

CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

*Guillermo Baltra Aedo
Capitán de Corbeta*

PROLOGO

El último tercio del siglo XX ha estado marcado preferentemente por la situación de los energéticos, y una simple extrapolación indica que esta preocupación seguirá dominando la esfera internacional en la próxima centuria. El control o (en su defecto) el libre acceso a los recursos energéticos se ha convertido en un tópico de elevado interés en las relaciones entre los Estados.

Todos los recursos energéticos se caracterizan por seguir una secuencia de actividades, desde que se les extrae hasta que sus desechos sin valor o perjudiciales son eliminados; esta secuencia recibe el nombre de Ciclo del Combustible, y el combustible nuclear, al igual que todos, posee el propio. El ciclo del combustible nuclear tiene la característica de que el dominio tecnológico de cada etapa acrecienta la libertad de acción Internacional del país, hasta llegar al punto de que controlando todas sus etapas (cerrando el ciclo) se logra la independencia. Esto permite al país tomar decisiones estratégicas, prescindiendo de factores externos.

ETAPAS DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

El flujo de materiales del ciclo del combustible nuclear se inicia en la mina y termina en el depósito permanente de residuos radiactivos. Entre estos dos extremos, el mineral sufre una serie de transformaciones para volverse útil; inclusive, después de usado se le procesa para rescatar los remanentes valiosos. Cada transformación representa una etapa en este ciclo, y estas se muestran en el gráfico N° 1. Para una mejor comprensión se analizará esta cadena de procesos, eslabón por eslabón.

Extracción del mineral

El proceso se inicia en la mina (etapa 1), donde el uranio se explota como mineral primario, en forma de pechblenda, carnotita, autunita, u otro tipo. En general, los minerales de uranio se presentan como óxidos de composición variable, que se encuentran mezclados con otros elementos, tales como potasio, vanadio, fosforo, etc. Las mejores leyes conocidas alcanzan a un 4%; por lo tanto, se requiere la extracción de enormes cantidades de material para obtener cantidades significativas del óxido de uranio útil.

Producción de la torta amarilla

Con el objeto de evitar el transporte de mineral inútil y facilitar las transacciones comerciales, el material extraído de la mina se somete a procesos de chancado, disolución en ácido y separación del mineral de uranio de sus acompañantes, mediante una extracción por solvente o intercambio iónico. El resultado es un producto de color azafrán, denominado diuranato de amonio, pero más conocido como torta amarilla (etapa 2). Este compuesto contiene aproximadamente un 70% de óxidos de uranio, por lo que debe ser sometido a refinados posteriores para lograr una pureza compatible con los usos nucleares.

Purificación del uranio

Las refineras de uranio reciben la torta amarilla y la disuelven en ácido nítrico obteniéndose una solución acuosa denominada UNH (nitrato de uranio hexahidratado). Esta disolución se somete a una purificación extensa mediante una nueva extracción por solventes (etapa 3).

El UNH, ahora de pureza nuclear, se precipita mediante un agregado de amoníaco, y, posteriormente se calcina (subiéndole la temperatura). El resultado final es un material de color anaranjado denominado trióxido de uranio (UO_3), y para los efectos prácticos esta libre de impurezas que interfieran las futuras reacciones nucleares.

En este punto, el ciclo sufre una bifurcación, dependiendo si se utilizará el uranio en reactores de agua liviana o pesada.

Conversión a hexafluoruro de uranio

Los reactores moderados con agua liviana, entre ellos los navales, requieren de un uranio cuya composición en el isótopo 235 sea mayor que la encontrada en la naturaleza (uranio enriquecido). Para enriquecer el uranio se le somete previamente a un proceso de conversión en hexafluoruro de uranio, UF_6 (etapa 4).

La conversión de UO_3 en UF_6 sigue tres etapas:

En primer lugar, el UO_3 se reduce a UO_2 mediante la adición de gas de amoníaco.

En segundo término, el UO_2 se convierte en tetrafluoruro de uranio (UF_4), al hacerlo reaccionar con ácido fluorhídrico (HF).

Finalmente, el UF_4 se combina con gas de flúor (F_2) para obtener UF_6 , un condensado excepcionalmente puro (99,97%) y que gasifica a la temperatura de 56 °C bajo una atmósfera de presión.

Enriquecimiento

El uranio natural puro es una mezcla de los isótopos 235 y 238, con un 0,71% en peso del primero, y como es justamente el $\text{U}235$ el que se requiere en la reacción de fisión, la relación inicial en peso se aumenta en favor de éste, mediante el proceso denominado de enriquecimiento (etapa 5).

Existen variadas formas de enriquecer el uranio, basadas en su mayoría en la diferencia relativa de peso de los isótopos. El método más eficiente es el de la centrifugación, en el cual se inyecta UF_6 gaseoso a una centrífuga de alta velocidad; los átomos de $\text{U}238$ más pesados se recogen en la periferia mientras que los átomos de $\text{U}235$ más livianos se extraen por el centro. Al repetir el proceso en cascadas múltiples se pueden obtener enriquecimientos superiores al 90%.

Tanto el UF_6 enriquecido, como el empobrecido, se envían a una etapa de reducción a sólido para su mejor manejo.

Reducción del hexafluoruro de uranio

En esta etapa, la sexta, confluye la bifurcación; la planta de reducción recibe UO_3 natural, UF_6 enriquecido, o UF_6 empobrecido, los reduce a metal u óxido cerámico.

El UO_3 (natural), mediante el agregado de amoníaco se reduce, en UO_2 (natural) que es uno de los productos esperados, consistiendo de un polvo de color café.

Si se desea uranio metálico natural, el UO_2 se lleva a UF_4 por el proceso ya descrito, y posteriormente se reduce con magnesio.

El UF_6 enriquecido se reduce a UF_4 con la adición de hidrogeno, en este punto se elige reaccionar el UF_4 con magnesio para obtener uranio metálico, o bien hacerlo reaccionar con vapor de agua para obtener UO_2 . En ambos casos se obtiene un material tal, que si su grado de enriquecimiento supera el 90% es adecuado para fabricar explosivos nucleares.

El uranio empobrecido, ya sea en forma metálica o de óxido cerámico, se lleva a un almacén de uranio agotado.

Fábrica de combustibles

Tanto el uranio metálico (natural o enriquecido), como el óxido cerámico de uranio (natural o enriquecido), debe ser tratado convenientemente para conformarlo e instalarle las protecciones mecánicas adecuadas para su uso como combustible nuclear; esto se realiza en la fábrica de combustible (etapa 7).

El uranio metálico puede fabricarse por los métodos clásicos, incluyendo fundición, laminado, extrusión, forja, apilado por matrices, estirado y mecanizado, con la condición que cuando se encuentre en altas temperaturas se le trabaje en atmósfera de gas inerte. Para su empleo en el reactor, el U (metal) se envaina en una aleación de magnesio.

La fabricación del elemento combustible de UO_2 parte de su estado pulverizado (color café), para ser prensado en frío y luego sintetizado en una atmósfera neutra de alta temperatura, obteniéndose unas pastillas que luego son introducidas en vainas, fabricadas de una aleación metálica que prácticamente no absorbe neutrones (Zircanoy).

Quemado del combustible en el reactor

Los elementos combustibles son introducidos en el reactor nuclear (etapa 8), donde sufren las reacciones de fisión mediante las cuales liberan su energía, quedando conformados, al final de su vida útil, en una mezcla de productos de fisión altamente radiactivos, uranio no fisionado, y de plutonio originado por la exposición del $\text{U}238$ al flujo neutrónico. Los elementos combustibles usados son retirados del reactor y depositados temporalmente en una piscina de enfriamiento, por un plazo aproximado de 120 días, con el objeto de esperar a que decrete su radiactividad y calor residual.

Reprocesamiento del combustible quemado

Dado que en el interior de los elementos combustibles quemados existen especies de valor, se somete a éstos (etapa 9) a un proceso químico que separa los materiales útiles (U y Pu) de los fragmentos de fisión (residuos radiactivos). El procedimiento de separación química más conocido es el Purex, el que -someramente- consiste en los siguientes pasos:

1. Extracción mecánica de las vainas, para liberar las pastillas irradiadas; en su defecto, se procede a cortar el elemento en rodajas.
- 2.-Disolución de las pastillas o rodajas en ácido nítrico.
3. Primera extracción por solvente para separar el U y Pu de los productos de fisión.
4. Se agrega un agente reductor para cambiar el estado de oxidación del Pu, y así hacerlo diferenciable del U.
5. Segunda extracción solvente para separar el Pu del uranio.

El resultado del proceso son un flujo de solución de nitrato de plutonio y otro de nitrato de uranio, que se dirigen a etapas distintas.

La planta de reprocesamiento recibe también los combustibles irradiados en los reactores reproductores (si los hubiera); estos combustibles tienen un contenido mayor de plutonio, el cual es extraído por el mismo proceso.

Los productos de fisión que no tienen valor comercial son reducidos a un estado de vitrificación y se envían a depositar en el almacén de residuos radiactivos (etapa 14).

Mezcla con uranio o plutonio

El flujo de nitrato de uranio se somete a un proceso de secado y calcinación, convirtiéndolo en UO_2 , que luego se mezcla mecánicamente (etapa 10) con otros UO_2 , o bien con el PuO_2 que se disponga. Esta mezcla de óxidos se recicla hacia la etapa 7 de producción de elementos combustibles, repitiéndose el proceso completo.

Reducción a metal u óxido de plutonio

La solución de plutonio proveniente de la planta de reprocesamiento se somete a un proceso (etapa 11) de evaporación y calcinación para obtener óxido del plutonio PuO_2 (un polvo de color verde). Para lograr Pu metálico se hace reaccionar el PuO_2 con calcio (Ca), cuidando que la reducción se efectúe en atmósfera de gas inerte.

Se debe hacer notar que tanto el PuO_2 como el Pu (metal), que se obtienen en esta etapa, son materiales muy sensibles, y dependiendo de su contenido de Pu239 se vuelven aptos para usos en explosivos nucleares.

Una parte del PuO_2 producida se envía hacia la mezcla con UO_2 (etapa 10), y otra parte se envía hacia la fábrica de combustibles en base a plutonio (etapa 12).

Fábrica de combustibles de plutonio

La fábrica de combustible de plutonio (etapa 12), cumple los mismos fines que la de uranio, agregándose si la dificultad extra que el plutonio es un material extremadamente tóxico, y por lo tanto se toman precauciones de seguridad mucho más estrictas aun durante su manejo.

Reactor reproductor

El reactor reproductor (etapa 13) es un sistema que aún se está probando a escala prototipo industrial. Consiste básicamente en un núcleo de plutonio rodeado de uranio natural o empobrecido. Este uranio durante la operación del reactor, captura neutrones transformándose a su vez en plutonio.

Como la tasa de generación de plutonio es mayor que la del quemado en el núcleo, recibe el nombre genérico de reproductor. El núcleo quemado, más el uranio irradiado con el plutonio recién generado en su interior, se envía hacia la planta de procesamiento para la separación del plutonio de los residuos sin valor, cerrándose así el otro brazo del ciclo.

CONSECUENCIAS DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

El ciclo del combustible nuclear ya descrito está compuesto por una serie de etapas bastante complejas y muy costosas, especialmente, las plantas de enriquecimiento y de reprocesamiento.

Es muy raro que algún país domine el ciclo del combustible nuclear completamente, ya que sus necesidades generalmente quedan satisfechas con algunas etapas del diagrama; desde un punto de vista netamente económico, para la mayoría de las naciones su posesión total resulta injustificable. Además, los países que dominan el ciclo completo desean mantener para sí la tecnología de enriquecimiento y del reprocesamiento, como un medio de evitar que el plutonio y el uranio enriquecido, considerados como materiales sensibles por sus usos bélicos, se repartan entre otros países. También está el deseo de los países industrializados de mantener el control del recurso energético, haciendo depender a los usuarios nucleares de su voluntad política y económica.

En consecuencia, dado que las plantas de enriquecimiento y/o reprocesamiento son las más costosas y más complejas, cuando un país las posee cierra su ciclo de combustible se libera técnicamente de las presiones foráneas y puede producir a voluntad combustible para reactores, o bien para artefactos nucleares.