

Nuevos diseños de combustible Areva: aumento de fiabilidad, márgenes operativos y eficiencia del funcionamiento

P. Mollard, N. Vollmer, F. Curca-Tivig, S. Cole y H. P. Louf

Areva trabaja de forma continua en la mejora del diseño del combustible para satisfacer las necesidades presentes y futuras de las empresas explotadoras. Este proceso de mejora produce regularmente cambios graduales e innovaciones radicales ajustadas a las necesidades futuras del mercado. Desde hace algunos años, se vienen produciendo progresos en el diseño de combustible y en el régimen de licencias basados en la mejora y actualización de códigos y métodos y en los avances en los sistemas computacionales. Los cambios del diseño se sustentan en estas herramientas fenomenológicas de mayor potencia, que garantizan y aseguran la optimización del diseño del combustible y su implementación.

AREVA is continuously working on the improvement of the fuel design to address immediate and future needs of the utilities. This improvement process regularly leads to incremental changes but also to breakthrough changes addressing the next needs of the market.

Since a few years now, the improvements of the fuel design and licensing benefit from the improvement and upgrade in codes & methods and computational capabilities. Changes in design are sustained by these more powerful and phenomenological tools which secure and fasten the fuel design optimization and its implementation.

GAIA: UN GRAN AVANCE EN EL RENDIMIENTO DEL COMBUSTIBLE PWR

En este marco, Areva ha desarrollado un diseño de combustible PWR denominado GAIA. GAIA ofrece alto rendimiento en todos los aspectos: rigidez, resistencia al arqueamiento, comportamiento termohidráulico, capacidad de quemado y resistencia a la rotura en condiciones sísmicas. El combustible se adecúa especialmente a los aumentos de potencia nominal más exigentes y a los diseños de núcleo de bajas fugas, que aumentan significativamente las exigencias de rendimiento termohidráulico y mecánico.

La robustez del diseño del elemento combustible GAIA en lo que respecta a las deformaciones laterales se basa en características ya aplicadas con éxito en el diseño actual de Areva, como son los tubos guía reforzados, la rejilla reforzada de guía de las conexiones de tubos y la aleación cuaternaria Q12TM resistente al *creep*, utilizada en la estructura (Figura 1).

El diseño de la rejilla espaciadora GAIA de Areva combina las características de resistencia al fretting con-

trastada de la tecnología HTPTM –que ofrece un contacto de línea del soporte de la barra combustible similar a la de la rejilla espaciadora HTPTM– y de las aletas mezcladoras, como las utilizadas, por ejemplo, en el diseño AFA 3G®, para mejorar el rendimiento termo-hidráulico (véase la figura 2). Las bridas exteriores son más gruesas que las interiores e incluyen un conjunto completo de aletas de desviación para evitar cualquier riesgo de parada durante las operaciones de carga / descarga, tal como se ha confirmado con las tecnologías AFA 3G® y HTPTM tras la implantación de dicha opción.

GAIA incorpora una rejilla de extremo inferior de aleación 718 HMPTM de eficacia probada que garantiza una resistencia superior de la rejilla al fretting de la barra, así como tubos de guía MonoblocTM de mayor grosor que mejoran la rigidez lateral de la estructura y aumentan la resistencia a la deformación lateral.

La tobera inferior GRIPTM permite márgenes de vibración de la barra de combustible inducidos por el flujo, a la vez que garantiza una pérdida de presión baja y una alta eficiencia de



PIERRE MOLLARD

Fuel BtoB and Customer Relations Manager.
AREVA NP, Lyon - Francia.



NICO VOLLMER

Fuel Product Implementation.
AREVA GmbH, Erlangen - Alemania.



FLORIN CURCA-TIVIG

Directr Codes & Methods.
AREVA GmbH, Erlangen - Alemania.



STEVE COLE

BWR Line Manager.
AREVA Inc, Richland, Washington - EEUU.



HENRY-PIERRE LOUF

Fuel Project Manager.
AREVA Inc, Richland, Lyon - Francia.

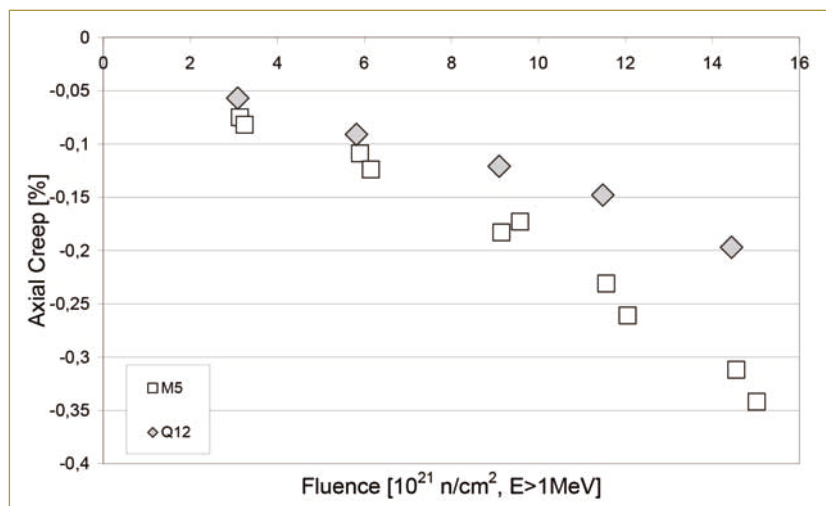


Figura 1. Comportamiento frente al creep axial de la aleación Q12™.

filtrado. La placa de sujeción está diseñada para alinear la pieza del extremo inferior y las barras de combustible para minimizar la turbulencia de flujo en la parte inferior de las barras.

La barra de combustible GAIA M5® está cargada con pastillas de combustible biseladas con aditivo Cr_2O_3 , de más diámetro y de mayor densidad de uranio, que incorporan un masa de uranio superior y permiten márgenes de presión de la varilla más amplios al final de su vida útil. De esta manera, aumenta el coeficiente de quemado y la capacidad de utilización de uranio de las compañías explotadoras.

El diseño GAIA garantiza una resistencia al fretting entre rejilla y barra única en su género. El espaciador GAIA ofrece un soporte de barra muy cercano al soporte de barra HTP™ de máxima seguridad, que se ha verificado mediante la realización de ensayos comparativos en Autoclave. Como puede apreciarse en la Figura 3 (derecha) las marcas de desgaste de los contactos de línea de GAIA y HTP™ son muy similares en lo que se refiere a la profundidad máxima (aproximadamente $20 \mu\text{m}$) y a la forma.

Además, el diseño del elemento combustible garantiza un bajo nivel de excitación hidráulica. En el loop PETER de Erlangen utilizado para realizar los ensayos FIV (vibración inducida por caudal) y SIE (excitación autoinducida) realizados sobre una maqueta de un elemento de combustible de tamaño natural, las amplitudes de vibración del elemento siguieron siendo muy bajas ($< 12 \mu\text{m}$) en las diversas situaciones investigadas.

La forma en la que el elemento de combustible GAIA interactúa con el

caudal garantiza un bajo nivel de excitación en las barras combustibles y en la estructura. Esto se ha comprobado durante 1000 horas de vida con un ensayo homologado de desgaste efectuado en el loop Hermes-P (CEA Cadarache - Francia) que reproduce fielmente las condiciones termohidráulicas de un PWR. Las barras simuladas M5® se cargaron con pastillas de uranio empobrecido y los soportes de las barras se relajaron para reproducir un estado de fin de vida útil. El caudal axial era representativo de plantas de cuatro *loops* de 12", donde quedan incluidas las plantas de tres *loops* de 12". La mayoría de las marcas de desgaste observadas delan-

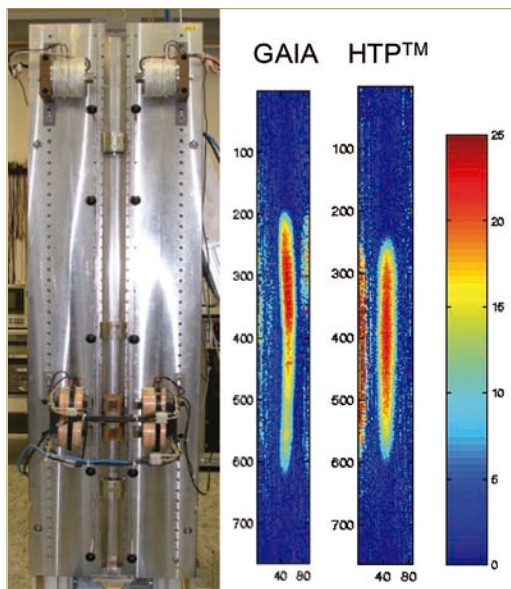


Figura 3. Configuración de Autoclave (izquierda). Ensayos en Autoclave de la topología de la marca de desgaste después de 1500 h con niveles de excitación idénticos (derecha).

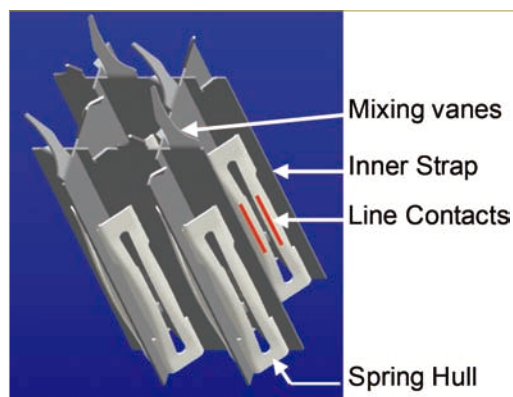


Figura 2. Sección 2x2 de la rejilla espaciadora GAIA en la que se muestran los detalles del soporte de la barra.

te de las rejillas número 1 (aleación 718 HMP™) y 2 (primer espaciador GAIA) mostraron una profundidad máxima de sólo $22 \mu\text{m}$ después de 1.000 horas.

La alta resistencia al *fretting* entre rejilla y barra es fundamental para garantizar una alta capacidad de quemado del diseño del elemento combustible.

El diseño GAIA mantiene las ventajas mecánicas del HTP™ y mejora su rendimiento termohidráulico. Esto se ha conseguido en dos fases. El diseño GAIA preliminar de 2011 e implementado en los LTA GAIA superaba ya en rendimiento al HTP™, aunque con una pérdida de presión similar. Posteriormente, un proceso de optimización de dos años permitió conseguir un diseño todavía mejor en el rendimiento del flujo calorífico crítico (CHF), manteniendo a la vez una pérdida de presión plenamente compatible con otros diseños cargados en reactores 17x17 hasta la fecha. El rendimiento de DNB del diseño GAIA en un amplio conjunto de configuraciones se ha medido en el *loop* KATHY en un amplio espectro de condiciones termohidráulicas (véase en la Figura 4 la configuración sin mezcladores de flujo intermedios). En el gráfico se muestran las líneas de regresión basadas en datos de ensayos reales.

Además, GAIA incorpora una innovación radical en el comportamiento en condiciones sísmicas. Tras el terremoto registrado en Japón el 11 de marzo de 2011 que produjo el accidente de nivel 7 en Fukushima y el incidente sísmico que tuvo lugar el 23 de agosto de 2011 en Virginia (Es-

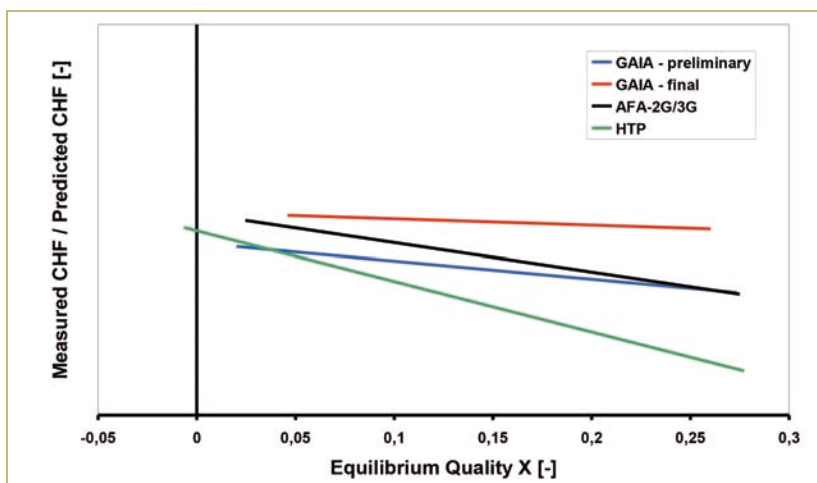


Figura 4. M/P frente a X utilizando ORFEO-GAIA para versiones GAIA, AFA 2G™/AFA 3G® y HTP™ -configuración sin IFM-.

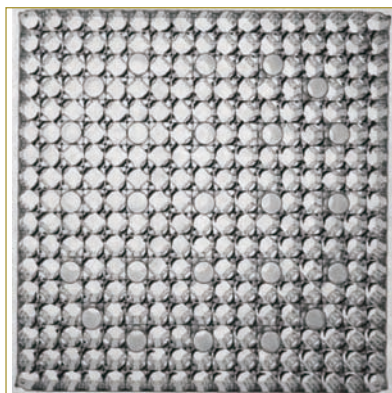


Figura 5: Ejemplo de espaciador GAIA tras un ensayo de compresión lateral (deformación permanente de 3 mm).

tados Unidos), ha aumentado considerablemente el interés por el comportamiento de los elementos combustibles en caso de accidentes graves. Se espera una evolución a medio plazo del entorno normativo que aumentará la demanda de diseños de elementos combustibles intrínsecamente más robustos y seguros en dichas condiciones.

Es sabido que los espaciadores de elementos combustibles pueden -en caso de accidentes graves o configuraciones restrictivas- sufrir deformaciones permanentes. Es necesario verificar que estas deformaciones no provoquen la inserción incompleta de las barras (IRI) ni impidan la refrigeración segura de las barras de combustible tras el accidente. Las propiedades mecánicas de las rejillas espaciadoras GAIA se determinaron durante los ensayos dinámicos de compresión lateral y cuasi estáticos realizados en condiciones de frío y calor. Las pruebas mostraron que el espaciador GAIA, debido a su estructura específica, mantenía en todas las condiciones ensayadas un modo de

deformación único y seguro (Figura 5). A diferencia de los diseños de los espaciadores actuales, que muestran generalmente deformaciones por rotura posterior al pandeo, la deformación plástica del espaciador GAIA se distribuye uniformemente por la rejilla. Este comportamiento particular resulta muy prometedor ya que permite demostrar fácilmente la inserción de elementos de control y la posibilidad de refrigeración de las barras combustible incluso en el caso de accidentes graves.

Los elementos combustibles avanzados GAIA están siendo sometidos actualmente a irradiación en la Unidad 3 de la central nuclear de Ringhals (Suecia).

Antes de esta irradiación LTA, las barras combustibles GAIA se cargaron en 2009 en elementos anfitriones para cumplir un programa de irradiación de cinco años en la Unidad 4 de la central nuclear de Ringhals. Este programa terminó en 2014, y ya están disponibles los resultados de los exámenes practicados tras la irradiación a las barras extraídas después de cuatro ciclos de irradiación. La expansión y el óxido son idénticos a los de las barras con vaina M5™ estándar y el cambio de diámetro confirma el huelgo pastilla-vaina anterior. La medida de presión de la varilla realizada con un coeficiente de quemado de 52 GWd/tU confirma que la liberación de gas de fisión en la barra combustible de alto rendimiento es notablemente inferior a la de las barras combustibles UO₂ estándar, lo que implica una capacidad de quemado superior. Los resultados de la investigación con cinco ciclos estarán disponibles en 2015.

Los elementos combustibles test GAIA, también cargados con barras

combustibles GAIA, están en funcionamiento desde 2012 en la Unidad 3 de la planta nuclear de Ringhals. Durante las paradas del reactor de 2013 y 2014, se efectuaron inspecciones visuales y exámenes posirradiación de los elementos test con coeficientes de quemado de 20 y 30 GWd/tU. Estos exámenes se centraron principalmente en la capa del óxido de la vaina, en las dimensiones axiales y radiales de la barra combustible y en la expansión y distorsión del elemento combustible. Los resultados de las inspecciones de las barras se ajustan a las expectativas y son plenamente compatibles con el programa de barras combustibles avanzadas GAIA de 2009. El comportamiento de la expansión de los elementos combustibles GAIA se sitúa dentro del margen previsto derivado de los resultados experimentales ya disponibles en estructuras similares irradiadas en varios tipos de reactores que abarcan retículos de 15x15 a 18x18. Las mediciones de distorsión de la barra combustible GAIA se sitúan en el mismo abanico de bajo nivel que los elementos HTP™ residentes. El procesamiento de los registros en vídeo confirma la ausencia de arqueamiento de la barra combustible después de dos ciclos. Los elementos combustibles avanzados GAIA están siendo sometidos actualmente a un tercer ciclo de irradiación.

En Estados Unidos, seis utilities han establecido un consejo de asesoramiento técnico denominado GAIA Alliance, para la implementación de GAIA. Estas seis empresas - entre las que figuran Dominion, Duke Energy, Exelon y PSEG - comparten un interés común por asegurar el avance técnico y la demostración del potencial de este combustible en el mercado estadounidense. Como parte de este programa, una de las empresas explotadoras controlará un conjunto de siete elementos de prueba a partir de la primavera de 2015. El innovador diseño del combustible GAIA permitirá a estas empresas el ahorro de costes mediante su resistencia al fretting mecánico, un mejor rendimiento térmico y su mayor tolerancia a los terremotos. El diseño también incluye la vaina M5™ que se ajusta a los cambios de los requisitos normativos previstos en Estados Unidos.

ATRIUM™ 11: A LA VANGUARDIA DEL DISEÑO BWR

Areva ha desarrollado el Atrium™ 11 (Figura 6), la primera matriz de barras combustibles 11x11 existente en un BWR moderno. El gran canal de

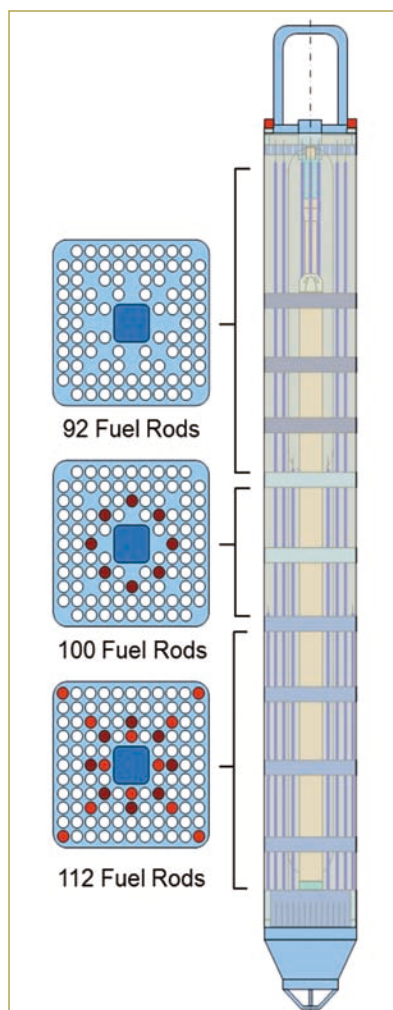


Figura 6: ATRIUM™ 11 axial & radial configuration.

agua cuadrado que desplaza nueve posiciones de barras combustibles en la matriz de barras sirve para aumentar la reactividad en caliente y disminuir la reactividad en frío como precisan los ciclos eficientes de combustible de alta energía. El retículo 11x11 permite contar con una matriz completamente simétrica de 112 posiciones de barras combustibles frente al intervalo de 91 a 96 barras disponible actualmente en las configuraciones 10x10. Considerando las barras combustibles de longitud parcial (PLFR), la longitud total de la columna de combustible dentro del haz aumenta ~20% en el diseño Atrium™ 10XM. Aumentando la longitud total de la barra combustible dentro de un haz se reduce significativamente la densidad lineal de potencia (LHGR) de las barras combustibles individuales a una potencia determinada. Una densidad de potencia inferior, a su vez, presenta la ventaja de reducir la carga de potencia relacionada con el esfuerzo en la vaina de las barras

combustibles, las temperaturas de las pastillas de combustible y la liberación de gases de fisión. Esto permite obtener ganancias de eficiencia de combustible que no son posibles con una matriz 10x10.

La mejora de la protección contra los fallos de interacción entre las pastillas y la vaina (PCI) fue también un objetivo clave del Atrium™ 11. Se ha conseguido un grado de protección notable con la reducción de la carga de potencia inherente a la matriz 11x11. Se ha utilizado la relación entre grosor y diámetro para establecer el grosor de la vaina a fin de garantizar que los niveles de esfuerzo pico de vaina en las barras combustibles 11x11 de menor diámetro sean comparables a los obtenidos en diseños precedentes. Este mantenimiento de esta relación garantiza la predicción precisa de los niveles de esfuerzo con la metodología termomecánica de referencia. Por último, las barras combustibles Atrium™ 11 utilizan pastillas de combustible con aditivo Cr_2O_3 en vainas sin revestimiento. Las ventajas de la carga de potencia reducida y del combustible con aditivo Cr_2O_3 hacen que el revestimiento sea superfluo. Esto permite optar por un mayor grosor absoluto de la pared estructural de la vaina en una barra combustible 11x11 optimizada respecto a la barra 10x10 con revestimiento, lo que facilita mayor tolerancia a la corrosión.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) ha desempeñado una función importante en la definición del diseño de combustible Atrium™ 11. La creación de modelos Fuelguard™ de tercera generación con CFD permitió a los diseñadores maximizar la eficiencia de filtrado al mismo tiempo que se mantenía la pérdida de carga de entrada dentro de límites aceptables. Las aletas mezcladoras de las rejillas separadoras también se beneficiaron del análisis CFD, eliminando el exceso de material que sólo contribuía a la pérdida de carga sin aumentar la velocidad lateral transferida a las gotas de líquido, que es necesaria para mejorar el rendimiento de potencia crítica.

Las características de diseño de Atrium™ 11 se complementan con la utilización de materiales contrastados. Ello supone el uso de la aleación Zry-BWR de Areva tanto en la estructura del canal de agua interno como en la del canal de combustible externo. Zry-BWR es un derivado de Zry-4 con niveles de acero y cromo superiores a las especificaciones ASTM de referencia para mejorar la resistencia a la corrosión respecto a

Zry-4. La irradiación de las rejillas espaciadoras Zry-BWR ha mostrado que este material es poco sensible a la corrosión galvánica y a la incorporación excesiva de hidrógeno. Los canales de agua y de combustible fabricados con Zry-BWR están sometidos a irradiación en el seno de un programa de cualificación independiente que concluirá antes de las recargas del primer suministro de Atrium™ 11. Se tomarán muestras para cuantificar las características de corrosión e incorporación de hidrógeno al aplicar estos componentes estructurales. Además, el material del canal de combustible externo recibirá un tratamiento térmico de temple beta en el grosor final. Esto elimina eficazmente la expansión inducida por fluencia para mejorar la estabilidad dimensional y minimizar el riesgo de interferencia con la hoja de la barra de control.

El Atrium™ 11 permite un cambio económico escalonado en el ciclo de combustible para el mercado de BWR. Para evaluarlo, el cálculo exclusivo de la eficiencia máxima teórica de un diseño es insuficiente para conseguir las ganancias económicas posibles en un reactor determinado, ya que la distribución del enriquecimiento final en un elemento y la carga de combustible en el núcleo pueden diferir de la eficiencia teórica máxima ideal. Por ejemplo, en BWR en los que los ciclos de operación normales duran de 18 a 24 meses, la capacidad de secado y el margen de reactividad de parada en frío tienden a convertirse en el criterio de limitación de la optimización de la eficiencia del combustible. Cualquier deficiencia en el diseño de un elemento en una o más de estas características limitadoras exigirá compromisos en el patrón de distribución del enriquecimiento y de carga del núcleo para garantizar el mantenimiento de los márgenes operativos durante todo el ciclo. En relación con estas condiciones limitadoras, el Atrium™ 11 permite aumento de todas las categorías con respecto al diseño de combustible BWR primario actual de Areva, el Atrium™ 10XM. El Atrium™ 11 mantiene la rejilla espaciadora suplementaria introducida con el Atrium™ 10XM, que permite una mejora de ~10% en la capacidad de secado con respecto al diseño del Atrium™ 10 precedente. El aumento de la superficie de la barra combustible de Atrium™ 11 respecto al Atrium™ 10XM permite aumentar todavía más la potencia crítica, tal como se ha demostrado con los ensayos de potencia con distribuciones de potencia envolventes. El Atrium™ 11

también mantiene la ubicación de las PLFR en las esquinas periféricas, de la forma introducida con la versión de ciclo largo del Atrium™ 10XM. Así se crea una geometría de distribución de agua favorable en estado frío que reduce significativamente la reactividad en frío. Debido a ello, en aplicaciones de ciclo largo, el alcance de los límites operativos apenas afecta a la eficiencia óptima del combustible.

El aumento de ~20% en la longitud de las barras combustibles reduce la LHGR del haz, lo que a su vez reduce las limitaciones de TMOL (es decir, la deformación de la vaina y la presión interna pico de la barra combustible). La estabilidad termohidráulica mejora por un coeficiente por huecos más negativo que en los diseños precedentes y por una relación de caída de presión de una fase a dos fases más favorable. En el último caso, esto se consigue mediante una combinación del aumento de la caída de presión de entrada, junto con el filtro de partículas mejorado, y una reducción de la presión de caída en la parte superior del haz, conseguida mediante el corte de material en la pared interior del canal de combustible. En consecuencia, en aplicaciones de ciclos anuales, apenas afecta a la eficiencia óptima del combustible el alcance de los márgenes operativos deseados.

Para poder cuantificar mejor los beneficios factibles obtenidos con un nuevo diseño de combustible, Areva ha definido un conjunto de plantas y de ciclos operativos de referencia para los que se han desarrollado diseños de ciclo detallados. En la Figura 7 se ilustran estos beneficios en forma de reducción efectiva del enriquecimiento para alcanzar la energía del ciclo definido correlacionada con un peso de lote de recarga fijo.

En julio de 2014, completaron su segundo ciclo de irradiación ocho elementos combustibles (LTA) Atrium™ 11 en funcionamiento en un reactor alemán. Durante la parada de recarga se efectuaron exámenes in situ, después volvieron a ponerse en servicio los ocho elementos y ahora están funcionando en su tercer ciclo. Los datos obtenidos durante los exámenes in situ muestran que los elementos combustibles están en excelentes condiciones y funcionan de la forma prevista. Ocho LTA Atrium™ 11 están en su segundo ciclo en un reactor suizo y otros ocho LTA están en su primer ciclo en un reactor finlandés, con lo que el número de elementos Atrium™ 11 en funcionamiento llega a 24.

Además, 16 LTA Atrium™ estarán en funcionamiento en dos reactores

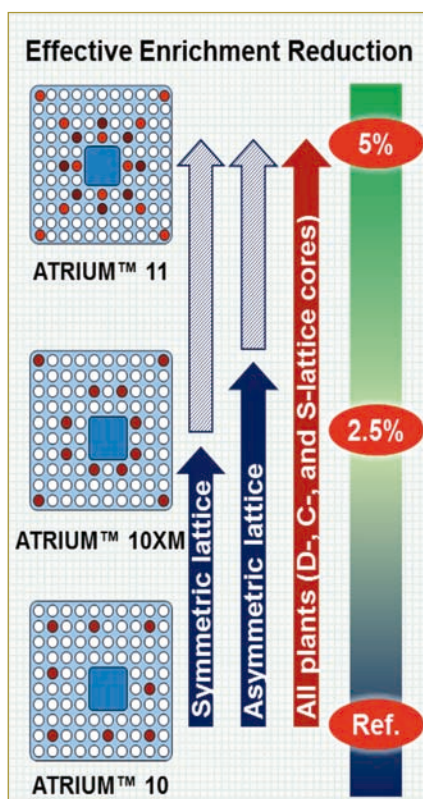


Figura 7: Los estudios de ciclos en una amplia gama de reactores y las estrategias operativas muestran que el Atrium™ 11 supone un salto significativo de la eficiencia comparable al cambio que supuso el paso del Atrium™10 al Atrium™ 10XM.

en Estados Unidos en la primavera de 2015.

DESARROLLO DE COMBUSTIBLES DE AREVA: ENHANCED ACCIDENT TOLERANT FUELS

Areva participa en varios proyectos para el desarrollo de combustibles con mayor tolerancia a los accidentes, en los que se investigan diversos conceptos. Este desarrollo se realiza a través de dos proyectos principales: el proyecto de combustible con mayor tolerancia a accidentes DOE-NE de Estados Unidos y el del Instituto Tripartito Francés (I3P).

Areva investiga con la Universidad de Florida la fabricación de nuevas pastillas UO₂ que contienen aditivos de SiC para aumentar la conductividad térmica y así reducir la temperatura de la pastilla durante el funcionamiento y la liberación del gas de fisión. En relación con las posibles soluciones aplicadas a la vaina, Areva también participa en calidad de proveedor de combustible en el proyecto DOE-NE de Estados Unidos en el desarrollo de una vaina de molibdeno (Mo) dirigido por EPRI. En éste se uti-

lizan las propiedades termodinámicas a alta temperatura del molibdeno (alta conductividad térmica y resistencia mecánica) para mejorar el comportamiento en caso de accidente.

Además, Areva participa con la CEA y EDF en proyectos tripartitos de I+D para el desarrollo de dos conceptos potenciales de vaina: de aleaciones de circonio revestidas de cromo y de capas tipo sandwich de SiC. Se ha demostrado el gran potencial de las aleaciones de circonio revestidas de cromo para inhibir la reacción de oxidación del vapor a alta temperatura y para preservar las propiedades mecánicas de la vaina. La vaina de capas de amalgama de carburo de silicio alternas, desarrollada inicialmente para aplicaciones de reactor reproductor rápido muestra una cinética de oxidación del vapor baja a alta temperatura, con lo que mejora el comportamiento del combustible del LWR en caso de accidente.

REFERENCIAS

- AREVA Advanced Fuel Design and Codes & Methods – Increasing Reliability, Operating Margin and Efficiency in Operation – P Mollard, G. Gentet, F. Curca-Tivig, S Cole, N. Garner – SNE 2014, Valencia (España), 1-3 de octubre de 2014.
- Stakes & Solutions for current and upcoming Licensing Challenges in PWR & BWR Reload and Safety Analysis – Florin Curca-Tivig & AI – SNE 2014, Valencia (España), 1-3 de octubre de 2014.
- AREVA product experience in support of EPR™ fuel design – G. Gentet & AI
- TOPFUEL 2012 – Manchester, Reino Unido.
- AREVA optimized fuel rods for LWRs – Steven E. Cole & AI – TOPFUEL 2012 – Manchester, Reino Unido.
- Ultra low tin Zr1NbSnFe quaternary alloys – Perspectives for structural components in PWR fuel assemblies – S. Trapp-Pritsching & AI – TOPFUEL 2012 – Manchester, Reino Unido.
- Protecting AREVA ATRIUM™ BWR Fuel from Debris Fretting Failure Steven E. Cole & AI – WRFPM 2014 - Sendai, Jaón, 14-17 de septiembre de 2014.
- ATRIUM™ 11 – The Utilization of Reduced LHGR for Optimized BWR Operations Norman Garner & AI – LWRFP 2013 – Charlotte (NC) Estados Unidos - 15 – 19 de septiembre de 2013.
- ATRIUM™ 11 – The transition from development to in-service qualification of advanced fuel design for boiling water reactors – N.L. Garner & AI – TOPFUEL 2012 – Manchester, Reino Unido.
- Development and application of ATRIUM™ 10XM BWR fuel assemblies – Steven Cole & AI – LWRFP 2010 - Orlando (FL) Estados Unidos.■