

TÉCNICA PUNTERA PARA REDUCIR LOS COSTES DEL CICLO DE COMBUSTIBLE. ELEMENTOS COMBUSTIBLES DE ALTO GRADO DE QUEMADO

F. BURTAK - C. FENZLEIN - P. URBAN

Los costes del ciclo de combustible son un factor clave para conseguir reducir los costes de generación de la energía nuclear. Una contribución particularmente efectiva para esta reducción de costes, es el incremento del grado de quemado del combustible, lo que conlleva unas fuertes exigencias para los elementos combustibles. El combustible de alto quemado desarrollado cuidadosamente por Siemens consigue actualmente unos destacados resultados operativos, tanto en reactores PWR como en reactores BWR de distintos suministradores y están en preparación incrementos adicionales en los grados de quemado alcanzados.

Siemens posee una profunda experiencia operativa en combustible con alto grado de quemado. La experiencia de Siemens abarca hasta el momento y en total 77000 elementos combustibles con 9.9 millones de varillas, que se han utilizado en 55 reactores PWR y 49 reactores BWR a lo largo y ancho del mundo. De ellos 276 elementos combustibles PWR y 28 elementos BWR han alcanzado quemados superiores a 50 MWd/KgU.

Los quemados máximos alcanzados hasta la fecha son 65 MWd/KgU para elementos PWR y alrededor de 63 MWd/KgU para elementos combustibles BWR.

La nueva generación de elementos combustibles de Siemens para reactores de agua a presión, el FOCUS X5 y el HTP X5, y en el caso de reactores de agua en ebullición, el ATRIUM 10, se han diseñado para enriquecimientos de hasta el 5% de U235, que corresponde por tanto, a un quemado de hasta 70 MWd/KgU, manteniendo una elevada fiabilidad y un excelente comportamiento operativo.

El grado de conocimiento y la creatividad de expertos en análisis neutrónico, termohidráulico y mecánica estructural, así como el continuo incremento de la experiencia de diseño y en la utilización de los materiales, asegura el desarrollo de elementos combustibles avanzados y fiables tanto para reactores de agua a presión como para reactores de agua en ebullición. La aplicación a distintos tipos de reactores y la gran variedad de tipos de elementos combustibles permite soluciones muy flexibles. Por todo lo anterior, se abre frente a los explotadores un importante potencial en la reducción de costes. Se puede acceder a este potencial mediante los métodos de diseño modernos utilizados por Siemens, y ya se han emitido las primeras licencias para utilizar nuestros elementos combustibles altamente enriquecidos.

Fuel cycle costs are an important key factor in order to achieve reduced power generation costs for the nuclear energy. A particularly effective contribution for reduction of costs is the

increase of the burn-ups. It places high requirements to the fuel assemblies. Carefully developed high burn-up fuel elements of Siemens achieve today in pressurized water reactors and in boiling water reactors of different manufacturers outstanding operating results, further burn-up increases are in preparation.

Siemens has profound high burn-up operational experience. The application experience of Siemens covers at present altogether 77,000 fuel elements with 9.9 million fuel rods, which were used world-wide at 55 PWR and 49 BWR. Of it 276 PWR and 28 BWR fuel assemblies reached burn-ups over 50 MWd/kgU. The

maximum achieved fuel assembly burn-ups are at present 65 MWd/kgU for PWR and about 63 MWd/kgU for BWR.

The new generation of Siemens PWR fuel assemblies FOCUS X5 and HTP X5 and the BWR

fuel assembly ATRIUM 10 are designed for enrichments up to 5 % U235 corresponding thereby to fuel assembly burn-ups up to 70 MWd/kg maintaining high reliability and the excellent operational behaviour.

The bundling of the knowledge and the creativity of experts of neutron physics, thermal hydraulics and structure mechanics as well as continuous expansion

of design and material experiences ensure the development of advanced and reliable fuel elements for PWR and BWR. The application in different reactor types and the large fuel assembly variety enables itself

flexible solutions. Thereby substantial cost reduction potentials are opened to the utilities. This potentials can be opened with the modern design methods by Siemens, first licenses for high enrichments have been already given.

A la hora de intentar aumentar la competitividad de la energía nuclear, los costes del ciclo de combustible adquieren un papel clave, junto con los costes de mantenimiento de la planta. Al incrementar los quemados de descarga, se contribuye muy eficazmente a la disminución de estos costes, pero a la vez este incremento exige mucho al sistema global del elemento combustible. Hoy en día, los elementos combustibles de alto quemado, cuidadosamente elaborados por Siemens, consiguen unos resultados operativos

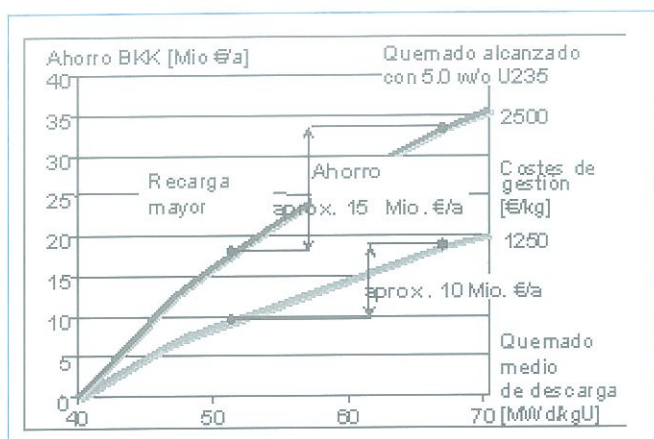


Figura 1. Reducción de costes del ciclo de combustible de un reactor PWR de 1300 MWe aumentando el enriquecimiento a 5,0 w/o U235. El quemado de descarga medio de una recarga crecerá de actualmente 51 a valores en torno a 65 – 68 MWd/kgU. Despendiendo de los costes de gestión, se conseguirán unos ahorros de aprox. 10 a 15 millones de € al año.

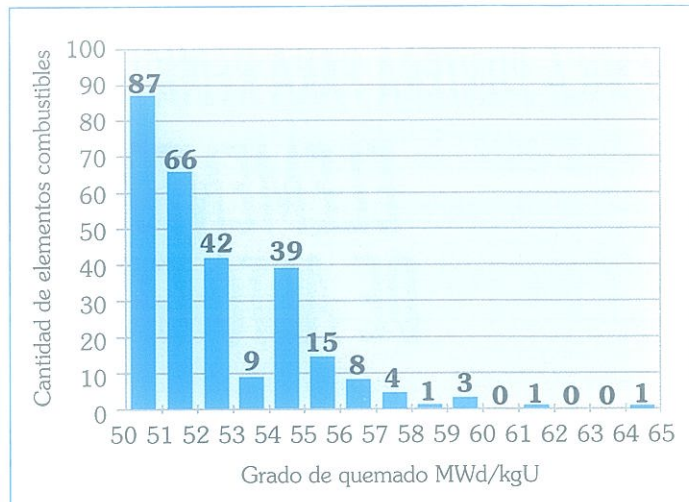


Figura 2. Experiencias en el alto grado de quemado con elementos combustibles PWR de Siemens, 33 elementos combustibles alcanzan más de 55 MWd/kgU.

excelentes en reactores de agua a presión y reactores de agua en ebullición, de diferentes suministradores. Otras mejoras adicionales se encuentran ya en fase de preparación.

Los costes del ciclo de combustible ocupan aprox. un 25 – 40% de los costes de generación de energía en centrales nucleares. Con unos costes de gestión altos y dependiendo de las cantidades, en una planta PWR típica de 1300 MWe, los costes absolutos ascienden a 75 millones de € anuales (1). Aunque la fabricación de elementos combustibles en sí solo ocupa aproximadamente un 10% de los costes del ciclo de combustible, el combustible tiene una importancia bastante elevada a la hora de reducir los costes del ciclo de combustible, ya que el quemado de descarga repercute sensiblemente en los costes de gestión y, por consiguiente, en los costes del ciclo de combustible. Por ello, el desarrollo de elementos combustibles avanzados es de fundamental importancia para la competitividad de la energía nuclear.

El potencial técnico para aumentar el quemado sin incrementar el enriquecimiento ha sido agotado en las dos últimas décadas, mediante innovaciones como el diseño de bajas fugas y la renuncia a materiales de fuerte absorción de neutrones en la estructura de los elementos combustibles. Un incremento adicional del quemado presupone un mayor enriquecimiento. El valor deseado de 5 w/o U235, exigido hoy en día en todo el mundo como valor límite autorizado, tanto para fabricación, transporte y almacenaje, se conseguirá, por primera vez, el año que viene en un reactor de Siemens, con el empleo de elementos combustibles de demostración.

EXPERIENCIA OPERATIVA CON ELEMENTOS COMBUSTIBLES DE ALTO QUEMADO DE SIEMENS

La fiabilidad de los elementos combustibles de Siemens bajo las exigencias más estrictas para quemados muy altos, queda garantizada mediante un procedimiento que se viene practicando desde hace años. Consiste de dos pasos:

- Los programas de irradiación y
- La evaluación sistemática de la experiencia operativa, tanto con elementos combustibles de demostración como con recargas comerciales.

La experiencia de Siemens en cuanto al empleo de elementos combustibles abarca actualmente un total de 77.000 elementos combustibles, con 9,9 millones de varillas de combustible, empleados en todo el mundo, en 55 reactores PWR y 49 BWR. De ellos, 276 elementos combustibles PWR pertenecen a la categoría de alto quemado (valores de quemado > 50 MWd/kgU), 33 elementos combustibles alcanzaron más de 55 MWd/kgU (véase figura 2). En los reactores de agua en ebullición, el promedio de los valores de quemado alcanzado, está por debajo del valor alcanzado en los reactores de agua a presión. A pesar de ello, 28 elementos combustibles BWR han alcanzado quemados por encima de 50 MWd/kgU y confirman así los diseños avanzados. El valor máximo de quemado que se ha conseguido, asciende actualmente a un promedio de 65 MWd/kgU para PWR y a 62 MWd/kgU para BWR.

Las experiencias obtenidas en la operación comercial con elementos

combustibles de Siemens se ven complementadas con un amplio programa de ensayos e investigación. Las experiencias así obtenidas y la creciente base de datos, respaldan y aseguran el diseño del combustible y aportan conclusiones en cuanto al futuro desarrollo.

Desde 1999, se están utilizando los primeros elementos combustibles de demostración con un enriquecimiento inicial de 4,6 w/o U235:

- Se encuentran elementos combustibles PWR en una planta Convoi, en su primer ciclo de operación. En los próximos años, se irá aumentando paulatinamente el enriquecimiento de las recargas en una serie de centrales.

- En la primavera del año 1999, se inició un programa de irradiación con 8 elementos combustibles ATRIUM 10, con un enriquecimiento medio de aprox. 4,6 w/o U235. Después de ocho ciclos de operación, se espera un quemado medio de descarga de 70 MWd/kgU.

DISEÑO DE LAS VARILLAS DE COMBUSTIBLE

Siemens ha investigado a fondo el comportamiento de las varillas de combustible para alto quemado. La base de validación del programa actual de diseño de varillas de combustible abarca entre otros, 100 varillas de combustible con valores de quemado de 44 a 98

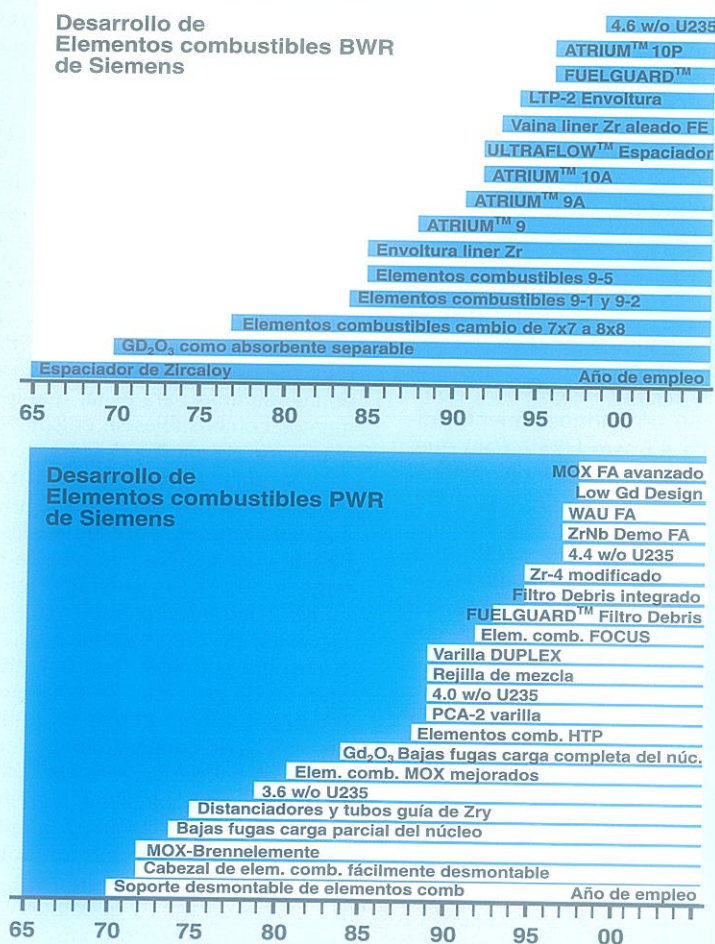
MWd/kgU. Sobre todo, efectos específicos de alto quemado, como

- la dependencia del quemado de la conductividad térmica del elemento combustible

Desarrollo de elementos combustibles considerando su aplicación

El desarrollo de elementos combustibles en Siemens está caracterizado por:

- Calidad en el diseño, construcción y fabricación: Base para una operación fiable y rentable
- Innovaciones concretas: se desarrollan y prueban nuevos materiales para las vainas con el fin de seguir aumentando la excelente fiabilidad de las varillas de combustible. Se optimizan espaciadores para conseguir distancias confortables para la transferencia de la potencia.
- El aprovechamiento de la amplia experiencia de operación en diferentes tipos de reactor y el know-how adquirido como fabricante de centrales y elementos combustibles, como base para productos avanzados que cumplen con las mayores exigencias que existen hoy en día en la operación de un reactor
- El amplio aprovechamiento del know-how de elementos combustibles PWR y BWR



- los efectos del Pellet Rim
- la liberación de gas de fisión pueden reconstruirse en base a estas comprobaciones detalladas (2).

En base a los procedimientos determinantes habituales hasta ahora en Siemens, se ha introducido un procedimiento estadístico de diseño de varillas de combustible (3). En los cálculos de

diseño de un programa de varillas de combustible, se utiliza todo el historial de potencia del núcleo del reactor. Se introducen los parámetros de fabricación así como los demás parámetros del modelo de la varilla de combustible y se analizan mediante el procedimiento de "Monte-Carlo", en función de la distribución realista. Este procedimiento permite tener la comprobación de haber cumplido los límites de dise-

ño, incluso para núcleos con un quemado sumamente alto y una recarga muy exigente.

OBJETIVOS DEL DESARROLLO

El principal objetivo del desarrollo para los elementos combustibles de alto quemado es la minimización de los costes del ciclo de combustible aumentando a la vez la fiabilidad de los elementos combustibles durante todo su ciclo de vida.

El desarrollo afecta principalmente al combustible, los materiales para las varillas y estructuras así como el diseño mecánico de las varillas de combustible y del elemento combustible. Todos los componentes del elemento combustible deben estar diseñados para una mayor vida operacional, casi siempre, bajo las condiciones de operación más estrictas. En concreto, los principales problemas son la aparición de corrosión, la absorción de agua por las vainas, la modificación en las propiedades del combustible, el aumento de la presión del gas de fisión así como las modificaciones dimensionales de las partes estructurales.

Muchos fenómenos debidos a la radiación solo pueden aclararse bajo condiciones de operación reales, dentro del reactor. Por ello, también en el futuro solo será posible mejorar el aprovechamiento del combustible y la fiabilidad operacional a través de programas de demostración, en estrecha colaboración con los explotadores de las centrales.

LOS ELEMENTOS PWR FOCUS X5 Y HTP X5

Con los nuevos elementos combustibles PWR FOCUS X5 y HTP X5 es posible alcanzar enriquecimientos hasta un 5% de U235. Con ello, se espera poder conseguir quemados de elementos combustibles hasta 70 MWd/kg manteniendo la fiabilidad en el servicio y el excelente comportamiento operacional. Los componentes principales de estos elementos combustibles – las varillas de combustible y los distanciadores – así como las demás partes estructurales están optimizados para los requisitos de operación de un reactor moderno y avanzado con altos quemados.

Material de las vainas

Desde el año 1989, Siemens emplea vainas Duplex y complementa con ello la gama de productos de sus tubos

TABLA 1
EXPERIENCIA DE OPERACIÓN CON MATERIALES DE VAINA PWR

Grado de quemado varilla MWd/kgU	Material	Varillas empleadas	Centrales	Quemado máx. de varillas MWd/kgU
Material varilla actual				
55-60	Zry-4 mod.	110.000	12	50
65-68	DX ELSO.8b	480.000	12	75
70-73	DX D4	21.500	5	70
Desarrollos para > 75				
	Zr1Nb	1.400	4	80
	DX Zr1.5Nb	1.500	4	80
	DX HPA-4	1.000	1	90

"Zry". Manteniendo este favorable concepto bifásico, para los elementos combustibles FOCUS X5 y HTP X5 se pueden utilizar, según cada caso, vainas en técnica de tubos Zry o en técnica DUPLEX.

Una ventaja del concepto Duplex es la posibilidad de optimizar, de manera independiente, las cualidades del material básico y del liner exterior. En cuanto a las cualidades relativas a la seguridad, como p.ej. la resistencia a la fuga, se puede aprovechar las importantes experiencias obtenidas con el material Zry-4, mientras que se puede optimizar la capa del liner contra la corrosión y la absorción de hidrógeno.

El comportamiento de operación de las vainas Duplex está sobradamente garantizado de modo que se dispone de todos los datos de materiales relevantes para el diseño. (4). Las vainas Duplex son adecuadas para el alto quemado de varillas de combustible:

- DX ELS 0.8b para quemados hasta 65-68 MWd/kgU
- DX D4 para quemados hasta 70-73 MWd/kgU

Bajo condiciones bastante estrictas, se han alcanzado valores de quemado por encima de 70 MWd/kgU. Hasta ahora, se ha comprobado el comportamiento dimensional y corrosivo de 1300 varillas de combustible, procedentes de nueve centrales. En 35 varillas de combustible se ha investigado detalladamente, en celdas calientes, la absorción de hidrógeno y la distribución hídrica de modo que el comportamiento durante la operación resulte predecible con toda seguridad.

Actualmente, se utiliza el material duplex DX D4 para elementos combustibles con un enriquecimiento inicial de hasta 4,6 w/o U235. Para quemados mayores se dispone del material Zr1Nb. La experiencia de irradiación ya disponible se está ampliando actualmente con un programa preliminar. Garantías adicionales rigen para las variantes DX Zr25Nb y DX HPA-4. Los materiales de las vainas aleados con niobio son altamente resistentes a la corrosión y tienen una absorción reducida de hidrógeno. Su comportamiento bajo condiciones de operación extremas en centrales de Siemens y de otros fabricantes queda asegurado en un grado estadísticamente relevante.

Adicionalmente, la variante duplex DX HPA-4 está cualificada como solución alternativa.

Espaciadores

Una operación segura y fiable de los elementos combustibles de alto grado de quemado presupone que los espaciadores tengan un pequeño crecimiento debido a la radiación, o a la corrosión y que tenga suficiente resistencia a la fuga. De esta forma, se excluye completamente un fuerte crecimiento de los espaciadores también para altos grados de quemado. Los ensayos de material y los programas de demostración respaldan el conocimiento de las cualidades del material hasta el punto de que se pueden excluir sorpresas en su comportamiento.

El espaciador FOCUS de diseño probado, ha sido utilizado también para el elemento combustible de alto quemado FOCUS X5. Utiliza un apoyo convencional de resorte y teton para el cual ya se dispone de una amplia experiencia de operación. Incluso pequeñas modificaciones de este diseño probado permiten la ampliación del grado de quemado a más de 70 MWd/kgU. Otro punto positivo es la configuración de las esquinas para evitar que los elementos combustibles se enganchen en el proceso de carga y descarga.

La singular e innovadora técnica de los distanciadores HTP de zirconio macizo combina el soportaje de las varillas de combustible y la mezcla de refrigerante, en un mismo elemento constructivo. Mediante el soportaje de la varilla de combustible a través de cuatro líneas dobles, con una gran superficie de contacto, se consigue una seguridad óptima contra el fretting de las varillas de combustible. Los canales curvados del refrigerante formados por las chapas de doble alma, aumentan la mezcla de refrigerante y mejoran el comportamiento térmohidráulico. Una geometría modificada en las cruces de alma y el empleo de material optimizado contra la corrosión permiten quemados hasta más de 70 MWd/kgU.

En la posición inferior, que es el distanciador más cargado, se utiliza en ambos tipos de elementos combustibles, el FOCUS X5 y el HTP X5, un espaciador anti-fretting innovador donde la varilla de combustible está sujeta sobre cuatro líneas dobles, con una gran superficie de contacto. Con este principio de soportado, copiado del distanciador HTP de zirconio macizo, se

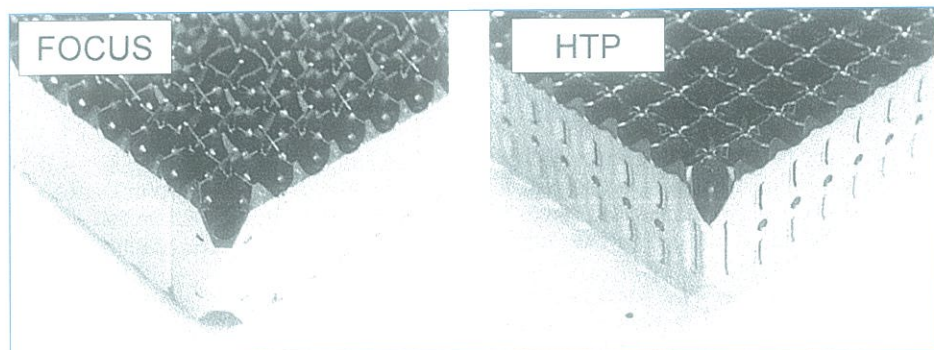


Figura 3. Espaciadores para elementos combustibles FOCUS X5 y HTP X5. Los espaciadores FOCUS utilizan un apoyo de resorte y teton; el espaciador HTP coloca la varilla de combustible sobre cuatro líneas dobles con una gran superficie de contacto.

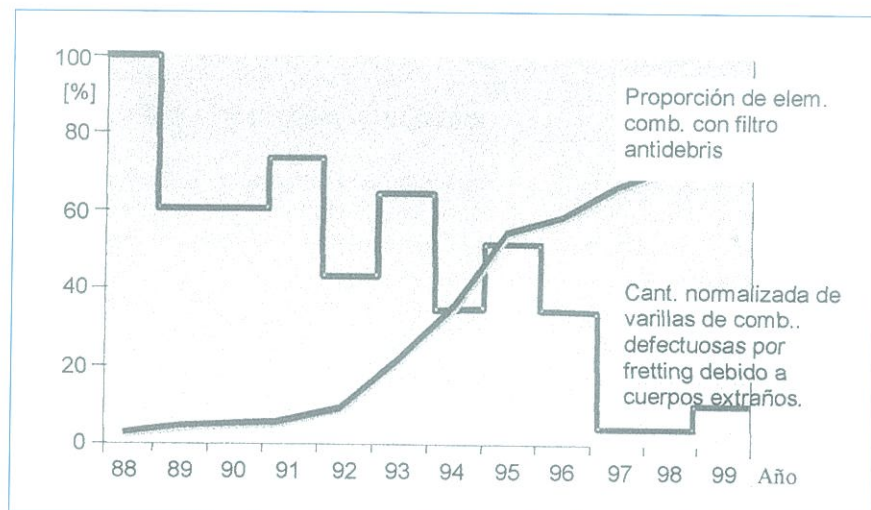


Figura 4. Reducción de daños provocados por fretting debido a cuerpos extraños en elementos combustibles BWR después de la introducción del filtro antidebris.

alcanza la seguridad adicional necesaria para esta posición contra el fretting de las varillas de combustible.

Filtro de cuerpos extraños

Opcionalmente, las toberas inferiores de los elementos combustibles van dotadas de un separador integrado de cuerpos extraños IDP (Integrated Debris Filter) ó – en caso de requisitos más estrictos – de un separador FUEL-GUARD TM. Este también se utiliza en elementos combustibles BWR. Ambos separadores garantizan la retención eficaz de cuerpos extraños y evitan así daños en las varillas de combustible debido al fretting. Desde su introducción, la tasa de daños por fretting debido a cuerpos extraños ha disminuido sensiblemente (5).

ELEMENTOS COMBUSTIBLES BWR ATRIUM 10 TM

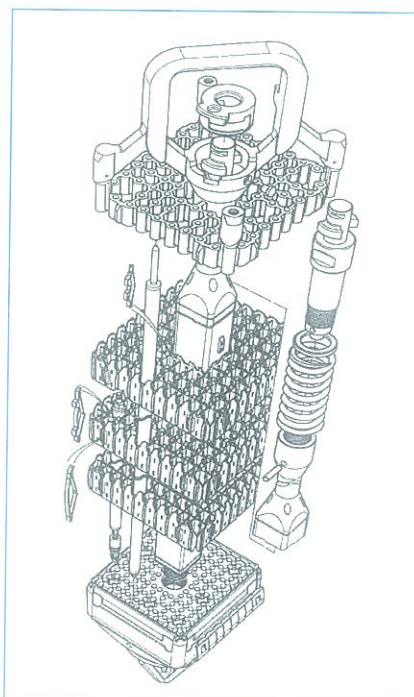
El tipo de elemento combustible ATRIUM 10 fue desarrollado para una elevada fiabilidad de operación con un mayor aprovechamiento del combustible. Permite aprovechar el enriquecimiento del combustible hasta un máximo de 5 w/o y, con ello, quemados de hasta 70 MWd/kg.

DISEÑO DE LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES

El diseño de los elementos combustibles ATRIUM 10 combina un buen aprovechamiento del combustible con un buen comportamiento operacional. Con el diseño 10x10 se consigue un

reducido grado de potencia lineal de las varillas así como buenos márgenes en cuanto a la distancia mínima a la ebullición, el margen de parada y un comportamiento estable.

Los métodos empleados a la hora de realizar el diseño deben ser validados de forma fiable con el fin de cumplir con los requisitos de licenciamiento. En cuanto a los métodos y herramientas de diseño utilizados para el diseño ATRIUM, este aseguramiento se ha realizado de manera detallada a través de γ -scans (6), extensos ensayos termohidráulicos (7) y comparaciones con medidas de estabilidad (8).



En el diseño neutrónico de los elementos combustibles BWR se tiene en cuenta, que debido a una distribución no homogénea del flujo de neutrones, el contenido en U235 de las varillas de combustible es variable a lo largo de su longitud. Con ello, se produce una distribución radial y axial del material fisible con lo cual se puede reducir la distribución de potencia tanto axial como radialmente. Sin embargo, como en todo el mundo, el enriquecimiento máx. utilizable queda actualmente limitado a 5 w/o U235, debido a los valores límites exigidos en plantas de enriquecimiento, fábricas de elaboración de elementos combustibles así como en transportes y almacenajes, el valor de enriquecimiento medio de un elemento combustible BWR está limitado a 4.6 w/o U235.

Ya se han utilizado elementos combustibles de demostración del ATRIUM 10, con este mismo tipo de diseño (4.6 w/o U235). El procedimiento de licenciamiento para una recarga completa está en curso actualmente. Otras mejoras previstas en el diseño de los elementos combustibles, en cuanto a una reducción de los costes del ciclo de combustible prevén otro incremento del contenido medio en material fisible así como recargas y operaciones optimizadas. Como estas medidas aumentan la heterogeneidad de la distribución de potencia, habrá que alcanzar el espacio necesario en lo que se refiere a la distancia mínima a la ebullición así como el comportamiento estable mediante mejoras del diseño.

VAINAS

Un elemento sustancial para un comportamiento óptimo de las vainas frente a la corrosión es un proceso especial durante la fabricación del material llamado el "Low Temperature Process" LTP. Se ha demostrado que con Zry-2 LTP se consigue un estado óptimo, tanto para la corrosión nodular como para la corrosión uniforme. La base de datos actual sobre la corrosión abarca mediciones hasta un quemado medio de elementos combustibles de 62 MWd/kgU. Incluso hasta este grado de quemado aún no hay indicios de corrosión uniforme acelerada. Con el fin de ir conociendo más el potencial del material de vaina Zry-2 LTP, se están utilizando actualmente elementos combustibles con el objetivo de conseguir quemados de aprox. 70 MWd/kgU.

La experiencia de operación con vainas LTP sin liner abarca casi 5000 elementos combustibles con más de

Sección de un elemento combustible ATRIUM 10 para alto quemado (4,60 w/o U235, en la rejilla de elementos combustibles)

Posición de la varilla de combustible



2,65 4,95

Distribución axial del enriquecimiento:



Varillas de combustible de longitud reducida

El objetivo del diseño neutrónico es una distribución uniforme del quemado y, por consiguiente, un aprovechamiento óptimo del combustible durante toda su vida operacional. Las bases para ello son:

- un reparto axial y radial del enriquecimiento esmeradamente equilibrado—desde uranio natural hasta 4.95 w/o U235
- una colocación idónea de las varillas de combustible de longitud reducida así como
- el empleo inteligente del Gadolinio como absorbente consumible.

El canal interior de agua de sección cuadrada que ocupa nueve posiciones en la rejilla (disposición de 3 x 3) y por donde circula agua que no está en ebullición, produce una moderación de neutrones mayor y más uniforme. Con ello, se consigue una distribución de potencia muy homogénea y un aprovechamiento óptimo del combustible. A la vez, este canal de agua sirve para soportar cargas mecánicas.

Las ventajas de este diseño son evidentes: Todas las varillas de combustible de longitud completa son iguales, es decir, no hay diferencia entre las varillas portantes y las varillas normales. Las fuerzas que actúan sobre cada una de las varillas durante la operación o durante la manipulación de los elementos han sido reducidas y las varillas de combustible son fácilmente intercambiables.

370.000 varillas de combustible, en 13 centrales. Se ha conseguido un quemado máx. de elementos combustibles de 44 MWd/kgU.

Zry-2 LTP también es el material básico para vainas con liner. Siemens ha introducido, a mediados de los años ochenta, vainas con liner con una capa interior de zirconio puro, como medida para evitar daños de PCI. En aquel entonces, PCI fue la causa de la mayoría de los daños registrados en las varillas de combustible BWR. Desde que se introdujeron los liner, no se han producido defectos en las varillas de combustible por PCI. Sin embargo, este tipo de varillas de combustible tenían en parte grandes daños secundarios cuan-

do se trataba de defectos de otra procedencia.

Por ello, Siemens ha seguido adelante consecuentemente con el desarrollo y la comprobación de materiales de vainas. El resultado fue la introducción de vainas de Zry-2, con un liner interior aleado con hierro. El uso comercial comenzó en el año 1994. Hasta el día de hoy, se han suministrado recargas con este tipo de vaina avanzado a un total de quince centrales: La experiencia de operación abarca casi 170.000 varillas de combustible con un quemado máximo de 50 MWd/kgU. Hasta ahora, no se ha podido detectar ningún caso de daño.

Para poder cumplir en el futuro con unas exigencias aún más elevadas, se están probando actualmente otros materiales avanzados como, p. ej. el Zry-BWR. Este material que destaca por una composición química optimizada y una estructura de grano fino, con textura radial, ofrece una resistencia mejorada al PCI así como una menor corrosión de la vaina. Existen elementos combustibles de demostración con vainas y partes estructurales de Zry-BWR que actualmente están en el quinto ciclo de operación en el reactor.

ESPACIADOR ULTRAFLOW TM

En el espaciador avanzado ULTRAFLOW, unas clapetas de torsión se ocupan de que exista una separación óptima del agua del vapor en el centro de los subcanales, entre las varillas de combustible. Con ello, se incrementan las reservas de diseño en cuanto a la distancia a la ebullición.

Para el tipo de elemento combustible ATRIUM 10P que se ha optimizado para una pérdida de carga mínima, se ha desarrollado una variante, el ULTRAFLOW de Inconel que presenta una mayor flexibilidad, pero que en lo que se refiere a la absorción de neutrones, alcanza casi el mismo bajo nivel que la versión en Zircaloy.

Una optimización adicional del ATRIUM 10, persigue sobre todo una ampliación de la potencia de traspaso de ebullición y una mejora del comportamiento de estabilidad. Por otro lado, para reducir los costes del ciclo del combustible, la masa de uranio del elemento combustible debe ser lo más alta posible. Las medidas necesarias para ello producen un aumento de la pérdida de carga en el elemento combustible que debe ser compensada. El espaciador ULTRAFLOW de la

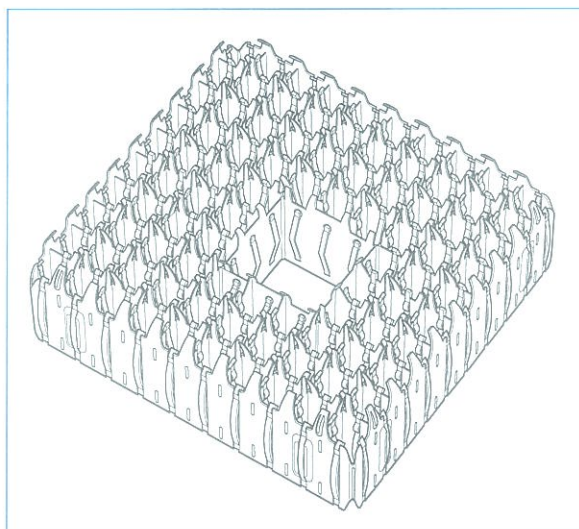


Figura 6. Espaciador ULTRAFLOW para elementos combustibles BWR

variante de diseño ATRIUM 10P resulta ser una buena base de partida, por su reducida pérdida de presión, para el futuro desarrollo de la serie ATRIUM 10.

UN DESARROLLO CONTÍNUO GARANTIZA FIABILIDAD

Una continua ampliación de las experiencias de diseño y de los materiales utilizados por un lado y la clasificación de los conocimientos y la creatividad de expertos en neutróica, termohidráulica, diseño estructural y desarrollo de materiales por otro lado, garantizan en Siemens el desarrollo de elementos combustibles a la vez avanzados y fiables para reactores PWR y BWR. Con enriquecimientos de hasta 5 w/o, se consiguen en ciclos anuales quemados de hasta 70 MWd/kgU. El empleo en diferentes tipos de reactor y la consiguiente gran diversidad de elementos combustibles permite soluciones flexibles.

Con ello, se ofrecen importantes potenciales de reducción de costes para los explotadores. Estos potenciales pueden ser aprovechados de forma segura, con métodos modernos de diseño de Siemens. Ya se han adjudicado las primeras licencias para estos elevados enriquecimientos.



Dr. Friedrich BURTAK cursó estudios de física en la Universidad Friedrich Alexander de Erlangen y se doctoró en física de neutrinos. Desde el año 1991, está trabajando en Siemens AG, en el área del ciclo de combustible nuclear. Sus primeras actividades se centraron en el diseño neutrónico de elementos combustibles MOX y el tratamiento de plutonio. Después de realizar trabajos de física en el reactor moderado por agua pesada de Atucha-2 y el sistema del ordenador de procesos para reactores de agua a presión de Siemens, asumió la jefatura del proyecto de desarrollo de un concepto de gestión para elementos combustibles quemados. Desde el año 1997, es el responsable del desarrollo de elementos combustibles de reactores de agua a presión para el mercado europeo.

LITERATURA

[1] M. Beer, Bayernwerk, R. Güldner, E. Weber, Siemens AG

„Optimierung des Brennstoffkreislaufes für Druckwasser-Reaktoren“

(“Optimización del ciclo de combustible para reactores de agua a presión”)

Top Operation '99, Berlin, 24. - 26.Okt. 1999.

[2] H. Groß, P. Urban, Siemens AG

„Technical and Licensing Challenges and Their Solutions for High Burnup“

Topfuel '99, Avignon, 12.-15. Sep. 1999

[3] L. Heins, Siemens AG

„Improved Fuel Rod Design by Statistical Methods“

Jornadas técnicas KTG „Técnica de elementos combustibles – Diseño del núcleo – Operación del reactor“

03.-04. Feb. 1998, Centro de investigación Karlsruhe

[4] A. Seibold, H.-P. Fuchs, Siemens AG

„Absicherung der BE-Auslegung und BE-Werkstoffe für modernen Einsatzbedingungen“ (“Aseguramiento

del diseño y de los materiales de elementos combustibles bajo condiciones de operación modernas”)

Jornada Anual de Tecnología Nuclear, Munich, 26.05.98

[5] W. Klinger, W. Braun, Siemens AG

„Systematische Betriebsverfolgung als Basis für zukunftsorientierte Entwicklung von BE“ (“Seguimiento sistemático de la operación como base para el desarrollo de elementos combustibles cara al futuro”)

Ponencia prevista para la Jornada Anual de Tecnología Nuclear 2000, Bonn, 23. -25. Mai 2000

[6] H. Spierling, S. Misu and H. Moon

“Fuel Rod Gamma Scan of a Siemens ATRIUM 10 Fuel Assembly”,

Transaction of the ANS Annual Meeting, pp 261-263 (1999).

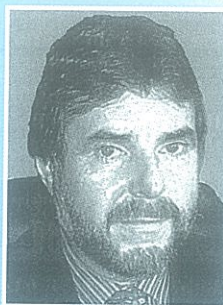
[7] W. Kramer, W. Uebelhack, E. Königstein and R. Isler

“Thermohydraulische Eigenschaften des SWR-Brennelements ATRIUM 10” (“Calidades termohidráulicas del elemento combustible BWR ATRIUM 10”),

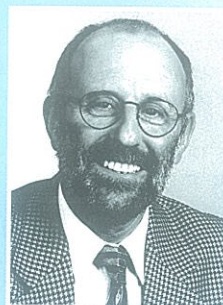
Jornada Anual de Tecnología Nuclear, pp 113-116 (1993)

[8] T. Lefvert

“Ringhals 1 Stability Benchmark” NEA, NSC, Doc 22 (1996).



Claus FENZLEIN es ingeniero mecánico por la Universidad Técnica de Hannover. En el año 1975, inició su vida profesional en Kraftwerk Union AG, con la estandarización de sistemas nucleares de generación de vapor. En 1979, pasó al área del ciclo de combustible nuclear encargándose de varios proyectos de elementos combustibles, entre otros, del desarrollo del proyecto para el primer núcleo de Trillo. Después de la adquisición de Exxon Nuclear en 1986, estuvo trabajando como enlace para la empresa que siguió operando bajo el nombre de ANF. Antes de asumir la jefatura del área de servicio de elementos combustibles, desde el año 1990 hasta 1993, fue el responsable para la disposición de fabricación en la fábrica de elementos combustibles de Siemens en Hanau. Desde el año 1995, y como jefe de un equipo de distintas funciones, es responsable del aprovisionamiento de clientes extranjeros, entre otros en España.



Dr. Peter URBAN cursó estudios y se doctoró en física en la Universidad Técnica de Darmstadt. En el año 1977, entró en KWU empezando en el área de física de reactores de agua en ebullición y planificación del empleo de elementos combustibles. En 1986, asumió la jefatura del departamento de diseño nuclear de reactores BWR. Desde 1991 hasta 1995, fue responsable del diseño de elementos combustibles BWR. En los años comprendidos entre 1995 y 1997, fue el responsable del diseño nuclear para reactores de agua a presión y de agua en ebullición. Desde 1997, es responsable de la investigación de mercado y desarrollo para clientes en Europa.