

Conversión de reactores de investigación con el fin de utilizar combustibles de uranio poco enriquecido

por R.G. Muranaka*

Actualmente existen en 52 países unos 350 reactores de investigación de una potencia entre menos de un vatio y más de 100 megavatios. Esos reactores se utilizan en todos los campos de la ciencia y de la tecnología. Las principales utilizaciones comprenden actualmente las investigaciones fundamentales, la producción de radisótopos, el análisis por activación neutrónica y el ensayo de materiales.

Los primeros reactores de investigación construidos durante la década de los 40 eran dispositivos de poca potencia utilizados principalmente para el estudio de la física y tecnología de reactores.

En la década de los 50 y en la de los 60 se construyeron en todo el mundo reactores de investigación de baja potencia que utilizaban combustible de uranio enriquecido al 20% o menos en ^{235}U en peso, es decir, uranio poco enriquecido (UPE). Tal valor se eligió porque se consideraba que constituía un obstáculo totalmente adecuado para la utilización del ^{235}U para la fabricación de armas nucleares. Ahora bien, el aumento de la utilización de reactores de investigación en investigaciones fundamentales, ensayo de materiales y producción de radisótopos creó la necesidad de disponer de potencias específicas superiores y de concentraciones mayores en ^{235}U , lo que condujo a la sustitución del combustible de UPE previamente utilizado por uranio muy enriquecido (UME), es decir con un enriquecimiento del 70% e incluso del 90%. El combustible de UME tenía también otras ventajas: era más económico, podía utilizarse durante más tiempo en el núcleo del reactor y tenía una reactividad específica superior. El UME resultó fácil de obtener y se utilizó no solamente para reactores de potencia elevada sino también para reactores de poca potencia, en los que el combustible poco enriquecido hubiese sido suficiente.

Pero en la década de los 70, renació la inquietud de que, con algunos combustibles mediante ciertas técnicas de los ciclos del combustible, se podrá lograr fácilmente la fabricación de armas nucleares. Dado que un enriquecimiento inferior al 20% se admite internacionalmente como barrera insalvable contra la utilización del uranio para armamentos, algunos Estados Miembros han adoptado medidas para minimizar el comercio internacional de uranio muy enriquecido y han establecido programas para desarrollar los medios técnicos para modificar los reactores de modo que puedan utilizarse en ellos sin mayores dificultades combustibles poco enriquecidos. Esto puede suponer la introducción de modificaciones en el diseño del reactor y la preparación de nuevos combustibles. Como resultado de tales programas se espera que la mayoría de los reactores

puedan convertirse de modo que pueda utilizarse en ellos combustible poco enriquecido.

También constituye motivo de preocupación la cantidad de plutonio existente en el combustible irradiado, especialmente cuando éste es poco enriquecido o ha sido irradiado en reactores que funcionan a potencia elevada. Tanto el plutonio producido como el grado de enriquecimiento del uranio deben tenerse en cuenta en la evaluación global de las posibilidades de proliferación que ofrece un determinado reactor. Por ejemplo, en un reactor característico de 2 MW que utilice uranio enriquecido al 20%, se prevé que un elemento combustible, en el momento de su descarga del núcleo del reactor, contendrá aproximadamente 10 gramos de plutonio. Con reactores alimentados con combustibles mucho menos enriquecidos el contenido de plutonio puede ser de 3 a 4 veces superior.

Criterios de conversión

Para evaluar la practicabilidad de convertir los reactores de investigación existentes para poder utilizar en ellos combustible menos enriquecido es preciso tener en cuenta tres factores:

- Los márgenes de seguridad y de fiabilidad del combustible no deben ser inferiores a los obtenidos en reactores de diseño actual basados en combustible muy enriquecido.
- No deben ser necesarias modificaciones importantes en el reactor.
- La pérdida de rendimiento del reactor (por ejemplo, el flujo por unidad de potencia) debe ser solamente marginal y no deben aumentar los costos de funcionamiento.

Debe evaluarse en particular para cada reactor la viabilidad de su conversión para poder utilizar combustible menos enriquecido. Existen aplicaciones específicas de los reactores de investigación en estudios de física básica, ensayo de materiales o producción de algunos isótopos que requieren elevado flujo de neutrones, lo cual puede conseguirse solamente utilizando combustible muy enriquecido.

En los diseños existentes del combustible la simple sustitución de éste por uranio menos enriquecido reduciría el rendimiento del núcleo e impedirían que se cumplan los criterios anteriores. La reactividad en el núcleo disminuye, el grado de quemado del ^{235}U decrece y aumentan los costos del combustible y/o debe aumentarse el tamaño del núcleo y por lo tanto disminuye la producción de flujo por unidad de potencia.

Es posible reducir el enriquecimiento del combustible para la mayoría de los diseños de reactores de investigación y de ensayo siempre que la cantidad de ^{235}U en el elemento combustible pueda mantenerse aproximada-

* El Sr. Muranaka es funcionario de la Sección de Física de la División de Investigaciones y Laboratorios del Organismo.

mente la misma, a pesar de la disminución del enriquecimiento. De hecho, es necesario aumentar el contenido en ^{235}U del combustible para compensar la pérdida de reactividad debida al aumento de absorción de neutrones por el ^{238}U presente.

Igualar el contenido en ^{235}U (es decir, mantener el mismo peso de ^{235}U en los elementos combustibles de UPE y UME) daría como resultado un flujo por unidad de potencia en el núcleo comparable al del reactor no modificado; pero, a causa del efecto de absorción de neutrones del ^{238}U , se produciría una disminución de reactividad y de grado de quemado potencial de los átomos de ^{235}U . El grado de quemado potencial puede equipararse al del reactor no modificado aumentando el contenido en ^{235}U , en el núcleo con enriquecimiento reducido, del 12 al 15% con respecto al caso de enriquecimiento del 93%, aunque entonces disminuye el flujo de neutrones térmicos por unidad de potencia en el núcleo. La importancia de estos efectos en el flujo depende del tipo de reactor, de la utilización a que se destine y del sistema de conversión adoptado. Por ejemplo, la disminución del flujo térmico en el reflector que rodea al núcleo y en las trampas de flujo es en general mucho menor que en el núcleo. Los costos podrían reducirse aumentando la duración del ciclo del combustible mediante un aumento mayor del contenido en ^{235}U .

Para aumentar la cantidad de uranio en cada elemento combustible se puede o bien aumentar el volumen de la parte de elemento combustible ocupada por el uranio o bien aumentar la cantidad de uranio contenido en el volumen disponible.

Aumentar el espacio dentro del elemento combustible que contiene uranio puede requerir diseñar de nuevo dicho elemento. Existen tres posibilidades: disminuir el grosor de la vaina, disminuir el volumen del canal por el que fluye el refrigerante, y aumentar el grosor de la placa de combustible disminuyendo de este modo el número de placas por elemento. Una de las funciones de la vaina del combustible es retener los productos de fisión dentro del elemento y evitar que se dispersen en el refrigerante. El grosor de la vaina solo puede reducirse hasta el mínimo necesario para la retención de los productos de fisión. El volumen del elemento combustible destinado a que fluya el refrigerante a través de él no puede reducirse demasiado si se quiere evitar una disminución excesiva de presión a través del núcleo y se debe moderar adecuadamente el flujo neutrónico en dicho núcleo. La reducción del número de placas puede estar limitada por la superficie mínima de transmisión de calor necesaria para evitar una indeseable ebullición a una determinada potencia del reactor.

Estas limitaciones pueden hacer difícil aumentar en buena medida el volumen que contiene uranio dentro del elemento combustible en algunos reactores de elevado rendimiento que están diseñados para funcionar cerca de su límite termohidráulico. Ahora bien, en la mayoría de los reactores de investigación y ensayo en funcionamiento, y en especial en los de baja potencia, este volumen puede aumentarse hasta valores superiores a los actuales.

Aumentar la cantidad de uranio introducido en el elemento combustible, sin modificar su grosor, tiene

solamente efectos despreciables sobre las propiedades termohidráulicas del núcleo y, por lo tanto, normalmente no requiere diseñar de nuevo el elemento combustible. (Solamente en algunos casos infrecuentes podría ser útil aumentar el volumen de refrigerante para moderar el espectro neutrónico, endurecido por el aumento del contenido en uranio.) La única limitación para este procedimiento la constituye la densidad mayor de uranio viable gracias a la tecnología hoy más avanzada de fabricación del combustible. Este procedimiento puede aplicarse inmediatamente a todos aquellos reactores de investigación y ensayo en los que la densidad de uranio en el combustible sea inferior a la que permite la tecnología actual. Si el procedimiento se ha de aplicar a los reactores que utilizan ya la tecnología de fabricación del combustible más avanzada, entonces será necesario desarrollar nuevas técnicas de fabricación que produzcan densidades de uranio todavía mayores. Dichas nuevas técnicas de fabricación se están desarrollando en la Argentina, Canadá, Francia, la República Federal de Alemania, Japón, los Estados Unidos de América y el Reino Unido. Pero transcurrirán varios años hasta que se consiga un combustible con las propiedades deseadas.

Para el combustible Triga U-ZrH_x (véase el recuadro), la reducción del enriquecimiento se consigue mediante un aumento de la concentración de uranio en la aleación UZrH_x. La geometría del elemento combustible permanece idéntica a la de la versión del elevado enriquecimiento a la que sustituye.

Los principales materiales combustibles utilizados actualmente en reactores de investigación pueden caracterizarse como sigue:

Aleación de uranio-aluminio (U-Al) con densidades de uranio de hasta 1,1 g/cm³, pero a menudo inferiores a 1 g/cm³;

Dispersión de polvo de aluminio de uranio en una matriz de aluminio (UAl_x-Al) con densidades de hasta 1,7 g/cm³;

Dispersión de polvo de óxido de uranio en una matriz de aluminio (U₃O₈-Al) con densidades de hasta 1,7 g/cm³;

Aleación de uranio e hidruro de circonio (U-ZrH_x) con densidades de hasta 1,3 g/cm³ (denominada normalmente combustible de reactor Triga);

Combustible de óxido de uranio (UO₂) con densidades de hasta 9,1 g/cm³.

Un nuevo material en desarrollo es el siliciuro de uranio (U₃Si) en masa o disperso en aluminio (U₃Si-Al).

Se prevé su desarrollo con 12 y 8 g/cm³ respectivamente.

Desarrollo de combustibles

El principal objetivo de estos programas de desarrollo de combustibles es mejorar los combustibles existentes y concebir nuevos para reactores de investigación y ensayo de modo que su carga de uranio sea la máxima viable con el fin de mejorar el rendimiento de reactores con combustible de enriquecimiento reducido. La labor de desarrollo se ha dividido en dos sectores; la conversión de los combustibles actualmente utilizados para hacer máxima su carga de uranio, y el desarrollo de nuevos combustibles de elevada densidad.

En el Cuadro se resume el grado en que sería posible aumentar la densidad del uranio y reducir el enriqueci-

Densidad y enriquecimiento del uranio – potencial de reducción de éste en posibles combustibles para reactores de investigación y ensayo (con combustibles tipo placa)

Tipo de combustible	Carga actual de uranio (g/cm ³)	Carga de uranio a corto plazo (g/cm ³)	Carga de uranio a largo plazo (g/cm ³)	Potencial de reducción del enriquecimiento actual/a corto plazo/a largo plazo (%)		
				Reactores de baja potencia	Reactores de alta potencia	Reactores de muy alta potencia
Aleación U-Al	1,1	1,3	~ 1,6	< 20	70/45/45	93
UAl _x -Al	1,7	2,2 a 2,6	2,6 a 2,8	< 20	45/20/20	93/45/45
U ₃ O ₈ -Al	1,7	2,2 a 3,3	3,3 a 3,8	< 20	45/20/20	93/45/45
UO ₂	9,1*	—	—	< 20	< 20	< 20**
U ₃ Si-Al	—	4,2 a 6,0	7,0 a 8,0	< 20	93/20/20	93/45/20
U ₃ Si (en masa)	—	—	~ 11	< 20	93/93/20	93/93/20

* 8,7 si los espaciadores de zircaloy están incluidos en el elemento activo (meat) del combustible. La densidad del UO₂ es 10,3 g/cm³.
 ** Para reactores de muy alta potencia el UO₂ tendría que fabricarse en secciones muy delgadas para facilitar la evacuación adecuada del calor.

miento de los actuales combustibles tipo placa. Se espera que sea posible conseguir un combustible base de aleación U-Al que contenga de 1,6 a 1,9 g de U/cm³; ahora bien, este logro permitirá solamente convertir reactores de poca potencia para que utilicen combustible de bajo enriquecimiento. Los combustibles a base de aluminio y U₃O₈ en dispersión podrían alcanzar densidades de uranio de hasta 2,8 y 3,8 g/cm³ respectivamente, lo que haría posible utilizar combustible de bajo grado de enriquecimiento en reactores de alta potencia. Esto se basa en el supuesto de que fuera posible fabricar combustibles que contengan el 60% en volumen de uranio disperso. Si, como es más probable, solamente es posible el 50% de dispersión, entonces la dispersión de aluminio podría no permitir la conversión de reactores de elevada potencia, a menos que se modificase algo el grosor del combustible y la geometría de los elementos combustibles. Esto podría ser igualmente cierto para las dispersiones de U₃O₈. Existe poca o ninguna experiencia respecto de los grados elevados de quemado con estas variaciones de los combustibles actualmente utilizados; por otra parte, existe abundante experiencia positiva con cargas inferiores de uranio. Esto sugiere que, si puede fabricarse convenientemente una dispersión uniforme de combustible con carga elevada, existe una alta probabilidad de que posea un comportamiento satisfactorio en cuanto a la irradiación.

Poseemos cierta experiencia relativa a la irradiación en el caso de los nuevos combustibles de densidad elevada. En lo que concierne a la carga de uranio, estos materiales son más que adecuados, y puede utilizarse la tecnología hoy existente de dispersión del uranio en el combustible. No obstante, debe tenerse en cuenta la compatibilidad del compuesto combustible con la matriz. Por ejemplo, el siliciuro de uranio (U₃Si) debe hallarse estabilizado para que su lenta reacción en el núcleo con el aluminio no provoque grandes aumentos de volumen. Dichas dispersiones con un 50% o más en volumen de combustible disperso permitirían la conversión incluso de reactores de investigación de la mayor potencia.

Es probable que el U₃Si pueda utilizarse como dispersante en aluminio. Su aumento de volumen por reacción para formar UAl₃ puede reducirse o retrasarse por adición de aleación. Como se indica en el Cuadro, el U₃Si proporciona una carga de uranio mucho mayor que

volúmenes iguales de U₃O₈ o UAl_x. La adición de una aleación no reduciría mucho la carga de uranio. La utilización de dispersión de aluminio supondría la posibilidad de utilizar la tecnología actual, en vez de alguna tecnología avanzada que podría requerir vainas de zircaloy o de otro material más rígido. Ahora bien, la gran diferencia de densidad entre el U₃Si y el aluminio requeriría mayor cuidado en la mezcla de polvos con objeto de mantener la distribución homogénea de las partículas de combustible.

Revisiones del análisis de seguridad y concesión de licencias

La utilización de nuevos elementos combustibles en un reactor de investigación requeriría que el actual informe del análisis de seguridad del reactor se revisase para evaluar el nuevo conjunto de factores de seguridad. La cantidad de trabajo necesaria dependerá de las características particulares del reactor, de las modificaciones ocasionadas por la conversión, de los detalles del documento existente del análisis de seguridad y de los requisitos de la autoridad encargada de la concesión de licencias. Las principales cuestiones comprenderán el efecto de las modificaciones del enriquecimiento y de la tecnología del combustible sobre los coeficientes de reactividad relativos a la temperatura y a los huecos, los criterios termohidráulicos de seguridad, la retención de los productos de fisión y la eficacia del sistema de control. También la acumulación de plutonio en los elementos combustibles es una cuestión a tener en cuenta respecto de la seguridad, las salvaguardias, y para la concesión de licencias, y debe incluirse en la revisión del análisis de seguridad. La responsabilidad principal del informe del análisis de seguridad debe incumbir a la organización titular del reactor. El OIEA está preparando una nueva Guía que trata de las cuestiones de seguridad y de concesión de licencias planteadas por la conversión del núcleo.

Efectos sobre la utilización

Es importante evaluar plenamente el efecto de la conversión sobre la utilización proyectada del reactor. Por ejemplo, para cada tipo particular de conversión es importante evaluar cómo pueden resultar afectados los programas proyectados para el reactor de irradiación,

la producción de isótopos y las investigaciones de haces de neutrones. De este modo pueden determinarse los ajustes necesarios y diseñarse la conversión de modo que convenga del mejor modo posible para los planes existentes.

Resultados de los cálculos

Un grupo de consultores de Estados Miembros del OIEA se viene reuniendo periódicamente desde 1978 para estudiar las cuestiones técnicas y de seguridad relacionadas con la conversión del núcleo. Las cuestiones técnicas se estudian en la Guía IAEA-TECDOC-233 titulada *Research reactor core conversion from the use of highly enriched uranium to the use of low enriched uranium fuels*, Viena (1980).

Resumiendo los resultados de los cálculos realizados por dicho grupo de consultores pueden deducirse las siguientes conclusiones:

- La conversión de algunos reactores de combustible enriquecido al 93% a combustible enriquecido al 45% puede lograrse fácilmente sin modificar el diseño de los elementos combustibles sustituyendo simplemente el combustible antiguo por el nuevo combustible fabricado a base de la tecnología actual de fabricación de combustible. Los cálculos indican modificaciones de flujo muy reducidas en las regiones experimentales, lo que hace dicha conversión totalmente viable.
- Con una densidad de uranio en el combustible de 2,83 a 2,91 g/cm³, el reactor podría convertirse al 20% de enriquecimiento. La duración del ciclo del combustible sería igual que la correspondiente al reactor con combustible muy enriquecido sin modificación del grosor del combustible o de la geometría de los elementos com-

bustibles. Así, pues, las características termohidráulicas quedarían prácticamente inalteradas.

La masa de ²³⁵U aumentaría del 15 al 18%. Por lo tanto, se reduciría la eficacia de las barras de control. Por otro lado, también sería menor la variación de la reactividad durante el quemado. Por ello, no sería necesaria ninguna modificación del sistema de control.

El flujo de neutrones térmicos en las regiones con combustible se reduce también en el mismo porcentaje aproximadamente en que aumenta la masa de ²³⁵U. Ahora bien, en la región del reflector cercana al combustible, el flujo térmico se recupera rápidamente hasta alcanzar el valor del caso UME. El flujo es solamente inferior en un pequeño porcentaje en un canal o posición de irradiación característicos dentro o fuera del núcleo (véase la Figura).

- El reactor podría convertirse al 20% de enriquecimiento con la misma duración del ciclo del combustible, pero con requisitos inferiores en cuanto a densidad de uranio cuando aumenta el grosor del combustible. Esto puede conseguirse reduciendo el canal del refrigerante y/o el número de placas del combustible en los elementos, con tal que las condiciones termohidráulicas permitan dicha reducción.

Es probable que el desarrollo en curso de nuevos combustibles proporcione los medios técnicos para reducir el enriquecimiento en los reactores de investigación y ensayo sin disminuir notablemente su rendimiento. Las variaciones de los combustibles normalmente utilizados permitirán la conversión de reactores de potencia media y baja, en tanto que los nuevos combustibles de elevada densidad permitirán la conversión de reactores de investigación de potencia superior.

