

# PROGRAMA DE ELEMENTOS DE DEMOSTRACIÓN DE ALTO QUEMADO EN VANDELLOS II

M. RODRÍGUEZ - A. PÉREZ - R. CANENCIA

Se va a llevar a cabo un programa de irradiación de combustible, con el fin de caracterizar las propiedades de los elementos de combustible a altos quemados. Fundamentalmente, el programa consta de la irradiación de cuatro elementos de plomo de prueba del tipo 17x17 MAEF con carcasa y vainas de ZIRLO™, y una rejilla de protección, hasta un quemado de descarga próximo a la media de barra de plomo de 75 MWd/kgU en C.N. Vandellós Unidad II, en condiciones representativas de la irradiación comercial del combustible del futuro.

En estos elementos de combustible, se realizarán unas modificaciones en su geometría axial, con el fin de maximizar el margen de diseño para alcanzar el objetivo de quemado de descarga, además se empleará un enriquecimiento mayor. Adicionalmente, estos cuatro elementos de combustible incorporarán algunos componentes o características nuevas respecto a los actuales elementos de combustible de ENUSA, con el fin de aprovechar este programa de irradiación para investigar y comprobar el comportamiento de las innovaciones, por ejemplo los distintos tipos de aleaciones avanzadas, granas de mayor densidad, etc.

*A fuel irradiation program is going to be performed in order to characterize the fuel assembly properties at high burnup. Basically this program consists on irradiating four lead test assemblies of type 17x17 MAEF with ZIRLOTM skeleton and cladding, and protective grid to a discharge burnup close to 75 MWd/kgU lead rod average in C.N. Vandellós Unit II under representative conditions of the future fuel commercial irradiation.*

*These fuel assemblies will include some modifications on their axial geometry in order to maximize the design margin to get the target discharge burnup, also a higher enrichment will be used. Additionally, these four fuel assemblies will incorporate some new components or characteristics with respect to the current ENUSA fuel assemblies in order to use this irradiation program to investigate and prove the behaviour of innovations, such as different types of advanced alloys, higher density pellets, etc.*

## OBJETIVO Y ANTECEDENTES

El incremento de la efectividad en el aprovechamiento del combustible es uno de los objetivos principales del ci-

clo del combustible. Los diferentes análisis al respecto realizados hasta el momento coinciden en que ese mejor aprovechamiento conlleva alcanzar grados de quemado mayores a los actuales.

Por otro lado, el incremento en el grado de quemado del combustible debe ser logrado manteniendo márgenes de diseño adecuados, de manera que se garantice la integridad del combustible y, por tanto, la seguridad del mismo.

Es fundamental conocer el comportamiento de los materiales y componentes que constituyen el combustible a esos grados de quemado. Por ello se hace necesaria una investigación de toda la fenomenología asociada al incremento de los grados de quemado del combustible que permita desarrollar las herramientas de análisis adecuadas.

Para ello desde hace años la industria del combustible nuclear ha venido desarrollando múltiples iniciativas y programas que están sentando las bases del uso futuro del combustible. Programas internacionales bien conocidos, como el NFIR y Halden, han contado con una participación española activa, permitiendo la adquisición de información y conocimientos muy relevantes respecto de las propiedades y comportamiento del combustible en

función de su grado de quemado.

ENUSA, por su parte, en colaboración con sus clientes y socios tecnológicos, ha promovido programas de irradiación en los que se ha ido caracterizando el estado del combustible a lo largo de su vida en servicio, incluyendo en algunos casos la realización de inspecciones en celda caliente y la irradiación complementaria en reactor experimental. Destacan al respecto los programas de *Barras Segmentadas*, patrocinado por el Organismo oficial japonés NUPEC, y con la participación de Kansai, ENDESA, MHI, Westinghouse y ENUSA, que aún está en curso en lo que se refiere a rampas de potencia y análisis en celdas calientes y el de Extensión de Irradiación, participado por Kansai, MHI, ENDESA y ENUSA, todavía en su fase de irradiación. Ambos programas se han llevado a cabo en la C.N. Vandellós II.

Más recientemente se han emprendido una serie de proyectos internacionales que persiguen el estudio del comportamiento del combustible a quemados por encima de los límites actualmente licenciados. De ellos merecen especial atención, por las repercusiones que tendrán para el uso futuro del combustible en España, los siguientes: el programa promovido por la NRC para determinar las bases de diseño del accidente de LOCA a

## SINERGIAS EN I+D DE LA INDUSTRIA NUCLEAR ESPAÑOLA

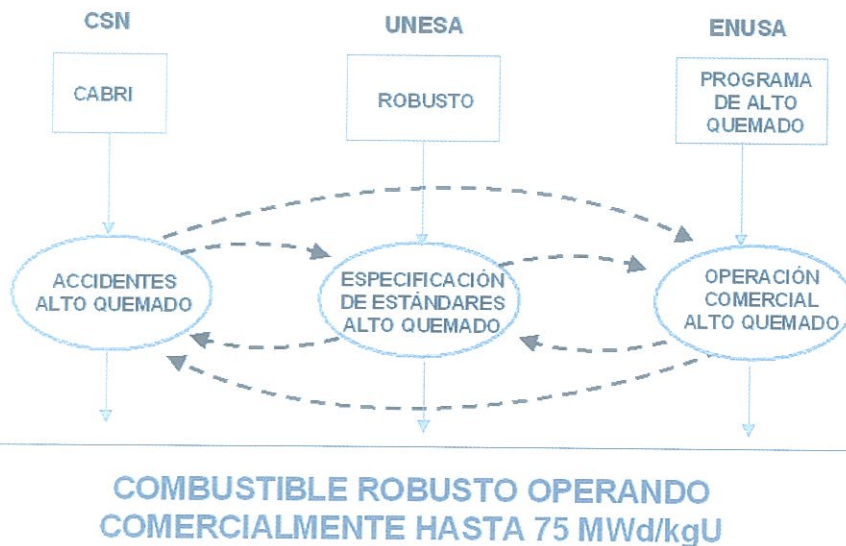


Figura 1.

quemados elevados; el programa "Robust" del EPRI en el que participa el sector eléctrico español, y el Proyecto Cabri sobre el accidente de RIA en el que participa el CSN.

Dentro de este contexto ENUSA ha decidido acometer un nuevo programa que permita incrementar el conocimiento sobre el combustible a quemados medios de descarga superiores a los actualmente licenciados.

La industria nuclear española ha sabido aprovechar todas estas oportunidades, incorporándose de forma activa a cada uno de estos proyectos, y está estableciendo los canales oportunos para aprovechar toda la información que se genere en beneficio de todos los agentes. En la Figura 1 puede verse de forma gráfica esta idea.

Este programa de consiste en la irradiación de cuatro conjuntos combustibles del tipo 17x17 MAEF/ZIRLO hasta quemados en el entorno de 75 MWd/kgU y bajo condiciones representativas de lo que podría esperarse de una irradiación comercial futura del combustible.

El programa se llevará a cabo en la C.N. Vandellós II y comprende un conjunto de inspecciones a realizar en la propia central al final de cada ciclo de irradiación, de tal manera que se caracterice la evolución dimensional del combustible y del espesor de la capa de óxido en las vainas. Asimismo, al final de la irradiación se llevarán a cabo

inspecciones complementarias, incluyendo trabajos en celda caliente, que definan adecuadamente el estado y propiedades mecánicas del combustible tras haber alcanzado los niveles de quemado objetivo.

Complementariamente, está previsto que estos cuatro conjuntos de demostración incorporen ciertos elementos o características novedosas respecto del actual producto ENUSA, y así aprovechar el programa de irradiación para investigar y probar el comportamiento de varias innovaciones del diseño.

En este proyecto, cuyos promotores son KANSAI, que representa a otras empresas eléctricas japonesas, ENDESA, MHI y ENUSA, se ha invitado a participar a otros fabricantes de combustible y fabricantes de vainas de aleación de circonio.

Fruto de estas conversaciones, han aceptado su participación empresas de reconocido prestigio internacional, como son Westinghouse (EEUU), Nuclear Fuel Industries (Japón), Mitsubishi Material Corporation (Japón) y Zircoproducts (Japón).

### DESCRIPCIÓN Y DISEÑO DE LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Los elementos combustibles pertenecientes a este programa de irradiación (a partir de ahora LTA) serán del tipo 17x17 MAEF, con esqueleto y vainas

de ZIRLO y rejilla protectora, es decir, similares a los restantes elementos frescos que se cargarán en C.N. Vandellós. Los elementos incluirán ciertas modificaciones en su geometría axial con el fin de maximizar el margen de diseño que permita alcanzar con seguridad los quemados previstos de descarga, y requerirán emplear un mayor enriquecimiento.

Complementariamente se pretende aprovechar este programa de irradiación de alto quemado para introducir otras modificaciones respecto del diseño MAEF, que si bien no todas tienen una relación directa con la capacidad para elevar el grado de quemado del combustible, representan alternativas de diseño interesantes desde el punto de vista de la mejora en las prestaciones del combustible. Seguidamente se señalan y se describen brevemente dichas modificaciones:

#### A) Cabezal Superior

Para dos de los LTA, se utilizará un nuevo cabezal superior que permite que los tornillos del resorte trabajen a compresión eliminando la posibilidad de un fallo en servicio por corrosión bajo tensión o fatiga. Esta modificación utiliza un diseño de cabezal mixto de modo que comprende la placa adaptadora de ENUSA y el tornillo resorte y el alojamiento del resorte de acuerdo al diseño de MHI. En este diseño los resortes se unen al cabezal mediante unos tornillos roscados sobre la placa de fijación del resorte (integrada ésta en el propio conjunto cabezal) en lugar de hacerlo sobre el marco del cabezal. Además el tornillo del resorte es de acero inoxidable tipo AISI304.

#### B) Vainas

Se pretende que este programa ofrezca la posibilidad de comparar el comportamiento a alto quemado de aleaciones avanzadas de material de vaina. El interés de estas aleaciones se basa en una potencial mejora del comportamiento frente a la corrosión y en una mayor estabilidad dimensional por efecto de la irradiación.

Con estos propósitos, los nuevos materiales de vaina fueron desarrollados siguiendo dos líneas de investigación.

a) Modificaciones en la composición química con respecto a los materiales actuales y ampliamente experimentados en reactor.

b) Optimización de los procesos termomecánicos de producción.

Como resultado de las investigaciones anteriores, los siguientes grupos de aleaciones con base circonio han sido

desarrollados:

- Vainas de la familia del ZIRLO, fabricadas por Westinghouse, a fin de probar pequeñas variaciones en la aleación actual con el fin de optimizar la presente especificación y ganar conocimiento sobre la relación entre las variables de la especificación y el comportamiento en operación.

- Vainas proporcionadas por MHI con idéntico propósito al caso anterior. Entre estas vainas se encuentran variantes del MDA, material avanzado desarrollado por MHI y que ya se ha empleado en el programa de Barras Segmentadas en España, así como vainas desarrolladas por otros suministradores de MHI.

### C) Pastillas

Con relación a las pastillas, las barras combustibles de los cuatro elementos de demostración se van a fabricar con una densidad mayor a la actualmente utilizada. En concreto, de las 264 barras combustibles de cada elemento, una barra combustible será fabricada con una densidad del 97% TD y el resto de barras con una densidad nominal de 96% TD, dentro de la especificación actual. Este aumento de densidad permitirá aumentar la masa de combustible por conjunto, que, a igualdad de quemado de descarga, proporcionará mayor energía producida.

Adicionalmente a las ventajas potenciales que esto representa en términos de la reducción del número de elementos frescos o del alargamiento de la longitud del ciclo, las pastillas de alta densidad tienen otros efectos beneficiosos como son una reducción del potencial de la pastilla para captar y retener hidrógeno antes del sellado de la barra combustible (disminución del riesgo de contaminación de la pastilla en el proceso de fabricación); una mayor resistencia mecánica (menor tendencia a la formación de esquirlas), y finalmente, una mayor conductividad térmica, que da lugar a una disminución en la temperatura del combustible y, por ello, a una reducción en la liberación de productos gaseosos de fisión al plenum.

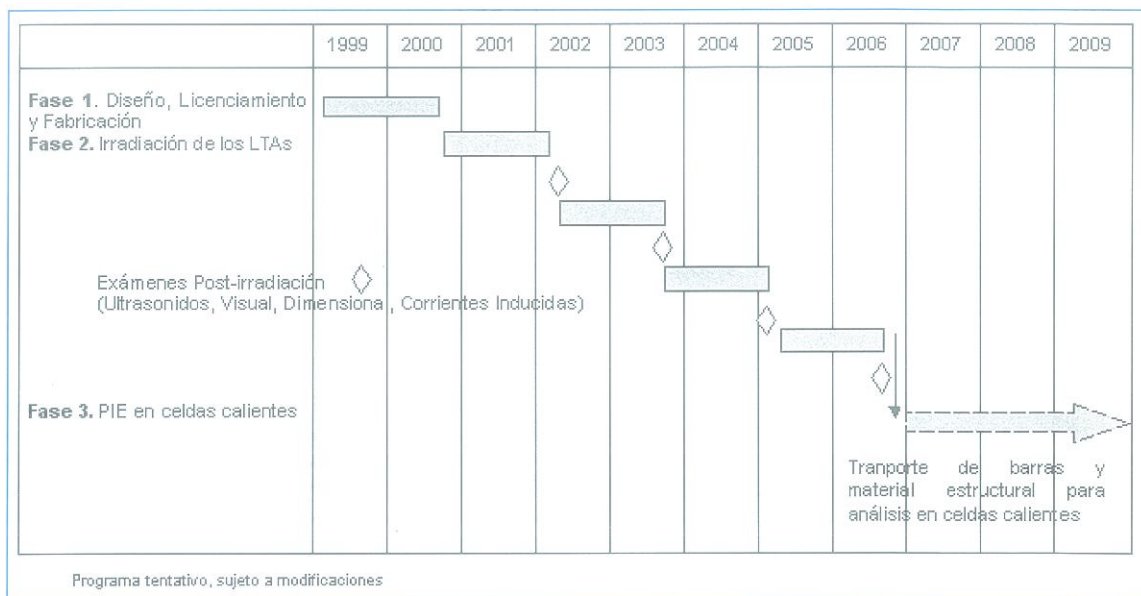


Figura 2. Programa General del Proyecto de Alto Quemado.

Por otra parte, hay que señalar que el aumento de densidad podría producir una densificación del combustible algo menor que la actual, en particular para valores significativamente elevados de la densidad. Esta circunstancia, si bien positiva en lo que respecta a las temperaturas del combustible (una densificación menor implica un huelgo pastilla-vaina menos abierto y por ello más conductor), determina también una mayor interacción mecánica pastilla-vaina y un menor volumen de huecos para acomodar los gases de fisión liberados. De ahí el interés por incluir este tipo de pastillas en el Programa y caracterizar debidamente sus propiedades a elevados quemados.

Además, en cada elemento combustible una barra será fabricada con pastillas del 96% y con un tamaño de grano superior al actual. Esta diferente morfología supone un mejor comportamiento frente a la liberación de gases de fisión.

El enriquecimiento de las barras de uranio de estos elementos es del 4,90%. En el caso de las barras de gadolinia, este valor se reduce al 2,8% de acuerdo a la concentración del 8% en gadolinia que finalmente se utiliza.

Las barras combustibles no convencionales se dispondrán en la periferia de los elementos con el fin de facilitar su inspección en central al término de cada ciclo.

### PROGRAMA DEL PROYECTO

El programa de irradiación de alto quemado se ha dividido en las siguientes fases:

**Fase 1:** Diseño, licenciamiento y fabricación de los elementos combustibles de demostración para el quemado objetivo en el entorno de 75 MWd/kgU.

**Fase 2:** Irradiación comercial de los elementos combustibles en la C.N. Vandellós II. Después de cada ciclo de irradiación, los cuatro elementos combustibles serán objeto de una inspección a fin de verificar el adecuado comportamiento de los mismos y caracterizar su estado. Estas inspecciones contemplarán inspecciones visuales, medidas dimensionales y medidas de corrosión por corrientes inducidas.

**Fase 3:** Transporte de barras combustibles y de material estructural irradiado a celdas calientes para los exámenes post-irradiación.

El proyecto se llevará a cabo entre los años 2000 y 2007.

Los elementos combustibles de demostración de Alto Quemado se irradiarán durante los ciclos 12, 13, 14 y 15 de la Central nuclear de Vandellós II. La figura 2 recoge el programa general del proyecto.

A partir de 2007, y una vez finalizada la irradiación, se prevé la realización de un programa de inspección en celda caliente que incluye tanto el análisis de barras combustibles (vaina, pastilla y gases de fisión) como de la propia estructura (tubos guía y rejillas).

### CONDICIONES DE IRRADIACIÓN

En la medida de lo posible se conjugarán unas condiciones de irradiación

tales que los elementos experimenten unas historias de operación representativas respecto de lo que el programa de inspección va a caracterizar, pero evitando que ello suponga condiciones muy limitantes respecto de otras condiciones ajenas al programa experimental.

Se contempla realizar un seguimiento del comportamiento del combustible y verificar su adherencia al diseño con la información que se genere tras las inspecciones en las paradas de recarga. Asimismo está previsto establecer criterios de recargabilidad de los conjuntos combustibles para su cuarto ciclo de irradiación basados en los resultados de esas inspecciones.

## ALCANCE DE ENUSA

De un modo resumido, ENUSA es responsable de la ejecución de las siguientes tareas.

1. Dirección del Proyecto
2. Diseño y licenciamiento de los elementos combustibles.
3. Fabricación de los elementos combustibles.
4. Seguimiento de la Irradiación de los elementos combustibles hasta el nivel de quemado objetivo. Emisión de los correspondientes informes a mitad y final de ciclo
5. Inspección en Central al final de cada ciclo de irradiación. Emisión de los correspondientes informes de evaluación de los resultados
6. Definición, junto con los socios en el Programa, seguimiento y evaluación de los resultados de los exámenes post-irradiación que se realizarán en celdas calientes una vez finalizada la irradiación comercial

Estas tareas son realizadas, cuando se estima necesario, con el soporte de los fabricantes que suministran vainas para el programa.

Cada una de estas tareas constará a su vez de una serie de actividades, las cuales se describen brevemente a continuación:

### Diseño y licenciamiento de los elementos combustibles:

- Diseño del elemento combustible.
- Preparación de la documentación técnica del diseño (planos y especificaciones).

- Licenciamiento del elemento combustible ante el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).
- Verificación del comportamiento estructural del elemento combustible.
- Ensayos de verificación del elemento combustible de alguno de sus componentes.
- Preparación, puesta a punto y cualificación de equipos de ensayo.

### Fabricación de los elementos combustibles:

- Elaboración del informe de caracterización de los elementos de demostración.
- Preparación, puesta a punto y cualificación de equipos de fabricación.
- Fabricación, propiamente dicha, de los elementos combustibles.

### Irradiación de los elementos combustibles:

- Seguimiento de irradiación. Elaboración de informes de seguimiento a mitad y final de cada uno de los ciclos de irradiación.

### Inspección de los elementos combustibles:

- Preparación de un plan de inspección de los LTAs al final de cada uno de los ciclos de irradiación.
- Ejecución de las inspecciones acordadas.
- Edición de los correspondientes informes de evaluación de los resultados de inspección.

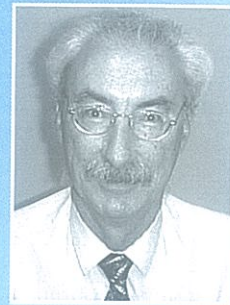
## CONCLUSIONES

El programa de irradiación propuesto, por el que se pretende irradiar hasta un quemado en el entorno de 75 MWd/kgU cuatro elementos MAEF/ZIRLOTM, permitirá caracterizar el comportamiento del combustible operando fuera de los actuales límites de quemado.

Mediante este programa se dispondrá de información directa, plenamente representativa y envolvente de las centrales PWR españolas, tanto en lo que respecta al tipo de combustible y materiales como en lo que concierne a las condiciones de operación. Esta información, unida a la que proceda de otros programas en curso, podrá determinar en el futuro unas nuevas bases para una utilización más eficiente, fiable y segura del combustible.



Mariano RODRÍGUEZ AYCART es Ingeniero Industrial por la E.T.S. de Ingenieros Industriales de Madrid y MDCM por el Instituto de Empresa. Ingresó en ENUSA en 1990, para trabajar en el Departamento de Ingeniería del Producto. En 1994 se incorpora a la Dirección Comercial, en la que se ha ocupado de la gestión de Proyectos de Combustible y de la dirección de Proyectos internacionales de I+D. Desde 1998 tiene responsabilidades relacionadas con las actividades de Marketing para el mercado del combustible nuclear.



Alberto PÉREZ NAVAS es Ingeniero industrial (Técnicas Energéticas) por la Universidad Politécnica de Cataluña. Master en Nuclear Engineering por el MIT y Diplomado en Ingeniería Nuclear por la JEN. Ha sido Jefe de Gestión del Combustible de C.N. Ascó y actualmente es el Jefe de Combustible de la Asociación Nuclear Ascó - C.N. Vandellós II.



Rodolfo CANENCIA HERNANZ es Ingeniero Industrial por la E.T.S. de Ingenieros Industriales de Madrid. Ingresó en ENUSA en 1991, incorporándose al Grupo de Diseño Mecánico dentro del Departamento de Ingeniería del Producto.