



Pedro ORTEGO SÁIZ es Doctor Ingeniero Industrial por la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. Diplomado en Ingeniería Nuclear por el I.E.N. inició su actividad profesional en Empresarios Agrupados pasando a la División de Combustible de ENUSA en 1981. Diseñador del núcleo y experto en criticidad, pasó a Jefe de Diseño del Núcleo PWR3 con responsabilidad en las recargas de ENUSA en el mercado europeo, además de soporte de Ingeniería del Combustible en criticidad, blindaje y término fuente.

ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS EN LA REDUCCIÓN DEL COSTE DEL CICLO DE COMBUSTIBLE

P. ORTEGO

La competitividad es la palabra clave en el inmediato futuro del sector eléctrico en toda Europa. La liberalización inevitable del mercado eléctrico, con la aparición de productores independientes y la opción para los grandes consumidores de elegir el suministro más adecuado a sus necesidades, plantea una serie de retos nuevos en el sector. El reciente cierre de alguna central nuclear añeja de los EEUU porque sus costes variables no pueden competir con los ofrecidos por los pequeños suministradores independientes plantea crudamente una amenaza de viabilidad económica a la propia operación de las centrales nucleares existentes. ENUSA, como diseñador y fabricante

del combustible nuclear, es consciente de esa necesidad de mejora en la competitividad de la generación nuclear y viene desarrollando diversas actuaciones para ayudar a reducir los costes del ciclo de combustible. Una de esas actuaciones consiste en aquilatar todo lo posible las necesidades de enriquecimiento del combustible utilizado para satisfacer los requisitos energéticos del cliente, como parte del león de la primera parte del ciclo de combustible nuclear, además de desarrollar y probar materiales estructurales avanzados con el fin de incrementar el quemado de descarga y reducir así el impacto de la fabricación en ese mismo coste del kWh.

Inspección de pastillas tras rectificado



Sin embargo, no es el coste directo del combustible el único impacto que éste tiene en la rentabilidad económica del reactor, ni siquiera el más importante. Aspectos difícilmente cuantificables como la reducción de la fluencia de neutrones rápidos en ciertos componentes, la capacidad de reconstruir elementos dañados, la reducción de tiempos y dosis debida a la supresión de residuos, etc. tienen impacto directo en la disponibilidad del reactor y por tanto en el coste medio variable del kWh obtenido, al reducir el impacto en el mismo de los costes variables de operación y mantenimiento.

El producto PWR avanzado cuyas características y ventajas, tanto cualitativas como cuantitativas se desarrollan en el resto de este trabajo, une en un sólo producto las características más avanzadas de los mantos axiales con uranio ligeramente enriquecido, con la flexibilidad de diseño y reducción de residuos propia del gadolinio como absorbente consumible.

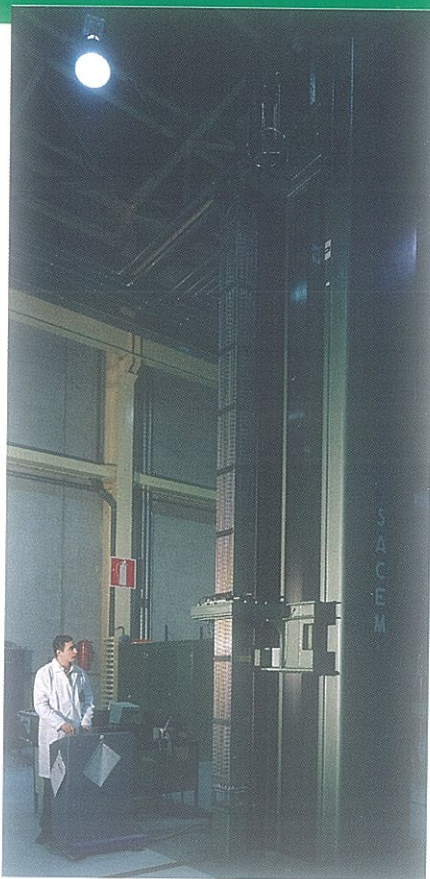
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO PWR

Este diseño contiene en cada barra dos zonas axiales en los extremos de 15 cm. de altura rellena con pastillas sólidas de uranio ligeramente enriquecido, típicamente 2,6%, con el resto de las pastillas conteniendo uranio al máximo enriquecimiento definido por las necesidades energéticas de este combustible. En las barras que contienen gadolinio, a esta zona extrema de 15 cm. le siguen sendas zonas intermedias también de 15 cm. libres de gadolinio. Después en la zona central y con una altura de 305 cm. el uranio mezclado con gadolinio tiene un enriquecimiento inferior al máximo definido y menor cuanto mayor sea la concentración de gadolinio.

La combinación de ambas características avanzadas en un nuevo producto merece ser explicada.

La utilización de mantos axiales es una mejora obvia ya que el ahorro de fugas axiales obtenido supone un ahorro directo de exceso de reactividad requerido a fin de vida del ciclo y por tanto de enriquecimiento inicial necesario. La larga experiencia de su utilización en los reactores BWR y en especial el aumento de altura del manto superior en los productos de General Electric posteriores al GE8 por las altas fugas en la parte alta del núcleo, así lo demuestran.

Además del ahorro en enriquecimiento y coste antes mencionado, la utilización de mantos axiales tiene efectos beneficiosos en las tasas de irradiación neutrónica de componentes esenciales del reactor, que aunque diseñados con un amplio margen para la vida prevista inicialmente de 40 años, pueden comenzar a hacerse limitantes cuando se plantean alargamientos de vida del reactor o aumentos de la potencia del mismo. El manto axial en el extremo superior reduce la fluencia neutrónica rápida tanto en



Inspección final de un elemento combustible AEF extralargo para el mercado europeo.

la placa superior del núcleo como en la soldadura circunferencial que une la vira central con aquella que aloja las toberas. Por otro lado, el manto axial inferior hace otro tanto con la placa inferior del núcleo, componente esencial que soporta todo el peso del mismo.

El hecho de que hasta ahora los mantos axiales no se hubieran introducido en el combustible PWR tiene más que ver con las capacidades de los fabricantes para manejar una variedad de enriquecimientos y productos en una misma instalación que con la magnitud económica del ahorro obtenido. Sin embargo, las mejoras de calidad en el proceso, desde los sistemas automatizados de carga hasta las capacidades de inspección del producto terminado con escáneres pasivo y activo, aseguran la obtención de cero defectos en el manejo de enriquecimientos diferentes.

La reducción de potencia en los extremos de la columna combustible tiene efectos significativos en la densidad de potencia en la zona central del mismo. De hecho la utilización de mantos axiales de uranio natural ha sido descartada en el desarrollo de este producto debido a las penalizaciones que se generaban en el factor local de potencia FQ y sobre todo en el DNB, lo cual podría ser inaceptable en reactores con disponibilidades de márgenes limitadas. Este efecto era debido a la práctica anulación de la potencia en los mantos axiales, que llevaba a una elevación significativa de la potencia en la zona central de la colum-

na, sobre todo en los primeros momentos de la vida del combustible.

En cambio la utilización de uranio ligeramente enriquecido en los mantos axiales, unido a la utilización del gadolinio de longitud parcial consigue aplanar la potencia y anular de hecho el impacto en FQ y DNB.

Los estudios realizados con el estado del arte en metodología de análisis del núcleo demuestran que no hay una ganancia clara en enriquecimiento debido estrictamente a la utilización de gadolinio de longitud completa frente a absorbentes discretos como los WABA's. Simplemente se obtienen los mismos resultados energéticos con un peso de uranio algo menor, 0,2%, de un enriquecimiento 0,005% superior pero con un coste económico idéntico.

Sin embargo la utilización del gadolinio combinado con el manto axial permite, gracias a la libertad de localización radial y axial del mismo, anular plenamente los efectos perniciosos que se derivan de reducir la potencia en los extremos de la columna combustible.

Por supuesto que algunas de las capacidades de aplanamiento de la potencia axial pueden también adquirirse con la utilización de venenos discretos como los WABA's pero esto redundaría en una serie de inconvenientes que no pueden obviarse. Por un lado efectos en reactividad y por tanto en energía perdida, dado que la propia estructura mecánica del absorbente discreto tiene un efecto de absorbente residual a fin de ciclo a lo largo de toda su altura, debido al desplazamiento del moderador, mientras que su equivalente para el gadolinio, la absorción de neutrones por los isótopos pares sólo existe en la longitud parcial de combustible que lo contiene.

Por otro lado, la utilización de WABA's crea una dependencia del suministro de componentes de diseño específico, que puede hacer de cada componente un verdadero prototipo, llevando a costes actuales y futuros elevados.

VENTAJAS CUALITATIVAS

Las ventajas debidas propiamente al gadolinio van por otro lado. Van del lado de la flexibilidad en el diseño del combustible, de la "customización" del producto, de la reducción de tiempos y dosis debidas al manejo de residuos y por tanto de aumento de la disponibilidad.

Con exigencias crecientes de alta energía y márgenes de seguridad en el diseño del núcleo después de cada recarga, la libertad de elección de las posiciones de los elementos combustibles en el núcleo se convierte en un aspecto crítico. El uso de gadolinio no condiciona, al contrario que los WABA's, posicionar los elementos frescos en las posiciones más favorables. Típicamente la posición (6,2) de los núcleos de tres lazos, ocupada con una barra de control, excluye la carga de un elemento fresco

con veneno consumible tipo WABA. En cambio la utilización de esta posición para un fresco con el uso de gadolinio ha permitido ganar en un caso concreto hasta 6 días de operación.

Es especialmente importante esta libertad de posicionamiento en ciclos de transición, concretamente en el paso de 12 a 18 meses, en los que se desea realizar la transición en el menor tiempo posible, incluso en un sólo ciclo, con idea de entrar cuanto antes en el sistema de recargas Primavera-Otoño de años alternos y así reducir el coste de la energía de sustitución y, por tanto, el coste medio variable del subsistema eléctrico.

Esta "transición rápida" requiere un salto importante en enriquecimiento, típicamente del 3,6 al 4,2%, que crea fuertes gradientes de potencia dentro del núcleo, exigiendo el uso de venenos consumibles en la mayoría de los elementos frescos, lo cual incide en la necesidad de libertad de posicionamiento de los elementos antes mencionada. Además, esta situación crea nuevas oportunidades de mejora al gadolinio, al permitir disposiciones asimétricas del veneno en las zonas cercanas a la periferia del núcleo, en las que sólo es necesario absorbente en el o los cuadrantes más internos, mientras que se ahorra insertar absorbente en los externos, cuya potencia está ya bastante reducida por la existencia de fuertes fugas radiales.

No podemos olvidar, pues constituye en sí mismo un auténtico salto tecnológico, la capacidad del gadolinio para adaptarse a la solución de problemas o necesidades específicas de cada reactor. En efecto, la capacidad de colocar las pastillas de gadolinio en cualquier posición radial o axial dentro del elemento permite hacer frente a problemas de irradiación excesiva de un componente de los internos, a aumentar el margen de parada si la indisponibilidad de una barra de control lo requiriera, a aplanar la distribución axial de potencia si parecen limitaciones en el F_0 , etc. Estas posibilidades no son nuevas, ya se han experimentado con éxito en la tecnología BWR, donde las dificultades iniciales debidas a la fuerte heterogeneidad radial y axial de la geometría de estos reactores, ha sido más que compensada por los logros de la ingeniería aplicada a resolver estas limitaciones. Como en otras afortunadas realidades de la vida, el esfuerzo realizado para compensar un defecto hace superar con creces la referencia inicial.

Finalmente, pero no con menos importancia hay que mencionar la reducción de tiempos, costes y dosis asociada a la desaparición de los venenos discretos, ya que desaparece la necesidad de cargarlos y descargarlos en sus elementos, la propia gestión de los mismos hasta que sean procesados como residuos y el no despreciable riesgo de que se conviertan al final en una penalización económica directa.

COMPARACIÓN ENERGÉTICA Y ECONÓMICA

Además de las ventajas previamente mencionadas y que se obtienen con el uso combinado de los mantos axiales de uranio enriquecido y el uso de gadolinio de longitud parcial como absorbente consumible, se ha realizado una comparación en términos estrictamente cuantitativos, valorando en energía obtenida y en ahorro en el coste de la primera parte del ciclo de combustible, el uso de este producto avanzado.

Así pues se ha analizado el enriquecimiento necesario y el coste de combustible en pta/kWh asociado para cumplir con unos requisitos energéticos típicos de un reactor Westinghouse de tres lazos operando en ciclos de 18 meses y con un factor total de utilización muy alto, del orden del 90%. El producto avanzado, descrito al principio, es decir mantos axiales con enriquecimiento 2,6% y gadolinio de longitud 305 cm., se compara con el producto actualmente empleado, es decir combustible de enriquecimiento uniforme empleando WABA's como absorbente.

La comparación se hace para la misma energía de ciclo exactamente, es decir 490 DEPP, realizándose la comparación en términos de enriquecimiento medio necesario y en el coste asociado. El quemado de descarga obtenido, 45000 MWd/tU es el considerado óptimo actualmente e implica la carga de 64 elementos frescos en un esquema de bajas fugas para ganar reactividad y con factor de canal caliente de 1,50 sin incertidumbres.

La metodología empleada en la comparación corresponde al estado del arte en análisis del núcleo, es decir modelación tridimensional con detalle de potencia y quemado por barra combustible, usando el sistema de códigos neutrónicos APA (ALPHA/PHOENIX/ANC).

Los esquemas de carga son razonablemente óptimos y también el número de WABA's o de barras con gadolinio se ha reducido a un mínimo para que la comparación energética y especialmente económica sea estricta.

La comparación se ha realizado para el ciclo de equilibrio, con objeto de olvidar diferencias anteriores en el quemado de los elementos presentes en el núcleo. A este equilibrio se ha llegado quemando tres ciclos con alimentación constante.

Los resultados obtenidos indican la necesidad de un enriquecimiento uniforme de 4,15% en el estudio con WA-

BA's para alcanzar los objetivos energéticos, frente a un enriquecimiento de media aritmética 4,0908% en el producto avanzado, obtenido con una zona central de 335 cm. con enriquecimiento 4,26% y los mantos axiales enriquecidos al 2,6%. El número de barras absorbentes requeridas es de 500 en la solución WABA frente a 392 en la de gadolinio.

Por tanto el ahorro en enriquecimiento medio que se obtiene es 0,0592%. Por otro lado el enriquecimiento central, 4,26%, es sólo 0,11% superior al uniforme del caso WABA's, no teniendo por tanto impacto en el licenciamiento de los almacenes fresco y gastado de los grandes PWR españoles (limitados al 4,30 y 4,50%).

Para la evaluación del ahorro económico se han empleado los precios de concentrados, enriquecimiento y conversión dados por EURATOM con fecha de finales del año 1995 y se han tenido en cuenta los costes financieros derivados de los pagos anticipados durante estos procesos. Los precios de fabricación utilizados son representativos de la situación analizada.

Los resultados obtenidos dan un ahorro en el coste total del kWh de casi un céntimo para la primera parte del ciclo de combustible con el empleo del producto avanzado. El valor absoluto de este ahorro es de un centenar de millones de pta. por cada ciclo operado.

ESTRATEGIAS FUTURAS DE CICLOS

La comparación anterior es perfectamente válida para la situación actual de operación de ciclos de 18 meses. Sin embargo, el proceso de incremento de potencia que se encuentra ya iniciado para los grandes PWR españoles obliga a comprobar la validez de estas conclusiones para la situación "post-uprate", es decir con potencias térmicas entre 2900 y 3010 MW.

Pasa a la pág. 30

Vista del esqueleto del elemento combustible desde el cabezal superior.

