

# Posibles nuevos adelantos basados en la tecnología del HTGR y la experiencia operacional

*Valiosa experiencia adquirida mediante el programa de la República Federal de Alemania*

por R. Schulten

Los elementos combustibles totalmente cerámicos utilizados en los reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR) pueden soportar temperaturas muy elevadas sin liberar productos de fisión. Estos elementos pueden organizarse en configuraciones del núcleo de los reactores de baja densidad de potencia los cuales, sólo mediante procesos físicos, limitan la tasa de aumento de la temperatura y la temperatura máxima alcanzada durante la remoción del calor residual. Estas características básicas, comprobadas mediante la aplicación de un amplio programa de desarrollo y las experiencias operacionales obtenidas con los reactores HTGR, permiten el surgimiento de un concepto de seguridad totalmente nuevo según el cual el propio elemento combustible se convierte en elemento de contención, capaz de retener los productos de fisión incluso en los casos hipotéticos de accidentes más graves.

La utilización de este nuevo concepto de seguridad permite el diseño de centrales energéticas menos complejas que excluyan la posibilidad de daños de importancia, sean más fáciles de entender y puedan construirse, al menos en gran parte, por países en desarrollo, que puedan explotarlas y mantenerlas con confianza.

## **Experiencia operacional de los HTGR en la República Federal de Alemania**

La explotación de dos reactores de alta temperatura (HTR) en la República Federal de Alemania, el AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktoren) y el THTR (Thorium-Hochtemperatur-Reaktor), conjuntamente con la aplicación de un amplio programa de desarrollo, han contribuido de forma significativa a la comprensión de la tecnología de los HTGR.

El AVR se explotó durante 20 años y generó una potencia de 50 megavatios térmicos (MWt). Su finalidad era demostrar la viabilidad y el funcionamiento de un reactor con elementos combustibles esféricos a altas temperaturas. Durante ese tiempo se ensayaron distintos elementos combustibles, una parte de ellos destinados al ciclo del combustible de torio/uranio y otra al ciclo del uranio de bajo enriquecimiento. Durante casi todo el tiempo de explotación, la temperatura de salida del gas del núcleo fue de 950°C. La calidad de los elementos combustibles aumentó año tras año. La contaminación del circuito de helio fue extremadamente baja. Todos los componentes funcionaron sin fallos perceptibles.

El Sr. Schulten es Director del Instituto de Desarrollo de Reactores situado en Kernforschungsanlage (KFA), Juelich, República Federal de Alemania.

El alto coeficiente de temperatura negativo demostró que, de ser necesario, todas las situaciones operacionales y de accidente se podían manejar incluso sin las barras de control. El reactor pudo controlarse en gran parte utilizando el efecto del coeficiente de temperatura negativo sobre la reactividad.

Se investigaron varias cuestiones específicas relativas a la explotación, entre ellas la capacidad para mantener un bajo nivel de contaminación de CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en el circuito de helio, lo cual es importante para evitar la corrosión. Durante el funcionamiento normal, las fugas de agua y vapor del generador de vapor se mantuvieron en un nivel suficientemente bajo. Sólo ocurrió una fuga importante del generador de vapor tras la ruptura de un tubo, la que fue controlada sin que ocasionara daños. Después de eliminar el agua y sellar el tubo, el reactor volvió a funcionar sin pérdida de potencia.

Luego de realizar algunas reparaciones en el sistema de carga de combustible, la recarga continua de combustible se llevó a cabo sin dificultad, añadiendo y eliminando los elementos combustibles granulares en condiciones de potencia. En 20 años, se utilizó en total casi dos millones de elementos combustibles, cuya tasa de deterioro fue insignificante.

Lo mismo se aplica a la cantidad de polvo presente en el circuito primario. Se adquirieron importantes conocimientos sobre el comportamiento de los productos de fisión. Se efectuó una investigación minuciosa acerca de la desorción y absorción de diversos productos de fisión en el grafito. Se conoció también que los elementos combustibles con quemados altos (100 000 MWd/t) presentaban fugas insignificantes de productos de fisión cuando se elevaba su temperatura a 1600°C. Cabe mencionar además que en los experimentos de seguridad realizados en el AVR se demostró que, en caso de fallas, tanto del sistema de refrigeración como de los sistemas de control nucleares, el reactor se estabilizaba únicamente mediante el coeficiente negativo de temperatura y se eliminaba el calor residual mediante procesos de conducción y radiación sin que se dañara el reactor. Pocos días después de la conclusión de estos experimentos, el reactor estaba de nuevo en condiciones de funcionamiento normal.

La central THTR, que tiene una potencia de salida de 300 MWe y ha estado en explotación desde 1985, sigue dando muestras de las excelentes características de la tecnología de los HTGR. El bajo nivel de fuga de los productos de fisión ha traído consigo varios efectos positivos, incluida la baja dosis colectiva que recibe el personal de explotación y mantenimiento. Se han confirmado todos los datos físicos y técnicos estimados.

Al inicio de la explotación surgieron dos problemas mecánicos específicos cuyas causas se determinaron sin mayores dificultades. El primer problema estaba relacionado con una tasa de deterioro de la carga inicial de los elementos combustibles superior a la prevista. Se comprobó que ello obedecía a un empaquetamiento excesivamente denso de la carga inicial, ya que se permitió al personal pararse en la parte superior del núcleo y caminar sobre ella durante la carga inicial. Además, se realizaron varias pruebas en las que se introdujeron con fuerza las barras de parada en el lecho densamente empaquetado. Con la recarga continua del combustible se ha eliminado la mayor parte del combustible dañado y reducido la densidad global del lecho. La tasa de deterioro ha descendido gradualmente a los niveles previstos. El otro problema mecánico consistió en la reducción de la tasa de descarga de los elementos granulares a medida que aumentaba el nivel de potencia del reactor. El problema se solucionó incorporando por medios mecánicos un sistema de desviación del flujo en la tubería de descarga. Recientemente se descubrió que estaban dañados los pernos que retenían el sistema de aislamiento en los conductos de gas caliente ubicados entre el reactor y los generadores de vapor, lo cual no ha impedido el funcionamiento normal del reactor. Ninguno de los problemas mencionados ha repercutido en las ventajas de la tecnología de los HTGR.

### Concepto de seguridad del HTGR

Los sistemas de seguridad de las centrales nucleares convencionales están compuestos por una combinación racional de sistemas activos y pasivos. Los sistemas activos son accionados por la interacción de sensores, dispositivos de control, activadores y por el suministro de energía. Su fabricación y explotación requieren normas de elevada calidad. Los sistemas pasivos no exigen una construcción y vigilancia extremadamente estrictas y los más convenientes son aquellos que funcionan a partir de leyes naturales. Así, en el futuro la tecnología de seguridad tratará de emplear estos tipos de sistemas en la mayor medida posible para evitar accidentes.

Con la tecnología de los HTGR se ha logrado esta situación incluso en el caso de accidentes que superen los considerados como base de diseño. Dada la gran capacidad calorífica de los HTGR, la temperatura aumenta muy lentamente. En consecuencia, no es necesario adoptar medidas preventivas activas inmediatamente después de un accidente. Las temperaturas máximas se pueden regular para evitar la liberación de algún producto de fisión.

¿Es posible lograr un nivel máximo de seguridad de los HTGR mediante medios pasivos? Los conocimientos y las expectativas actuales permiten llegar a esta conclusión. El objetivo principal de las medidas de seguridad es evitar la liberación de cantidades peligrosas de productos de fisión, limitando las temperaturas de los elementos combustibles a niveles inofensivos, y evitar la corrosión. Las causas que provocan estos efectos podrían ser la elevación de la reactividad, el calor residual y la corrosión con el vapor o el aire. Siempre que los elementos combustibles se protejan suficientemente contra estos efectos, los alrededores de la central no podrán sufrir daños.

Si se utiliza combustible de uranio poco enriquecido (LEU), el aumento de la reactividad, que hace que se eleve la temperatura, no puede afectar al combustible. Todos los aumentos de reactividad, incluidos los que son consecuencia de una fuga de vapor, se compensan mediante el coeficiente negativo de temperatura de la reactividad sin tener que depender del sistema de parada nuclear. Por consiguiente, los accidentes de reactividad no provocarán incrementos peligrosos de la temperatura que dañen los elementos combustibles y causen la liberación de productos de fisión. Este efecto neutralizador se basa en leyes físicas y actúa de forma pasiva.

La utilización del LEU entraña varias ventajas. Por ejemplo, en caso de que se produzca una fuga de vapor en el circuito primario, el cambio de reactividad puede mantenerse a un nivel mínimo seleccionando la relación de moderación correcta. Hace algunos años se cambió el ciclo del combustible de uranio/torio muy enriquecido por el ciclo del LEU. En ese momento, se hizo evidente que dada la situación de los suministros de uranio, el ciclo de la relación de conversión del torio muy enriquecido no sería viable, ya que para ello se necesitaría un reciclado. Si se utiliza el LEU, el uranio se puede explotar en la misma medida en que se hace en los reactores de agua ligera con reciclado. Por otra parte, el depósito inmediato del combustible sin reelaboración en un repositorio de combustible gastado es posible y económicamente razonable; el revestimiento cerámico del combustible constituye una barrera adecuada contra la liberación de productos de fisión.

En caso de que se produzca un fallo en el sistema de refrigeración, el calor residual del elemento combustible puede controlarse también de forma pasiva y mediante leyes físicas. La combinación de la capacidad calorífica, la transferencia de calor y la configuración del núcleo pueden seleccionarse con respecto a la potencia de salida, de manera que no se sobrepase una temperatura máxima determinada. En este caso también es posible limitar satisfactoriamente la liberación de productos de fisión.

Además, se ha analizado a fondo la corrosión del elemento combustible debida a posibles fugas de vapor o agua hacia el núcleo. Como ya se ha mencionado, el aumento de reactividad en este caso puede controlarse seleccionando la relación de moderación. Como resultado, este accidente se puede controlar también sin necesidad de utilizar los sistemas de parada nucleares. Comoquiera que este tipo de accidentes en los que se producen fugas todos los antecedentes se desarrollan en el lapso de una hora y la temperatura de los elementos combustibles no se diferencia en gran medida de la temperatura normal de explotación, la corrosión consiguiente es insignificante y no ocasiona la liberación de grandes cantidades de productos de fisión radiactivos. La corrosión con el aire es posible sólo después de una pérdida de presión, es decir, una pérdida del refrigerante que trae como resultado un equilibrio entre la presión externa y la interna. En ese caso, la difusión y la convección natural, limitadas por una zona de flujo transversal máximo siempre pequeña, transportarán el aire hacia el interior de la vasija del reactor. El resultado será una corrosión lenta de la superficie de los elementos combustibles. Esto evitará daños de importancia en el núcleo, ya que la entrada del aire será mínima. El alcance máximo

de la fuga se determina mediante la seguridad de base de las vasijas de acero, hormigón pretensado o acero fundido. El sistema de seguridad más avanzado para un HTGR de pequeño tamaño se basa únicamente en dos componentes pasivos: la fiabilidad de los elementos combustibles a altas temperaturas y la vasija del reactor que contiene el circuito primario.

En la actualidad se ha demostrado que la tecnología de seguridad de los HTGR podría simplificarse aún más y hacerse más comprensible. Los elementos combustibles se podrían sellar o impregnar con carburo de silicio (SiC) para hacerlos inertes ante la corrosión. Así, las tasas de corrosión durante los accidentes debidos a entradas de agua o de aire en el circuito primario, aunque ya bajas, como ya se ha examinado, podrían reducirse aún más. En estos casos, incluso la integridad de la vasija del reactor podría no ser un factor decisivo para la seguridad; en cambio, los propios elementos combustibles asumirían la función de una barrera de seguridad en todos los accidentes. Todos los componentes del reactor, incluidos los sistemas de control y el personal, servirían entonces únicamente a los fines de la disponibilidad y su importancia con relación a la seguridad sería insignificante. Con la utilización de este concepto, posiblemente se podría lograr centrales nucleares mucho menos complejas. Las normas de alta calidad utilizadas para la fabricación y vigilancia de los componentes, que han sido necesarias hasta el momento, podrían reducirse en gran medida. Al mismo tiempo, la utilización de elementos combustibles como barreras contra accidentes graves es una forma simple y pragmática de evitar efectos graves. La aplicación del concepto reduciría significativamente los costos de las centrales nucleares.

La incorporación del método de protección con SiC podría asimismo permitir la eliminación de un circuito intermedio ya que, en caso de rotura de un tubo, el núcleo estaría lo suficientemente protegido contra la corrosión como para resistir la entrada de vapor o aire. Lo mismo podría aplicarse al uso de turbinas de gas en un circuito directo, lo que redundaría en una explotación más eficaz de la energía para la cogeneración.

El antedicho concepto de seguridad que controla los accidentes de reactividad mediante la aplicación del coeficiente de temperatura negativo, la remoción del calor residual por conducción y radiación, así como la prevención de procesos corrosivos mediante la protección con SiC, podría emplearse también en reactores de mayor potencia. En este caso, la superficie del núcleo del reactor tiene que ser lo suficientemente grande en comparación con su volumen. Esto podría lograrse mediante diferentes configuraciones geométricas. Una variación que es especialmente apropiada para estos fines es la del núcleo en forma de toro. Por ejemplo, un toro con un diámetro de 16 metros, una altura de ocho metros, un ancho de dos metros y una densidad de potencia de tres megavatios por metro cúbico, permitiría una potencia en el intervalo de 1000 MWe.

La contención de este toro se lograría con una vasija de hormigón pretensado o una vasija pretensada de bloques de acero fundido, cuya tecnología es ampliamente conocida. Se ha ensayado una vasija pretensada de bloques de acero fundido en escala reducida (1:10). Estas vasijas se sellan con juntas soldadas en los bordes de cada bloque, lo que ha arrojado buenos resultados en los

experimentos. Las temperaturas de explotación pueden elevarse hasta incluso 300°C. El helio que fluye de nuevo al reactor, que está en contacto con la superficie interior de la vasija y la refrigera, tiene una temperatura de 250 a 270°C. Los bloques de acero pueden fabricarse con tecnologías convencionales y pueden prefabricarse y transportarse al lugar donde se van a ensamblar, pretensar y soldar. Así, las características de seguridad de los reactores modulares pequeños podrían aplicarse a los reactores de toro a fin de crear reactores de mayor tamaño.

### La aplicación de calor industrial nuclear

En el pasado, el objetivo principal de la energía nucleoelectrónica era sustituir los recursos de energía fósil utilizados para la generación de energía eléctrica. En el futuro, esta sustitución será cada vez más importante para reducir al mínimo la producción de CO<sub>2</sub> y proteger la atmósfera. Hasta el momento los países industrializados son los que fundamentalmente han construido y utilizado las centrales nucleares, aunque en el futuro los países en desarrollo también necesitarán esta tecnología. No obstante, su uso para la generación de energía eléctrica únicamente quizás no sea suficiente para lograr la reducción necesaria de CO<sub>2</sub>. El calor, al igual que la refinación de combustibles fósiles para lograr combustibles menos contaminantes, puede ser —y probablemente deba ser— una aplicación de la energía nuclear. Hasta ahora, las altas temperaturas necesarias para este tipo de aplicaciones están limitadas no tanto por el núcleo sino por los conductos de gas caliente y los intercambiadores de calor. Dada la rapidez de los adelantos en las ciencias de los materiales, sobre todo en el caso de los materiales cerámicos, parece ser probable que muy pronto la tecnología permita alcanzar temperaturas mucho más elevadas de las que se pueden emplear hoy día.

### Conclusiones

Para que el sistema energético mundial resulte económico, se necesitan centrales nucleares simples y económicas que sean fáciles de construir y que incorporen conceptos de seguridad que excluyan la posibilidad de daños de gran envergadura. La simplicidad es un requisito indispensable para garantizar la financiación mundial de la construcción de centrales energéticas y la capacidad para fabricar componentes en los países en desarrollo. Como mejor puede lograrse esto es si la mayoría de los amplios sistemas de seguridad de las centrales nucleares convencionales se hacen supérfluos y son sustituidos por dispositivos de seguridad pasivos que no requieren precisión y son más adecuados para estos países.

La necesidad mundial de una cantidad cada vez mayor de energía, aparejada con las inquietudes por las consecuencias ambientales del quemado de combustibles fósiles para suministrar dicha energía, exige que la energía nucleoelectrónica comience a satisfacer una parte cada vez mayor de las necesidades futuras. La tecnología de los HTGR, en virtud del concepto singular de seguridad que se ha desarrollado, la simplicidad de los diseños que como resultado pueden elaborarse y las amplias posibilidades de aplicación que se prevén, parece ser la más adecuada para responder de manera muy positiva a esta necesidad.