
Uso de Hafnio en Barras de Control de Reactores Nucleares

José Ramón Ramírez S., Gustavo Alonso V.
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Ocoyoacac 52045 Estado de México
jrrs@nuclear.inin.mx , galonso@nuclear.inin.mx

Resumen

Recientemente el uso de hafnio como material absorbedor de neutrones en reactores nucleares ha sido motivo de investigación, en virtud de que este material tiene propiedades nucleares en cuanto a la absorción de neutrones y estructurales, que pueden prolongar la vida útil de los mecanismos de control de los reactores nucleares. En este trabajo se presentan algunas de las propiedades más significativas del hafnio como material nuclear. Se presentan también cálculos realizados con el código HELIOS para celdas de combustible de óxido de uranio y de óxidos mixtos de uranio y plutonio en condiciones controladas con barras de carburo de boro convencionales y también con barras similares a las cuales se les sustituyó el material absorbente por hafnio metálico, los resultados se presentan en este trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

El Hafnio es un metal que se obtiene como subproducto de la producción del zirconio. Con el uso del zirconio en las partes estructurales de los reactores nucleares térmicos surgió la necesidad de purificar el zirconio completamente y de ahí que se desarrollaran los métodos y la tecnología para la obtención del Hafnio. Al menos dos circunstancias motivaron el uso del hafnio en la ingeniería nuclear:

- La disponibilidad de Hafnio como resultado del aumento en la producción del zirconio.
- Excelentes propiedades físicas y nucleares, como son: alta resistencia y plasticidad además de buena resistencia a la corrosión y a la radiación.

El Hafnio tiene una sección eficaz de absorción de neutrones térmicos alta, lo que lo hace un buen candidato como material absorbedor y ser utilizado en los mecanismos de control de reactores nucleares. Aun más, este material podría ser usado en instalaciones de almacenamiento, construcción de instalaciones para reprocesar el combustible radiactivo, contenedores y blindajes, permitiendo, debido a sus excelentes propiedades físicas, extender la vida de servicio de los mecanismos de control de reactores nucleares.

2. HAFNIO COMO ABSORBEDOR

Una de las características más deseables para un material absorbedor de neutrones es, que mantenga su eficiencia de absorción durante toda la vida útil del reactor, características que el hafnio parece reunir a través de numerosas pruebas mecánicas, químicas y de radiación de largo plazo.[1]

El hafnio natural consiste de seis isótopos estables, cada uno de los cuales tiene una sección eficaz de absorción de neutrones considerablemente alta, por lo que muchos investigadores han establecido que el hafnio puede ser usado durante largos períodos de tiempo bajo irradiación sin una pérdida significativa de su eficiencia física. Mecanismos de control fabricados con hafnio e irradiados durante 15 años hasta fluencias de 3×10^{22} n/cm², disminuyeron su eficiencia en aproximadamente 6% a 7%. Esto se debe a que, cuando un átomo de hafnio absorbe un neutrón, se forma un nuevo isótopo con alta eficiencia de absorción. Esta disminución de eficiencia procede de una forma más lenta que en las barras de control de aleación Ag-In-Cd, por ejemplo. [2]

La estructura de las resonancias del hafnio es muy compleja, tiene siete picos de resonancia con valores altos de sección eficaz localizados en un rango de energía de los neutrones de 1.0 a 100 eV, debido a que la captura por resonancia es considerable, la eficiencia de los mecanismos de control fabricados con hafnio no depende de los cambios de potencia del reactor. Las resonancias del Hafnio se muestran en la Figura 1.

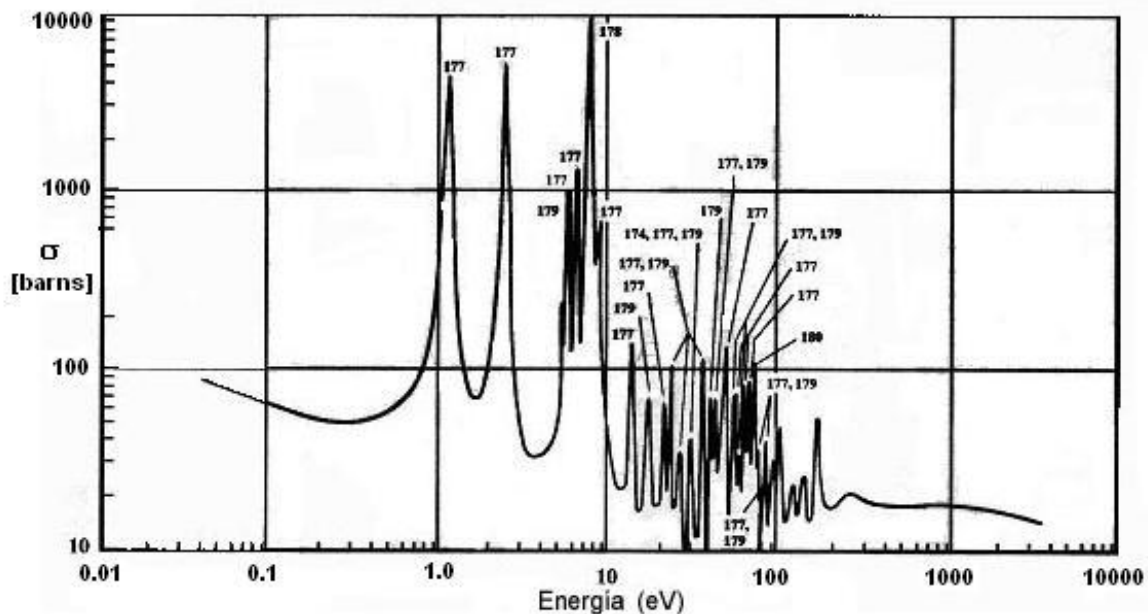


Figura. 1 Resonancias del Hafnio. Gráfica de la Sección eficaz de absorción contra la energía.

Debido a la capacidad de absorber neutrones de alta energía, el Hafnio es un material más efectivo de lo que podría creerse tan solo analizando los datos de la sección eficaz de absorción del Hafnio[3]. La tabla 1 reporta datos de las secciones eficaces de los diferentes isótopos de Hafnio y de los isótopos formados al final de la cadena.

Tabla 1. Secciones eficaces de absorción de los isótopos del hafnio

Isótopo	Porcentaje peso	Sección Eficaz (barns)	Isótopo formado	Sección Eficaz (barns)
¹⁷⁴ Hf	0.18	1500	¹⁷⁵ Hf	-
¹⁷⁶ Hf	5.15	15	¹⁷⁷ Hf	380
¹⁷⁷ Hf	18.39	380	¹⁷⁸ Hf	75
¹⁷⁸ Hf	27.08	75	¹⁷⁹ Hf	55
¹⁷⁹ Hf	13.08	65	¹⁸⁰ Hf	14
¹⁸⁰ Hf	35.44	14	¹⁸¹ Ta	21
¹⁸¹ Ta		21	¹⁸² Ta	17000

3. EXPERIENCIA OPERACIONAL

La primera vez que se utilizaron barras de control hechas de Hafnio fue a finales de los años 50s en los núcleos de los submarinos nucleares americanos Nautilus y Triton[4], y su operación satisfactoria permitió su uso en una línea más amplia de reactores comerciales de agua ligera, incluyendo Shippingpoint, Point Beach, y Yankee Row[4]. Sin embargo, a mediados de los 60s el absorbedor más ampliamente usado en los reactores comerciales americanos fueron materiales basados en aleaciones de plata. Entonces el hafnio fue reemplazado por aleaciones de plata, debido a la limitada producción en esos momentos y al comparativamente alto costo del Hafnio.

Las barras de control hechas con la aleación de Plata-Indio-Gadolinio tienen una absorción comparable a la del hafnio pero estructuralmente es un material más pobre y la resistencia a la corrosión fue bastante menor a lo esperado, lo que dictaminó el uso de cubiertas de acero inoxidable como cubiertas protectoras del material. Al principio de los 80s el precio de la plata se incrementó sustancialmente y esto, junto con las nuevas tecnologías para la producción del hafnio, contribuyeron a hacer del hafnio un material competitivo para ser usado en los mecanismos de control de los reactores de potencia en los Estados Unidos.

La compañía sueca ASEA-ATOM es una de las mayores desarrolladoras de barras de control en Europa, incluyendo barras basadas en absorbedor de hafnio, las cuales cumplen con los principales criterios operacionales de barras de control:

- Retención de alta eficiencia de absorción de neutrones, la cual no deberá ser menor del 10% de su valor inicial, y
- Alta resistencia a los daños por radiación.

Las barras de control deben retener su forma e integridad física en un grado máximo durante su operación. Las investigaciones realizadas con barras de carburo de boro han demostrado que fallan debido a la pobre resistencia a la radiación de este material, la operación confiable de este tipo de barras se supone sólo hasta un máximo de quemado del 40% al 45% en el ^{10}B .

Por esta razón, en 1982 la compañía ASEA-ATOM cambió su diseño de barras de control reemplazando el carburo de boro de la parte baja de la barra por pequeños bloques de hafnio, (a este diseño se le llamó CR-82) y fueron instaladas en el reactor Dresden-1, obteniéndose una vida útil mejorada de aproximadamente un tercio.

4. CALCULO DE CELDAS CONTROLADAS

Para comparar la eficiencia de absorción de las barras de hafnio en diferentes tipos de combustible se modelaron dos celdas en caliente, una utilizando combustible de uranio convencional y otra equivalente con óxidos mixtos de uranio y plutonio. Para ello se utilizó el código del sistema de administración de combustible HELIOS y una biblioteca de secciones eficaces en 90 grupos de energía. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 2 y 3.

Las celdas de combustible empleadas corresponden a celdas equivalentes, esto es, en cálculos previos[5] se utilizó una celda de combustible de referencia con un enriquecimiento promedio del 3.66, con la cual se modelo un combustible que al ser utilizado en una recarga completa dio una longitud de ciclo de 469 días. En los cálculos mencionados la celda equivalente de combustible de óxidos mixtos tiene una concentración de plutonio físil del 6.5% y la misma longitud de ciclo.

Cabe mencionar que las densidades del BC_4 y del Hf son 1.74 g/cm^3 y 8.35 g/cm^3 respectivamente, en ambos casos el volumen de material de la barra de control es el mismo, por lo que la cantidad de hafnio utilizada en comparación con la del boro es mayor, sin embargo se puede apreciar la capacidad de absorción del hafnio.

La identificación de las curvas es la siguiente: Para la celda de uranio (Figura 2) la primera letra identifica al uranio en todos los casos, la segunda letra identifica al material usado como absorbedor, en este caso Boro o Hafnio, y los siguientes dos números identifican al porcentaje de la fracción de vacíos utilizada en el cálculo, en este caso, corresponden a 0, 40, y 70 % de fracción de vacíos.

Para la celda de óxidos mixtos (óxidos de uranio y plutonio) la identificación es similar a la de la celda de uranio, lo único que cambia es la primera letra, en este caso es una M, refiriéndose con ello a la celda de combustible MOX (Figura 3).

Se aprecia en el caso de la celda de óxido de uranio que la efectividad del hafnio para controlar la celda es menor que la del carburo de boro, este efecto es más significativo en el caso de 0% de vacíos en donde la curva del factor de multiplicación tiene máximos arriba de la unidad (ver Figura 2).

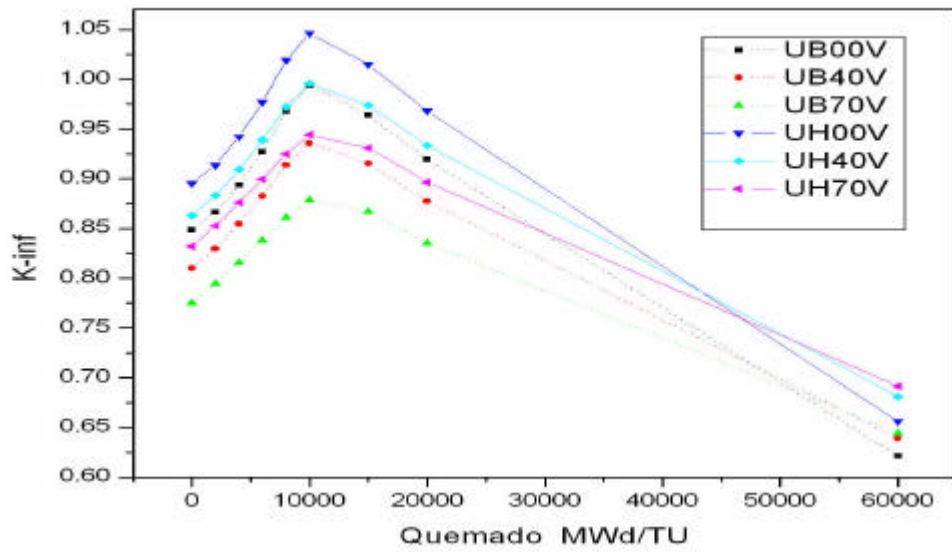


Figura 2. Celda controlada de óxido de uranio

Se observa en la figura 2, para la celda controlada por Hafnio, y particularmente para los casos de 0% y 40% de vacíos, que el factor de multiplicación excede la unidad, lo que implicaría que aún con la barra de control insertada la celda es crítica en las condiciones utilizadas para el cálculo.

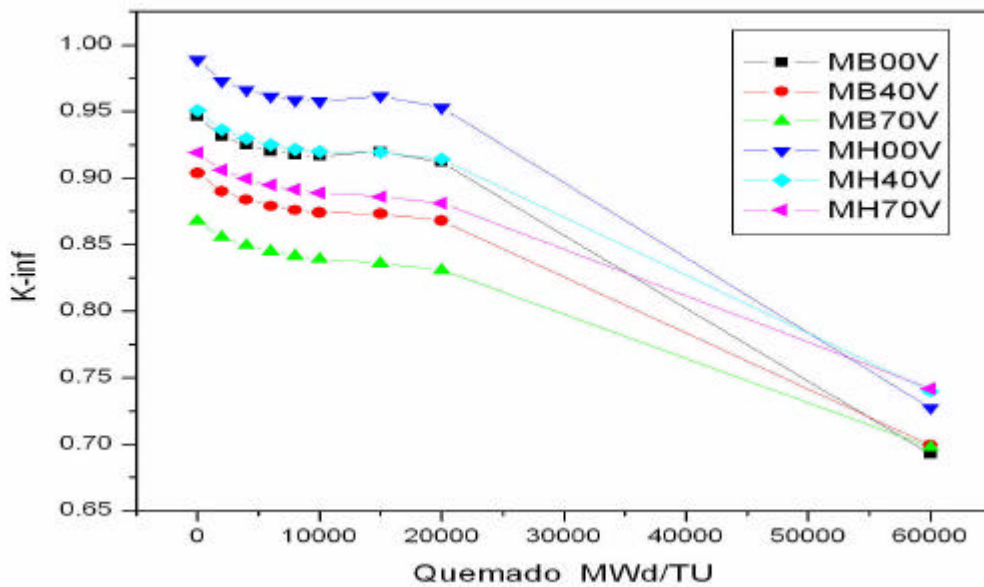


Figura 3. Celda controlada de óxidos mixtos (MOX)

En el caso de la celda de óxidos mixtos, el factor de multiplicación para la celda controlada es menor que la unidad, para ambos casos de celda controlada con Boro o con Hafnio. Por lo tanto, el hafnio bajo estas condiciones resulta ser mas efectivo para el control del combustible de óxidos mixtos que para el de óxido de uranio, lo cual es lógico en virtud de que el espectro de neutrones en este caso es más rápido y de que, el Hafnio tiene una mayor habilidad para absorber neutrones de alta energía que el Boro.

5. CONCLUSIONES

De la literatura consultada y cálculos realizados se desprende que el hafnio está siendo usado mas ampliamente en algunos reactores comerciales, sin embargo a pesar de las excelentes propiedades mecánicas del material, desde el punto de vista neutrónico es menos efectivo que el carburo de boro dada su densidad, limitando su uso a combinaciones de hafnio y B₄C y de esta manera tener valores de barra adecuados en el margen de apagado en frío. Por otro lado, los resultados obtenidos sugieren que el Hafnio es más efectivo como absorbedor para combustible de óxidos mixtos, entonces es conveniente investigar con mas detalle el comportamiento del combustible de óxidos mixtos controlado por Hafnio en condiciones frías.

REFERENCIAS

1. Séller C. *"Hafniumein neuf werkstoff in der kerntechnik"*, GIT 1987, **vol 31(2)**, pp 95- 99.
2. V.D. Risovary, E.P. Kolochkov, V.B. Ponomarenko, *"Hafnium in Nuclear Engineering"*, American Nuclear Society / ASM International Russian Materials Monograph Series. 2001.
3. B.G. Arabey, V. V. Chekunov, *"Absorbing Materials for Nuclear Reactor Regulation"* Atomizdat, Russian editors
4. Klochkov E.P., Risovany V. D. *"Hafnium in Nuclear Engineering"*, Nuclear Engineering Abroad, No 10, 1987 pp 12-16.
5. Ramon Ramirez Sanchez and Robert Terrel Perry, "A Mixed Reload Design Using MOX and UOX Fuel Assemblies," *Proceedings of ICONE10, 10th International Conference on Nuclear Engineering* (Arlington, VA, April 14-18, 2002) Paper: ICONE10-22143.