pero la presencia de éstos en términos másicos es despreciable. También dan origen al Radio y al Radón (gas radiactivo). El Torio tiene número atómico 90 y en la Tabla Periódica de Mendeleev forma parte de los actínidos (tierras raras).



En su estado puro, el Torio es un metal plateado que retiene su brillo por varios meses. Sin embargo cuando se oxida, el Torio lentamente se empaña con el aire y se torna gris y eventualmente negro. El óxido de Torio (ThO_2), también llamado Toria, tiene uno de los más altos puntos de fusión de todos los óxidos (3300°C). Cuando es calentado en aire entra en ignición y se torna incandescente brillando con una luz blanca. Debido a estas propiedades el Torio ha encontrado aplicaciones en elementos para lámparas de luz, recubrimiento de filamentos de Tungsteno, linternas, lámparas de arco, electrodos de soldadura y cerámicas resistentes al calor. Los vidrios que contienen óxido de Torio tienen un elevado índice de refracción y dispersión y son usados en lentes de cámaras e instrumentos científicos.

La fuente más común de Torio es la monazita, (tierra rara en mineral de fosfato) que contiene hasta cerca de 12% de fosfato de torio, pero 6-7% en promedio. La monazita se encuentra en rocas ígneas y otras rocas pero las más ricas concentraciones se encuentran en depósitos concentrados por ondas y acciones corrientes con otros minerales pesados. Las reservas mundiales de monazita se estiman en unos 12 millones de toneladas, dos terceras partes de las cuales se encuentran en depósitos de arenas de minerales pesados en las costas sur y este de la India. Hay depósitos substanciales en muchos otros países (Ver tabla siguiente). La recuperación del Torio de la monazita requiere usualmente el lavado (leaching) con hidróxido de sodio a 140°C seguido por un complejo proceso para precipitar el ThO_2 puro.

La Torita (ThSiO_4) es otro mineral común. Un gran depósito en forma de veta de Torio y metales de tierras raras está en Idaho. (USA).

La publicación del IAEA-NEA de 2007 *Uranio 2007: Recursos, Producción y Demanda* (Referido como el Libro Rojo), da una cifra de 4,4 millones de toneladas de recursos totales conocidos y estimados, pero esto excluye datos de la mayor parte del mundo. Datos de recursos razonablemente asegurados y supuestos recuperables a un costo de \$80/kg de Th o menos son dados en la tabla siguiente. Algunas de las cifras están basadas en suposiciones y contienen datos de arenas minerales, no datos directamente geológicos en la misma forma que para la mayoría de los recursos minerales.



Recursos de Torio estimados mundialmente

País	Toneladas	% del total
India	846.000	16
Turquía	744.000	14
Brasil	606.000	11
Australia	521.000	10
USA	434.000	8
Egipto	380.000	7
Noruega	320.000	6
Venezuela	300.000	6
Canada	172.000	3
Rusia	155.000	3
Sud Africa	148.000	3
China	100.000	2
Groenlandia	86.000	2
Finlandia	60.000	1
Suecia	50.000	1
Kazakstan	50.000	
Otros países	413.000	8

Total mundial 5.385.000



No hay una clasificación estándar o internacional para los recursos de Torio y los recursos identificados de Torio no tienen el mismo significado en términos de clasificación como identificados que los recursos de uranio. El Torio no es un objetivo primario de exploración y los recursos son estimados en relación con los recursos del uranio y las tierras raras.

Fuente: OECD NEA & IAEA, Uranio 2011 (Libro Rojo)

El Torio como un combustible nuclear

Aunque no es fisionable el Torio (Th-232) absorbe neutrones térmicos y produce Th-233 , que tiene una vida media de solo 22 minutos. Luego por desintegración (beta) decae en el Pa-233 que tiene una vida media de 27 días y luego nuevamente por desintegración forma el U-233 . Es decir el Th-232 es “fértil” y al absorber un neutrón se transmuta en uranio 233 (U-233), que a su vez es un excelente combustible nuclear fisionable. Por lo tanto los conceptos del Torio como combustible requieren que el Th-232 sea primeramente irradiado en un reactor que provea la suficiente dosis de neutrones. El U-233 que así es producido puede, ya sea, ser separado químicamente de su precursor el combustible Torio y reciclado en nuevo combustible, o el U-233 puede ser usable “in-situ” en la misma forma de combustible.

Los combustibles de Torio necesitan un material fisionable como “activador” (para proveer un surplus de neutrones) y mantener así una reacción en cadena. Las únicas opciones para el material activador fisionable son, U-233 , U-235 o Pu-239 (ninguno de los cuales es fácil de proveer).

Es posible, pero muy difícil diseñar combustibles de Torio que produzcan más U-233 en reactores térmicos que el material fisionable que ellos consumen (se dice en ese caso que por el contenido de U-233 , sería tener una relación de conversión mayor que 1.0 y eso también es llamado reproducción “breeding”). La reproducción térmica con Torio es solo posible usando U-233 como el activador fisionable y para lograr esto la economía de neutrones debe ser muy buena (p. e. baja pérdida de neutrones por escapes, o absorciones parasitarias). La posibilidad



de reproducir material fisionable en sistemas con neutrones lentos es una singular característica de los combustibles basados en Torio.

Otra opción distintiva para usar Torio, es como “matriz fértil” para combustibles que contengan plutonio (y aún otros elementos transuránicos como el americio). Del componente de Torio no se produce nuevo plutonio, como en los combustibles de uranio, y así el nivel de consumo neto de este metal es más bien alto. Por ello tiene además la ventaja de no ser “proliferante”.

En combustibles frescos de Torio, todas las fisiones (es decir la energía y los neutrones) derivan de los componentes del “activador”. A medida que el combustible opera el contenido de U-233 aumenta gradualmente y contribuye más y más a la energía generada por el combustible. La potencia máxima del U-233 (por lo tanto indirectamente del Torio) depende de numerosos parámetros de diseño del combustible, incluyendo: el grado de quemado alcanzable, la disposición del combustible, el espectro de la energía de los neutrones y del flujo neutrónico (que afecta al producto intermedio protoactinio-233, que es un absorbedor de neutrones). La fisión del núcleo del U-233 libera aproximadamente la misma cantidad de energía (200 MeV) que la del U-235.

Un principio importante en el diseño de combustibles de Torio es el de **la disposición heterogénea del combustible** en la cual una zona del combustible es altamente fisionable (y por lo tanto de mayor potencia) llamada región “semillera” (“seed”) está físicamente separada de la parte fértil del Torio (baja o cero potencia) del combustible, llamada “blanco”. Este principio se aplica a todos los sistemas de reactor que sean capaces de utilizar Torio.

Reactores con capacidad de usar Torio

Hay siete tipos de reactor en los cuales se puede introducir el Torio como combustible nuclear. Los primeros cinco de ellos han entrado en operación hace ya tiempo. Los últimos dos, son todavía conceptuales:

Reactores de Agua Pesada (PHWRs): Son muy adecuados para el combustible de Torio debido a su combinación de: a) excelente economía de neutrones (su



muy baja absorción parásita de neutrones significa que más neutrones pueden ser absorbidos por el Torio para producir U-233 utilizable), b) más rápida energía promedio de los neutrones que favorece la conversión en U-233, c) flexibilidad en la recarga del combustible con el reactor en marcha. Y algo más, los reactores de agua pesada (en especial el CANDU) están bien establecidos y son de una tecnología ampliamente utilizada de la cual hay abundante experiencia de licenciamiento.

Los combustibles de Torio han sido probados durante los últimos 50 años en los reactores NRX y NRU en AECL, Laboratorios de Chalk River. (Canada). El reactor CANDU tiene una gran flexibilidad como para intercambiar combustibles con base de uranio o con base de Torio sin complicadas modificaciones.

Reactores refrigerados con gas de alta temperatura (HTRs): Son bien adecuados para usar combustible de Torio en forma de partículas de Torio mezclado con Plutonio o uranio enriquecido, revestidos con carbón pirolítico y capas de carburo de silicio que retienen los gases de fisión. Las partículas de combustible están embebidas en una matriz de grafito, que es muy estable a altas temperaturas. Tales combustibles pueden ser irradiados durante períodos muy largos y así quemar profundamente y explotar su carga original fisiónable. Los combustibles de Torio pueden ser diseñados para ambos tipos, el de “esferas” y en los prismáticos en cuanto a la variedad de combustibles HTR.

Reactores de agua liviana hirviente (BWRs): El conjunto de combustibles BWR permite opciones de estructura y composición, tales como barras extra de moderación y/o barras combustibles de mitad de longitud. Esta flexibilidad de diseño significa que pueden ser creados combustibles con Torio bien optimizados para un BWR, por ejemplo, combustibles de Torio-Plutonio que estén optimizados para “quemar” Plutonio. El BWR es un reactor muy bien entendido y de diseño licenciado.

Reactores de agua liviana a presión (PWRs): Pueden ser diseñados combustibles viables de Torio para un PWR, aunque con menos flexibilidad que para un BWR. El combustible tiene que estar en una disposición heterogénea para alcanzar un grado de quemado satisfactorio. No es posible diseñar combustibles basados en el Torio para un PWR que conviertan suficientes cantidades de U-233.



Aún así el reactor PWR no es el reactor perfecto en el cual usar Torio, pero es el caballito de batalla de la industria y hay una gran experiencia de licenciamiento. Ellos son un viable plataforma de entrada para el Torio.

Reactores de neutrones rápidos (FNRs), llamados reproductores rápidos: El Torio puede servir como un componente del combustible en reactores que operen con un espectro de neutrones rápidos, en el cual un más amplio rango de nucleídos pesados son fisionables y podrían potencialmente “activar” un combustible de Torio. No hay sin embargo, ninguna ventaja relativa en usar Torio en lugar de uranio empobrecido (depleted-DE) como combustible en una matriz fértil en este tipo de reactor, debido a una mayor tasa de fisiones rápidas para el U-238 y la contribución a la fisión del U-235 residual en este material. También, hay una gran cantidad de uranio empobrecido disponible para su uso cuando más reactores FNRs estén disponibles comercialmente, de tal manera que el Torio tenga poca o casi ninguna competencia en estos sistemas.

Reactores de sales fundidas (MSRs): Estos reactores se encuentran todavía en la etapa de diseño y serán muy adecuados para usar combustible de Torio. El único combustible fluido incorpora fluoruros de Torio y Uranio (U-233 y/o U-235) como parte de una mezcla de sales que funden entre 400-600°C, y este líquido sirve a la vez como fluido para la transferencia del calor y a la vez como matriz para el combustible fisionable. El fluido circula a través de una región del núcleo y luego a través de un circuito de procesamiento químico donde se remueven varios productos de fisión (venenos) y el valioso U-233. Ciertos diseños de MSR serán hechos específicamente para el combustible de Torio para producir cantidades utilizables de U-233 y lograr eventualmente un uso autosostenido del Torio como una fuente de energía.

Reactores activados por un acelerador (ADS): El sistema subcrítico ADS es un concepto no convencional que es potencialmente apto para el Torio. Se producen neutrones de “espalación” cuando protones de alta energía provenientes de un acelerador, hacen impacto sobre un metal pesado como el plomo. Estos neutrones son dirigidos a una región que contiene combustible de Torio (Th-Pu) el que reacciona produciendo calor como en un reactor convencional.



Primeras generaciones de electricidad con combustible Torio

Ya hubo varias demostraciones significativas del uso de combustibles basados en el Torio para generar electricidad en distintos tipos de reactor. Muchas de estas pruebas tempranas utilizaron uranio altamente enriquecido (HEU) como componente activador fisionable, y estos no serán considerados ahora.

El reactor THTR de alta temperatura, de 300 MWe en Alemania, operó con combustible Torio-HEU entre 1983 y 1989. Más de la mitad de sus 674.000 esferas conteniendo partículas de Th-HEU (el resto moderador de grafito y algunos absorbedores de neutrones). Estas se movían continuamente a través del reactor en operación y en operación, cada esfera pasaba seis veces a través del núcleo.

El reactor HTR Peach Bottom, de 40 MWe en USA fue un reactor de demostración del uso de combustible con Torio que operó desde 1967 hasta 1974, También usó microesferas. Operó durante 1349 días equivalentes a plena potencia con un factor de carga de 74%.

El reactor HTR Fort St. Vrain en Colorado USA fue el successor a escala comercial del reactor de Peach Bottom, y operó desde 1976 hasta 1989. Usó combustible de Th-HEU en forma de microesferas. Fueron utilizadas 25 toneladas de Torio mucho del cual alcanzo un grado de quemado de 170.000 MWd/ton.

Desde 1977 hasta 1982, operó el reactor de Shippingport, un reactor reproductor rápido de agua liviana Usó únicamente Torio como combustible y su activador fisionable fue U-233. El núcleo se colocó en un recipiente de presión de un anterior PWR. Operó a 60 MWe con un factor de disponibilidad del 86%. Las inspecciones pos operación revelaron que hubo 1,39% más combustible fisionable al final de la vida del núcleo, lo que probó que la reproducción se había producido.

Los reactores PHWR de la India han utilizado Torio desde hace mucho tiempo en forma de manojos para aplanar la potencia en algunos canales especialmente al comienzo del núcleo cuando se necesitan especiales medidas de control.

En Inglaterra se utilizó un reactor HTR el Dragon, de 20 MWe desde 1964 y 1973 durante 741 días de plena potencia. Fue operado como un proyecto de



cooperación OECD/Euratom que comprendió a Austria, Dinamarca, Suecia, Noruega y Suiza, además de UK.. El reactor usó combustible Th-HEU en modo de “breed and feed” en el cual el U-233 formado durante la operación reemplazó el consumo del U-235 al mismo ritmo. El combustible pudo ser dejado en el reactor cerca de seis años.

El concepto de reactores de alta temperatura con combustible de Torio están actualmente en desarrollo y forman parte de la llamada Generación IV. Son reactores térmicos y rápidos. El desarrollo de las turbinas de gas de alta temperatura y el dominio de la fabricación del combustible son elementos clave para impulsar estos reactores en el futuro.

Conclusión

La utilización del recurso nuclear actual basado en el ciclo del uranio requerirá fomentar de más en más el uso del Torio para lograr una fuente de abastecimiento prácticamente inagotable. El uso del Torio como combustible nuclear tiene además la ventaja de disminuir los inventarios de los residuos radiactivos particularmente en los reactores térmicos. En los rápidos no se observan diferencias a favor del Torio. Es además antiproliferante.

Se estima actualmente que los recursos de uranio alcanzarían hasta el año 2050-60 (World Energy Council Survey of Energy Resources) con el consumo actual de 70 millones de toneladas anuales, pero será necesario el uso de reactores rápidos (con reciclado de combustible gastado) y el Torio para asegurar la sustentabilidad a largo plazo. De esta forma los cálculos mostrarían que el recurso nuclear estaría asegurado por algunos cientos de años (siglos).

El Torio y el futuro

Con fecha 20 de diciembre de 2013, la agencia REUTERS difundió la siguiente noticia: “Científicos en Shangay intentan un paso gigantesco en energía nuclear: reactores alimentados con Torio como alternativa al uranio”.



El proyecto estará a cargo de la Academia China de Ciencias, que cuenta con un presupuesto de 350 millones de dólares y trabajará en colaboración con el Oak Ridge National Laboratory de USA un instituto del gobierno de Estados Unidos.

Los científicos chinos y americanos dicen que los reactores alimentados con Torio, tienen el potencial de ser mucho más eficientes, más seguros y más limpios que la mayoría de los reactores que hoy están en operación.

FUENTE: Este resumen ha sido extraído fundamentalmente de la información provista por WNN (World Nuclear News)