



José Manuel ALONSO PACHECO es Ingeniero de Caminos por la Universidad Politécnica de Madrid. Trabaja en la División de Combustible de ENUSA desde 1.981, donde ha estado desempeñando diferentes cometidos y responsabilidades en el área del diseño mecánico del combustible, siendo en estos momentos Jefe del Departamento de Ingeniería del Producto. Es, así mismo, desde 1.988 el representante español ante el OIEA en el grupo internacional de trabajo sobre comportamiento y tecnología del combustible (IGWFTP) y desde 1.990 el Director del Proyecto Halden España en el área de combustible - materiales, representando a nuestro país en el comité técnico internacional de seguimiento de dicho proyecto.

COMPORTAMIENTO Y FIABILIDAD DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

J. M. ALONSO

La operación de las centrales nucleares se ve afectada en mayor o menor grado por la calidad del comportamiento en servicio del combustible nuclear. Dicha calidad se mide por el nivel de las prestaciones ofrecidas por el combustible y por su fiabilidad.

Son conocidos los esfuerzos de la industria por atender una demanda creciente de mayores quemados de descarga que permitan un aprovechamiento más eficiente del uranio al tiempo que se reduce el inventario de combustible gastado; de unos productos que doten de mayor flexibilidad a la operación y faciliten la disminución de los costes de explotación, y, sobre todo, de un combustible fiable durante su vida prevista de operación, de manera que, prácticamente, se eliminen los fallos en la estanqueidad de las vainas.

Aunque las consecuencias, en principio previsibles, de una falta de hermeticidad de una barra combustible son despreciables desde el punto de vista de seguridad, y su potencial de contaminación del circuito primario es pequeño y está dentro de la propia capacidad de limpieza del mismo, está cobrando importancia creciente la atención prestada por el explotador de la central a la incidencia del combustible fallado en la operación.

Por una parte se produce un efecto negativo inmediato asociado a los costes que conlleva la existencia de combustible con fugas en el núcleo, ejemplo de ello son los derivados de las siguientes situaciones:

- seguimiento más detallado de la radio-química del primario.

- estudio de estrategias para la operación en ciclos sucesivos, contemplando campañas de inspección y de reparación.

- acometer, si así se decidiera, campañas de inspección, o de inspección/reparación.

- prescindir de combustible parcialmente gastado, con un potencial, a veces importante, de producir energía.

- servicios de rediseño y licenciamiento del núcleo prescindiendo de los elementos defectuosos.

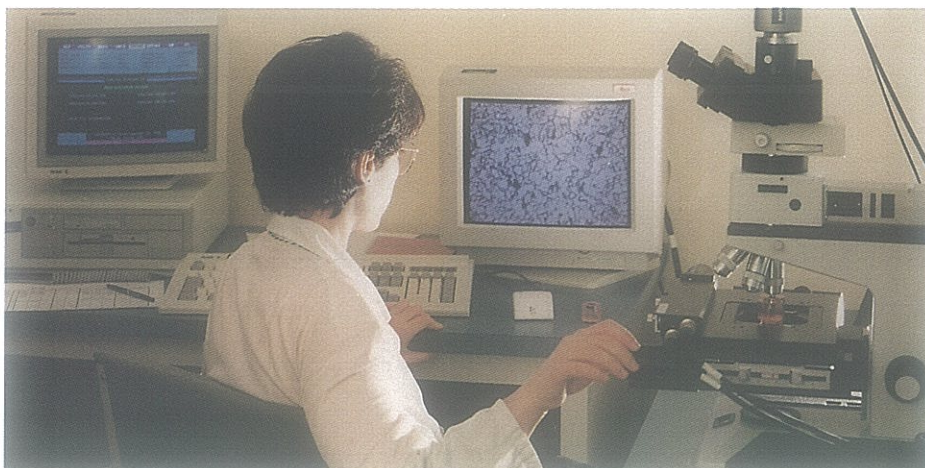
- riesgos de degradación significativa del combustible con combustible dañado procedente de ciclos anteriores.

Por otra parte la existencia de combustible con falta de estanqueidad durante la operación contribuye notablemente a la contaminación de fondo del circuito primario, haciendo más críticas las limitaciones, que por motivos de dosis al personal, se establecen en relación con los trabajos de mantenimiento de equipos e instalaciones afectadas.

Para satisfacer tales expectativas los fabricantes de combustible acometen planes de mejora continua en sus procesos de diseño, de fabricación e inspección, y participan en programas específicos de investigación y desarrollo que proporcionen la tecnología básica para justificar la validez de las innovaciones y la disponibilidad de márgenes de diseño para operar de forma satisfactoria.

De los elementos arriba mencionados queremos en este artículo incidir especialmente en los referentes a los programas de irradiación. Las exigencias

Análisis Microestructural de Pastillas. (Fábrica de Juzbado)



particulares de la seguridad nuclear, la utilización de materiales singulares, la consideración de los efectos de las radiaciones sobre la materia y el entorno dinámico que invita a la innovación continua obliga a contar con sofisticados programas experimentales de irradiación como herramienta necesaria de validación de los modelos de comportamiento del combustible en el reactor. Dentro de este concepto de programa de irradiación incluiremos toda una gama de actividades que va desde la vigilancia sistemática del comportamiento en servicio del combustible a la realización de experimentos complejos en instalaciones al efecto. Todos constituyen importantes piezas sobre las que de una forma u otra se apoya el uso seguro y fiable del combustible, ya que:

- confirman el comportamiento previsto de acuerdo a las expectativas de los diseñadores,
- puedan alertar sobre la existencia de fenómenos inesperados o condiciones críticas que deben evitarse,
- proporcionan base de datos experimentales para validar modelos matemáticos más precisos
- caracterizan posibles daños en el producto, posibilitando el análisis de los mismos y la búsqueda de soluciones,
- permiten separar efectos procedentes de mecanismos diversos, como medios para llegar al entendimiento conceptual de los mismos,
- justifican la validez de nuevos materiales o de cualquier otra innovación aplicada en el producto.

En definitiva, dicho de otra manera, debemos admitir que sin el concurso de los programas de seguimiento de irradiación no es posible garantizar un grado razonable de fiabilidad en servicio para el combustible, y menos todavía si tenemos en cuenta las condiciones de operación cada vez más demandantes. No se puede, por citar varios ejemplos, ignorar los efectos que el alargamiento paulatino del quemado puede tener sobre las múltiples propiedades y características del combustible, o el impacto de un cambio significativo en las condiciones químicas del primario, o el de la introducción de un prototipo nuevo de combustible. ENUSA está, por lo tanto, vinculada en diversas formas y con alcances diferentes en este tipo de programas. Indirectamente participa y se beneficia de los propios de Westinghouse y General Electric a través de los contratos de transferencia de tecnología suscritos con estas compañías. En este artículo sólo nos referimos a aquellos en los que nuestra participación es directa.

Los restantes aspectos que hemos indicado más arriba con una incidencia destacable en la fiabilidad del combustible no constituyen elementos aislados de los programas de irradiación y son, indudablemente, objeto de la atención y dedicación de ENUSA. Forman parte de nuestros proyectos generales de mejora, y están enmarcados dentro de un programa de calidad total. Aunque no van a ser

objeto de una descripción detallada en este trabajo, si queremos citar algunos ejemplos ilustrativos para dar una idea más completa del alcance e implicaciones de nuestro compromiso con la mejora en la fiabilidad del combustible que fabricamos:

- Introducción de elementos o soluciones de tipo mecánico en los conjuntos combustible para la mejora de la tolerancia al daño, por ejemplo los cabezales filtro o la geometría antienganche de las rejillas.
- La mejora en las propiedades especiales de los materiales a través de una especificación más elaborada y exigente
- La racionalización del control de suministros y materias primas empleadas en nuestra fabricación
- El establecimiento de grupos diversos de mejora de procesos que afectan a la fabricación del producto: soldadura, carga de barras, fabricación de esqueletos, sinterización de pastillas, etc.
- Análisis crítico y en detalle de todos los procesos fabriles que puedan potencialmente incidir en la hermeticidad de las barras combustibles
- Introducción de sistemas de inspección por ultrasonidos de las soldaduras de las barras combustibles
- Control microestructural de la morfología de las pastillas mediante análisis de imagen
- Inspección dimensional automatizada de los diámetros de pastilla
- Control de los elementos y materiales en contacto con el combustible durante el proceso de fabricación
- Establecimiento de métodos experimentales más apropiado (nuevos ensayos) para verificar la validez del diseño del combustible
- Mejorar los modelos y herramientas de diseño
- etc

Si bien todos estos elementos contribuyen a garantizar el suministro de unos productos competitivos y de alta calidad, es fundamental complementarlos con los relativos al seguimiento del comportamiento en el reactor de los mismos. Las actividades propias de ENUSA en este área son diversas y trataremos de agruparlas de acuerdo con el objetivo más inmediato de las mismas. Todas redundan en el aumento del conocimiento sobre el producto y sus propiedades, y en la identificación de los elementos de mejora.

Actividades de Seguimiento del Comportamiento en Servicio mediante el Análisis de la Radio-Química del Primario

Consiste en la recepción y tratamiento de una forma casi continua de la información procedente de las centrales referente a la radio-química del agua del circuito primario. Mediante el análisis de la actividad de los isótopos presentes en el mismo, fundamentalmente de los yodos, gases nobles y cesios, se puede llegar a

determinar, con relativa precisión, aspectos importantes sobre el comportamiento del combustible:

- En primer lugar permite conocer sin error la condición de ausencia/existencia de barras combustibles con fugas
- Se puede estimar el número aproximado de barras dañadas
- Igualmente se realizan estimaciones del grado medio de quemado de las barras con fallos
- La severidad del daño también puede valorarse, así como, a veces, la evolución del mismo con el quemado, identificando, en su caso, la presencia de un proceso de degradación del combustible defectuoso.

Representa un instrumento de valiosa ayuda para la vigilancia del combustible durante la operación del reactor y para realizar previsiones para las tareas a realizar durante la parada por recarga del combustible.

Actividades de Servicios de Combustible en Central

Incluimos en este grupo diferentes servicios prestados en el propio emplazamiento de la central que pasamos a describir.

- Vigilancia y soporte en la tareas de recarga y movimiento del combustible. El objetivo inmediato es atender posibles incidencias en estas operaciones que requieran decisiones especializadas sobre el combustible. Otro importante resultado es la identificación de puntos de mejora en el producto para facilitar y optimizar dichas tareas.
- Inspección de combustible para la identificación de conjuntos o barras con daño con el fin de evitar la utilización de combustible defectuoso en el ciclo siguiente. Conjuntamente con la inspección visual mediante cámara subacuática se aplican distintos métodos para la localización de defectos el más habitualmente empleado por ENUSA es el basado en la inspección de todas las barras mediante ultrasonidos, método que permite la identificación individualizada de las barras dañadas con una precisión razonable. La identificación de estas barras posibilita, por otra parte, la realización de trabajos posteriores de reparación y de investigación de la morfología del defecto y sus causas.
- Reparación del combustible dañado. Normalmente se trata de extraer las barras defectuosas y sustituirlas por otras de reactividad equivalente o bien por barras de acero de la misma sección transversal. A veces, cuando el daño afecta a la propia estructura del conjunto combustible, las barras se transfieren a un nuevo esqueleto de combustible. En estas operaciones se consigue, en general, un acceso a la zona dañada posibilitando la caracterización y clasificación del defecto y la potencial determinación del origen del mismo.

Programas de Elementos de Demostración

Constituye una práctica habitual y recomendable la introducción de conjuntos combustibles "precursores" o de demostración cuando se trata de introducir por vez primera un nuevo prototipo de combustible o alguna innovación cuyo impacto en el comportamiento pudiera ser significativo.

Un programa de demostración supone, con carácter general lo siguiente,

- se trata de un número reducido de conjuntos combustible (usualmente cuatro)
- durante su fabricación se les ha sometido a un plan de caracterización especial, muy riguroso en la mayoría de los casos, sobre todo en aquellas propiedades o dimensiones más relacionadas con los elementos innovadores.
- se contempla un plan de seguimiento del comportamiento en servicio específico, que, aunque depende de los casos, suele constar de una inspección visual, de la verificación de ausencia de fugas, y de una previsión de medidas complementarias en el caso de observaciones anómalas.

Hasta el momento cabe señalar los siguientes programas de elementos de demostración con combustible fabricado por ENUSA, el primero de los cuales ya concluido.

- Combustible 14 x 14 LOLOPAR en C.N. José Cabrera
- Combustible GE11 en C.N. de Cofrentes
- Combustible 17 x 17 AEF con gadolinia en Ascó II
- Combustible 17 x 17 AEF XL para EdF

Programas de Investigación sobre Combustible Irradiado

Aquí nos referimos a proyectos con un objetivo tecnológico muy definido, no se trata de probar simplemente el buen comportamiento de un producto nuevo, sino de cuantificar y caracterizar aspectos concretos del mismo. Constituyen un medio esencial para la calibración o verificación de modelos de comportamiento o para el entendimiento de problemas particulares que afectan al Combustible. Dado que se emplea material irradiado comercialmente, su representatividad está garantizada.

Se van a resaltar, seguidamente los puntos más sobresalientes de los programas en los que ENUSA está involucrada.

Programa Zirlo de Almaraz II

El programa es el resultado de un acuerdo entre C.N. de Almaraz y ENUSA cuyo objeto es la investigación del comportamiento frente a la corrosión, a alto quemado, de vainas fabricadas con diferentes aleaciones de circonio: Zircaloy 4 estándar, Zircaloy 4 mejorado y Zirlo™.



Equipo de Ultrasonidos. Control de Calidad de Soldaduras. (Fábrica de Juzbado).

Este programa es en parte continuación de otro, ya concluido, cuya finalidad fue también la caracterización de la corrosión de las vainas.

El interés del programa es múltiple. Es bien conocida la preocupación sobre el carácter limitante de la corrosión al seguir elevando los niveles de quemado y períodos de residencia del combustible en el reactor, por ello conviene ampliar la base de datos de comportamiento con medidas sobre barras que representen tales condiciones. Interesa, además, que dichas condiciones sean también representativas de los reactores en los que ENUSA suministra combustible debido a lo sensible que la corrosión resulta ser al entorno de operación (temperatura, potencia lineal, química del primario,...). Por otra parte, se considera muy oportuna la adquisición de experiencia propia de irradiación de la nueva aleación de vainas Zirlo™ desarrollada por Westinghouse, ya que se le considera como buena candidata para sustituir en el futuro al Zircaloy 4 para operar bajo condiciones más limitantes frente a la corrosión.

El propósito de las medidas previstas se centra en la corrosión y el crecimiento de barra inducido por la irradiación. Los resultados se emplearán en la verificación de los modelos vigentes de corrosión y crecimiento para los materiales investigados.

Programa de Barras Segmentadas de Vandellós II

Es un programa de colaboración entre organizaciones japonesas (NUPEC, Kansai Electric Power Co, en representación de otras compañías eléctricas japonesas y MHI) y españolas (ENDESA, C.N. Vandellós II y ENUSA), con la participación de Westinghouse. Este programa fue presentado en una ponencia en la pasada reunión de Cáceres de la SNE, por lo que evitaré entrar aquí en excesivos detalles. Simplemente indicar que se trata de irradiar diferentes combinaciones de materiales avanzados de vaina y pastilla, empleando unas barras, denominadas segmentadas, especialmente concebidas para este proyecto. Destacamos, también, que algunas barras se extraerán a lo largo del período previsto de irradiación para ser sometidas a análisis y evaluación en celdas calientes, o para someterlas a unas rampas de potencia en un reactor experimental con objeto de determinar la resistencia frente a los transitorios de potencia en la operación. Los principales parámetros que serán objeto de caracterización son los siguientes: corrosión de vainas, crecimiento de barra, propiedades mecánicas del material de vaina, fluencia mecánica de las vainas, liberación de gases de fisión, morfología microestructural de las pastillas, contenido en hidrógeno en las vainas y resistencia a la interacción pastilla-vaina.

Es, en definitiva, un programa tecnológicamente ambicioso, con un horizonte de realización que llega hasta el año 2000 y que va a proporcionar información muy importante y relevante sobre el comportamiento del combustible y sobre las posibilidades de las nuevas aleaciones.

Programa de Caracterización de Combustible BWR Fallado

Es un programa liderado por General Electric en el que ENUSA ha colaborado activamente. El objetivo ha estado dirigido a establecer la circunstancia y mecanismos que determinan los fenómenos de degradación post-defecto así como a modelizar el comportamiento de las barras defectuosas.

Los fenómenos de degradación de las vainas falladas, caracterizados por una alta liberación de productos de fisión al refrigerante, se han observado en los reactores de agua en ebullición en varias ocasiones.

Los resultados de todo este esfuerzo han permitido un mejor conocimiento de los procesos y condiciones que llevan a la degradación, pudiendo justificar soluciones basadas fundamentalmente en el empleo de nuevos materiales para vainas resistentes a la degradación y en la determinación de las condiciones idóneas de operación con las vainas susceptibles de fallo que estén actualmente en los reactores.

Como complemento al trabajo realizado, se está en proceso de definición de un programa de investigación en celdas calientes para alguna de las barras fabricadas por ENUSA en la que se ha experimentado esta degradación.

Especialmente se trata de identificar el fallo primario que puede provocar la degradación post-defecto e investigar las causas que lo indujeron con el fin de introducir las correcciones oportunas que eviten incidencias de este tipo.

Programas Internacionales de Irradiación

Son programas en los se establece un consorcio o asociación de instituciones y empresas en torno a un promotor para emprender un programa de investigación sobre temas que afecta a la generalidad de la industria y que requieren un esfuerzo financiero considerable.

ENUSA participó hace años en el programa TRANSRAMP II conjuntamente con el CSN y el CIEMAT, y está en estos momentos participando en el proyecto Halden de la OCDE, a través de un acuerdo con el CSN, UNESA, TECNATOM y CIEMAT, y en el proyecto NFIR del EPRI. Se tratan de programas públicos y bien conocidos por lo que evitaré describirlos y sólo me referiré a los proyectos particulares dentro de los mismos cuyo interés se considera prioritario para ENUSA.

Proyecto Halden

- Influencia del grado de quemado en la conductividad térmica del óxido de uranio.

El daño que la irradiación va causando en la estructura cristalina del UO_2 determina que sus propiedades se vean afectadas por el quemado. En particular la conductividad térmica puede degradarse. Este hecho afectaría al comportamiento termo-mecánico global de la barra combustible por sus consecuencias en la temperatura de la pastilla y por ser la temperatura una variable que domina otros muchos mecanismos y propiedades. La liberación de gases de fisión, la energía almacenada en el combustible, su constante de tiempo serían entre otros, parámetros a reconsiderar.

- Estudio del mecanismo de fluencia mecánica del Zircaloy inducida por la irradiación.

El efecto cuantitativo de la irradiación (flujo de neutrones rápidos) sobre la tasa de fluencia mecánica de los materiales de vaina se conoce sólo indirectamente. Se basa, esencialmente, en medidas de los diámetros de barra después de cada ciclo de operación. En estas medidas quedan enmascarados varios efectos concurrentes durante la irradiación, de manera que no es posible aislar completamente la contribución del término de irradiación. Gracias al grado de sofisticación en los dispositivos de ensayo y técnicas instrumentales desarrolladas por Halden, es posible medir casi en línea la

evolución del diámetro de las vainas bajo condiciones mecánicas controladas y conocidas. Se puede, así, someter a los especímenes a ciclos de tracción/compresión y observar los períodos de transición, el efecto en el cambio en el sentido de las tensiones, etc. Los resultados de este experimento van a permitir una modelización mucho más refinada del comportamiento a fluencia de las vainas, y de la condición a final de vida de aquellas barras cuya presión interna sea superior a la del sistema.

- Mecanismos de absorción y migración del hidrógeno en las vainas.

Junto con la corrosión, la acumulación de hidrógeno en las vainas se percibe como un limitador crítico a la extensión del quemado y del tiempo de residencia. La presencia de hidrógeno en las mismas determina una pérdida en la tenacidad del material haciendo su comportamiento, especialmente en frío, inaceptable mecánicamente.

Los procesos por los cuales el hidrógeno penetra en las vainas y se redistribuye en su interior no son suficientemente conocidos. De nuevo en Halden, se ha diseñado un experimento en el que se va a poder estudiar la influencia de varios efectos de una forma desagregada: tipo de material, nivel de irradiación acumulado, condición de tensiones locales, condición de zonas frías locales, diferentes niveles de tensión... Con los resultados de estos experimentos se estará en condiciones de revisar críticamente los postulados actuales relativos al control de hidrógeno en las vainas irradiadas.

- Comportamiento de la Gadolinia

Se trata de caracterizar propiedades térmicas del combustible con gadolinia a muy alto quemado y datos sobre los mecanismos de liberación de gases de fisión. Son experimentos similares a otros realizados hace tiempo con UO_2 , así los resultados permitirán realizar una comparación cualitativa muy interesante y cuantificar los efectos de la presencia de Gd en las pastillas.

Proyecto NFIR III

- Integridad de las vainas a alto quemado

Se trata de un programa sobre el efecto del hidrógeno en las vainas combustibles, complementario, en cierta medida, del de Halden referido anteriormente. Se centra el proyecto NFIR en la determinación de las propiedades mecánicas de las vainas con diferentes niveles de contenido en hidrógeno y de fluencia neutrónica acumulada. Los resultados permitirán documentar los límites de diseño del contenido máximo de hidrógeno en las vainas en función del quemado.

- Degradación del combustible defectuoso

Se trata de simular un defecto primario en un segmento de barra y determinar las condiciones y circunstancias para la aparición y desarrollo de defectos secundarios y degradación (hidruración masiva, grietas axiales importantes). El experimento se realizará en el reactor de Halden en una posición para lo que

se ha diseñado un dispositivo especial para controlar la simulación del defecto primario y la evolución posterior de la barra combustible. Una condición muy interesante que se va a investigar es la influencia de la barrera de circonio en el proceso de degradación. Un mejor entendimiento de los mecanismos que pueden llevar a una degradación indeseable de la barra combustible fallada es fundamental para saber, por una parte, qué modificaciones de diseño convendría incorporar en el producto y, por otra, qué circunstancias deben ser evitadas una vez que se tiene constancia de que existe combustible fallado en el núcleo.

Sistema de Inspección en Servicio del Combustible para centrales PWR

Fruto de la colaboración entre Iberdrola, Tecnatom y ENUSA se está desarrollando un sistema original de inspección del combustible irradiado cuyas capacidades previstas son las siguientes:

- inspección visual de alta resolución mediante técnicas de visión artificial que permiten caracterizar dimensionalmente el combustible irradiado.
 - determinación del espesor de la capa de óxido sobre las vainas combustibles periféricas mediante un sistema automático de corrientes inducidas.
- Con la disposición de este equipo mejorará notablemente la capacidad para examinar el comportamiento del combustible en el reactor, especialmente respecto a aquellos parámetros que más críticos pudieran ser ante la elevación del grado de quemado o del tiempo de residencia.

Como puede verse por lo descrito hasta aquí, las iniciativas en curso para el seguimiento y conocimiento del comportamiento del combustible se caracterizan por la variedad de sus enfoques, alcances, medios y colaboraciones requeridas para acometerlas. Pero sus fines últimos resultan claramente coincidentes y que a modo de resumen vamos a destacar

- confirmación del comportamiento esperado
- ampliación de base de datos de comportamiento
- capacidad para inspeccionar y evaluar el combustible irradiado
- investigación de aspectos singulares que afectan al comportamiento y a la fiabilidad.

Todos ellos, en definitiva, conducen a que la industria del combustible nuclear (fabricantes, usuarios y reguladores) cuenten con elementos sólidos para mejorar los productos y las herramientas y modelos de diseño empleadas en la verificación de los mismos. El compromiso de ENUSA en esta línea es decidido y el esfuerzo acometido en los últimos años así lo demuestra. Con ello queremos dar una merecida satisfacción a las expectativas de nuestros clientes respecto de los productos que les suministramos.