

METAS MAS ELEVADAS

TECNOLOGIA Y COMPORTAMIENTO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

POR VLADIMIR ONOUFRIEV Y PATRICK MENUT

Las centrales nucleares tienen elevados costos de inversión iniciales, pero bajos costos de combustible en comparación con las centrales de generación de electricidad alimentadas con combustibles fósiles. Por ejemplo, una central nuclear de 1000 megavatios consume unas 30 toneladas de uranio al año, mientras que una central del mismo tamaño alimentada con carbón necesita unas 2,6 millones de toneladas de carbón, y una central alimentada con petróleo, alrededor de 2 millones de toneladas de petróleo.

En el cambiante mercado actual de la energía, más países adoptan medidas para introducir la competencia en los mercados de la electricidad, anteriormente reglamentados. Para el desarrollo de la energía nucleoelectrónica, ello significa, entre otras cosas, que los costos relacionados con el combustible tendrán que seguirse manteniendo por debajo de los correspondientes costos de las centrales alimentadas con combustibles fósiles para continuar siendo competitivos. Las presiones económicas, junto con las exigencias ambientales, se han convertido en el motor impulsor de las actividades encaminadas a mejorar la tecnología y el comportamiento del combustible nuclear sin comprometer los niveles de seguridad de las centrales.

La búsqueda de la reducción del consumo de combustible en las centrales nucleares entraña hacer estudios amplios y detallados que incluyen evaluaciones del diseño, comportamiento, rendimiento y fiabilidad de los elementos combustibles en diferentes condiciones operacionales y en distintos tipos de reactores de potencia. Se ha manifestado especial interés en

prolongar la vida útil de los combustibles nucleares, y durante los últimos decenios se ha observado una creciente tendencia a "aumentar los grados de quemado" en casi todos los tipos de reactores. Ello ha reportado ahorros generales en relación con el combustible, y la reducción de la cantidad de combustible gastado descargado que debe ser objeto de gestión. Al mismo tiempo, un grado elevado de quemado también exige más del desarrollo del combustible, por tanto, se realizan investigaciones para evaluar este comportamiento en distintos grados de quemado proyectados. El aumento gradual del grado de quemado sólo se autoriza cuando se presentan pruebas a las autoridades encargadas de la concesión de licencias de que puede lograrse sin comprometer la seguridad o la fiabilidad del combustible. Las investigaciones se centran en distintos fenómenos que pudieran limitar la vida útil del combustible en diferentes tipos de condiciones operacionales.

Dentro del marco del Grupo Internacional de Trabajo sobre comportamiento y tecnología del combustible de los reactores de agua, el OIEA ha venido apoyando las actividades de colaboración que realizan expertos nacionales e internacionales en esta esfera. Además, organiza proyectos coordinados de investigación con la participación de institutos nacionales que investigan aspectos técnicos específicos, y ejecuta proyectos de cooperación técnica para la transferencia de tecnologías y conocimientos especializados. En el presente artículo se ofrece una reseña de actividades seleccionadas, y se centra en parti-

cular, en las relacionadas con la obtención de grados más altos de quemado del combustible nuclear.

EXPERIENCIA EN MATERIA DE COMBUSTIBLE

Durante las operaciones, los conjuntos combustibles nucleares están sometidos a medios hostiles que se caracterizan por los efectos sinérgicos de la tensión, el calor, la química del agua refrigerante y la irradiación. Estos efectos provocan la degradación progresiva de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales de las vainas de combustible y otros componentes estructurales de los conjuntos combustibles y de las barras de control. El aumento de los grados de quemado aumenta estas exigencias físicas y mecánicas, y gran parte de las actividades de investigación y desarrollo está dirigida a elaborar materiales de alta calidad, por ejemplo, los que sean más resistentes a la corrosión.

En general, la fiabilidad del combustible nuclear ha ido aumentando de manera estable durante los últimos años. En cuanto a los reactores de agua ligera, el principal tipo en explotación en el mundo, la tasa de fallos del combustible ha sido de 10^{-5} , que es de alrededor de 10 al año por millón de barras de combustible en servicio. La mitigación y el control de los defectos del combustible se fundan en consideraciones económicas y de seguridad. Alcanzar, en un plazo inmediato, la "meta de cero fallos del combustible", que en la práctica

Los Sres. Onoufrieu y Menut son funcionarios de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y de Tecnología los de Desechos del OIEA.

significa una reducción de la tasa de dichos fallos a 10^{-6} , es el objetivo de las empresas eléctricas y los vendedores del combustible.

Hasta ahora, las principales causas de los fallos del combustible han estado relacionadas mayormente con el diseño inicial y problemas de fabricación, motivo por lo que se elaboran y ejecutan nuevos diseños de conjuntos combustibles y de barras de combustible. Por ejemplo, en los reactores de agua ligera, se sabe que los residuos metálicos en el sistema primario de refrigeración de la central provocan una parte significativa (entre un 40% y un 50% de los fallos del combustible), por eso las empresas eléctricas han desarrollado programas para determinar y eliminar las fuentes de residuos, y los vendedores del combustible están ofreciendo diseños de combustibles "resistentes a los residuos".

Con objeto de vigilar el comportamiento del combustible con grados de quemado más altos y de suministrar datos para la validación de códigos de computadora predecibles, se realizan estudios conocidos como exámenes postirradiación, que incluyen los dos tipos de exámenes de vigilancia, los no destructivos y los destructivos más complejos, y las mediciones. La validación es necesaria tanto para los nuevos conceptos de combustible como para los nuevos materiales de las vainas.

Los estudios de elaboración de modelos de combustible son importantes desde los puntos de vista de la economía y la seguridad. Se necesita predecir de manera fiable el comportamiento del combustible en todas las condiciones para hacer los cálculos relativos a la seguridad durante el diseño, con este fin se han desarrollado códigos de computadora. Del conocimiento del comportamiento del combustible, en condiciones normales y anormales, se derivan las normas de operación para prevenir los fallos del combustible y la posible liberación de productos de fisión al medio ambiente o, en casos extremos, evitar graves fallos del combustible

y daños del núcleo, y cualquier riesgo posterior. En esta metodología, la vaina de combustible es la primera barrera de seguridad.

Incluso con los códigos de computadora más sencillos, se puede determinar límites operacionales adecuados con el fin de garantizar el funcionamiento seguro, siempre que se establezcan límites conservadores. La elaboración de modelos del comportamiento del combustible y la inclusión de ese conocimiento en los códigos también son importantes para poder hacer predicciones más realistas sobre ese comportamiento, las que contribuirán a aumentar el ahorro en la explotación de los reactores.

INVESTIGACIONES CONJUNTAS

Por conducto del grupo de trabajo del OIEA, expertos han examinado los resultados de las investigaciones y la experiencia operacional, y han estado de acuerdo en que el comportamiento del combustible en los reactores de agua satisface los actuales requisitos operacionales. Sin embargo, en varias esferas se deben continuar las investigaciones a la luz de las actividades en curso orientadas a lograr grados incluso más altos de quemado de los combustibles nucleares. Ellas incluyen estudios relacionados con:

El control de la química del agua.

A temperaturas elevadas, el agua es un medio hostil cuando entra en contacto con materiales estructurales. Ello significa que la fiabilidad de los conjuntos combustibles, entre otros sistemas de las centrales nucleares, depende de la química del agua que fluye por los sistemas de refrigeración. La corrosión es uno de los procesos más importantes que provocan la degradación de las barras de combustible. Durante el decenio de 1980, las especificaciones químicas del agua fueron haciéndose gradualmente más estrictas, y este enfoque de "mientras más pura mejor" trajo consigo mejoras significativas, aunque quedó claro que se debía reducir aún más la corrosión. En fecha más reciente, los químicos han venido

modificando las especificaciones, por lo general añadiendo productos químicos al refrigerante. Las investigaciones permitieron además conocer mejor el mecanismo de la corrosión. En la actualidad, los regímenes de la química del agua se están ajustando más a las características específicas de cada central, por ejemplo, los explotadores de las centrales disponen de nuevos instrumentos (códigos y programas de cálculo) para optimizar los parámetros y regímenes químicos del agua dentro de lo especificado, pero sin perder de vista las peculiaridades de la central. En el marco de dos programas coordinados de investigación del OIEA se están examinando más a fondo estos problemas.

Las anomalías operacionales. En los años noventa, varios países han notificado problemas relacionados con el arqueo de los conjuntos combustibles y la reducción de las barras de control durante las actividades de parada de la central. Aunque en estos casos el momento de caída seguía manteniéndose dentro de los límites de las especificaciones técnicas de los reactores de que se trata, estas anomalías se analizaron e investigaron con detenimiento. Se continúan los estudios sobre las anomalías, incluido el fenómeno de los espacios llenos de agua entre los conjuntos combustibles. Se han aplicado algunas contramedidas para que los problemas no se repitan.

La irradiación y otros efectos. Se investigan diversos fenómenos relacionados con la irradiación del combustible nuclear con grados de quemado más altos. La caracterización detallada de la evolución de las microestructuras causadas por la irradiación es imprescindible para comprender y predecir la degradación de las propiedades físicas y mecánicas debida a daños radioinducidos. (Véase la figura.) El perfeccionamiento de las teorías fundamentales de ciertos fenómenos radioinducidos, entre otros adelantos, continúa aumentando la exactitud de las predicciones sobre la deformación

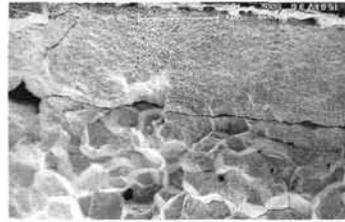
de los tubos de presión, y los conocimientos contribuyen a la fabricación de tubos con vidas útiles más largas.

La formación de gases de fisión está directamente relacionada con el tiempo de irradiación del combustible. Con grados de quemado elevados, estos gases pueden dar lugar a consecuencias negativas, incluido el aumento de la presión interna en las barras. En estudios realizados sobre este fenómeno se determinan los factores que deben tenerse en cuenta para mejorar las predicciones sobre el comportamiento del combustible con un alto grado de quemado. En esta actividad colaboran investigadores que participan en un programa coordinado de investigaciones del OIEA sobre la elaboración de modelos de combustible. Se estudiaron 19 códigos diferentes, lo que se tradujo en el mejoramiento y la validación de modelos y códigos elementales.

Además, a diez países de Europa oriental se transfirió un código más avanzado de elaboración de modelos del comportamiento del combustible, junto con orientaciones para su aplicación a la explotación de reactores y las evaluaciones de la seguridad. En la actualidad, dentro del marco de un proyecto de cooperación técnica del OIEA, se lleva a cabo la adaptación de este código para predecir el comportamiento del combustible utilizado en reactores del tipo WWER en condiciones normales y transitorias. También se estudia otra de las causas de las modificaciones estructurales del combustible, la relacionada con la formación de plutonio durante la irradiación. Diversos países investigan este fenómeno como parte de los estudios sobre la seguridad.

El comportamiento del combustible en condiciones de accidente. A fin de aumentar los conocimientos acerca del comportamiento del combustible en diferentes condiciones, se realizan pruebas del combustible con escenarios de accidentes simulados. Se están investigando dos escenarios: los accidentes con inserción de reactividad y los accidentes con pér-

ESTUDIOS DEL COMPORTAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL COMBUSTIBLE



➔ Capa periférica

➔ Estructura normal del combustible



Los estudios han demostrado que con grados elevados de quemado, la estructura del combustible se modifica, según se aprecia en estas vistas ampliadas con un microscopio electrónico. Se forma una capa periférica caracterizada por la presencia de partículas ultrafinas, una gran porosidad entre el 10% y el 20%, y el contenido de plutonio. El círculo de la izquierda muestra una vista más detallada de la estructura normal del combustible.

dida de refrigerante; en ambos casos se analiza el comportamiento del combustible según la extensión del grado de quemado. En mayo de 1997, el grupo de trabajo del OIEA recibió información sobre los resultados iniciales de estos programas de investigaciones en algunos países. Se espera que el resultado definitivo de estos programas sea un factor decisivo para el logro de los deseados niveles más altos de quemado del combustible en el transcurso de los años venideros.

DESAFIOS TECNICOS

Se prevé que en el próximo decenio se mantenga la tendencia a alcanzar estos grados más altos de quemado de combustibles nucleares, debido principalmente a incentivos económicos. Se espera que los grados de distintos tipos de combustibles quemados en reactores de agua aumenten en 32% o más en el año 2010. Estos grados cada vez más altos se tendrán que probar y habilitar antes de que pueda autorizarse el uso de los combustibles. En algunas esferas se deben aumentar de manera considerable las actividades de investigación y desarrollo, ya que aún no se conoce del todo la causa de algunos fallos del combustible, incluso después de su examen. Además, aunque ha habido pocos fallos de combustibles de óxidos mixtos, se

necesitan más datos experimentales para estudiar el comportamiento de las barras defectuosas de estos combustibles, en especial con elevados grados de quemado y durante períodos de irradiación más prolongados.

El Grupo de Trabajo del OIEA sobre comportamiento y tecnología del combustible de los reactores de agua, está integrado por expertos de 26 países y tres organizaciones internacionales. Por conducto de este grupo, entre otras vías, el Organismo ayuda a los países para que se beneficien de la experiencia y el desarrollo tecnológico mutuos, centrandolo en temas y necesidades específicos. Por ejemplo, juntamente con la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos, el OIEA ha establecido una base de datos internacional sobre experimentos relacionados con el comportamiento del combustible, que contiene datos procedentes de experimentos en los que se utilizaron más de 300 barras de combustible, y que apoya las investigaciones que se realizan en los países participantes. Estas y otras iniciativas impulsan los esfuerzos colectivos orientados a enfrentar los desafíos técnicos futuros y elevar la explotación eficaz de las centrales nucleares. □