

LA INVESTIGACIÓN SOBRE COMBUSTIBLE DE ALTO QUEMADO EL PROYECTO DEL REACTOR CABRI CON LAZO DE AGUA

J.M. CONDE - M. RECIO

En este artículo se comienza por repasar la situación actual del uso del combustible nuclear en el plano nacional e internacional, con particular énfasis en lo que se refiere a los programas de investigación experimental en curso relacionados con este campo. Se describen de forma resumida los principales intereses y líneas de actuación estratégicas del CSN en lo que respecta a la investigación sobre el combustible con alto grado de quemado, y, en particular, se justifican las razones por las cuales se ha considerado conveniente la participación en el proyecto de instalación de un lazo de agua a presión para realizar experimentos con combustible de alto quemado en el reactor experimental CABRI del IPSN. La parte principal del artículo se centra en la descripción del origen del proyecto y de los aspectos del comportamiento del combustible de alto quemado que se pretende investigar mediante los experimentos integrales y de efectos separados previstos. Finalmente se hace una breve introducción sobre la organización, el calendario y programa técnico del proyecto CABRI, que ya se encuentra en su última fase de discusión.

This paper describes the present status of the nuclear fuel utilization both in the national and international arenas. Details on the fuel-related research programs actually ongoing are given. The interests and strategic lines established by the CSN regarding high burnup fuel research are described. Specifically, an analysis is made of the reasons underlying the CSN's decision to participate in the IPSN's CABRI Water Loop high burnup fuel research program. The core of the paper is devoted to the description of the CABRI project contents and of the technical aspects in the behaviour of high burnup fuel that will be studied through the foreseen integral and separate effects tests. Finally, a summary of the project organization, schedule and technical program is included.

INTRODUCCIÓN

La creación del nuevo mercado eléctrico desregulado afecta de forma notable a diversos ámbitos de la gestión y el funcionamiento de las centrales nucleares. Los mercados desregulados no ofrecen garantía alguna de los benefi-

cios que se pueden obtener, y ni siquiera de si se van a recuperar los costes de producción. Por ello, el comportamiento y la fiabilidad del combustible, con su influencia determinante en la capacidad de las centrales para generar electricidad a precios competitivos, resulta ser un factor clave en esta nuevo esquema de mercado.

La importancia del combustible dentro del esquema de costes de producción de la energía eléctrica de origen nuclear es muy elevada. Aparte de su propio coste, que aún siendo importante no pasa de ser más que una pequeña parte del coste total de producción, el funcionamiento del combustible en condiciones que se aparten de las óptimas puede suponer pérdidas notables en el rendimiento económico de la instalación. El combustible puede llegar a limitar de forma importante la operación del reactor, e incluso, en casos extremos, obligar a paradas forzosas o anticipadas para retirar elementos combustible fallados.

Como es lógico, el deseo de cualquier propietario de una central nuclear es disponer de un diseño de combustible suficientemente "robusto", que garantice una cómoda operación en ciclos estables de, por ejemplo, 18 meses, con unos esquemas de carga que no perjudiquen ni a la economía

del ciclo ni a la vasija del reactor, con una química del primario que garantice bajas dosis en recarga, con un lote de recarga reducido para minimizar la ocupación de la piscina de combustible gastado y limitar la gestión de residuos de alta actividad en el futuro, en el que no se produzcan fallos ni durante la operación del reactor ni durante su manejo, y, además, respecto al que los reguladores no puedan poner en duda su comportamiento en condiciones de accidente. Evidentemente este es un objetivo en el que están empeñados muchos profesionales del sector, y que a veces, parece casi rozarse con la punta de los dedos. Pero no cabe llamarse a engaño, ya que, incluso aunque este objetivo pudiese alcanzarse, el efecto del mercado desregulado plantearía de inmediato un nuevo reto, que haría imprescindible una nueva mejora de la eficiencia del funcionamiento del combustible. La situación volvería a ser la misma en un breve lapso de tiempo.

Desde los organismos reguladores se asiste, no sin cierta preocupación, a este proceso continuo de cambios de diseño del combustible, de peticiones de aumento de los límites de quemado del combustible, de relajaciones de los límites de seguridad, de fusiones y reorganizaciones de los suministradores

de combustible. Es preciso reconocer que en los últimos años, y muy especialmente en la segunda mitad de los años 90, se han venido sucediendo diversos problemas que afectan al comportamiento del combustible que opera en un ambiente bastante más agresivo que el existente en el pasado. Temas como el descubrimiento del efecto "rim" y sus implicaciones en el comportamiento transitorio del combustible de alto quemado, la corrosión acelerada de las vainas, la inserción incompleta de las barras de control, las anomalías de "axial-offset", etc., arrojaron dudas sobre el siempre complicado balance entre el conocimiento de los fundamentos del comportamiento del combustible y el ritmo de los cambios tecnológicos que se estaban introduciendo en los diseños de combustible existente en ese período.

No hace falta conocer en detalle la evolución de los temas anteriores para constatar que la situación actual no es, ni con mucho, parecida a la que se daba a mitad de los años 90. La determinante introducción de nuevas aleaciones metálicas para las vainas de las varillas de combustible, destinadas a remediar los problemas más acuciantes de corrosión o degradación secundaria (Zirlo, M5, MDA, Duplex, Tri-clad, LK2+, LK3...), junto con el aluvión de nuevos programas de investigación con combustible de alto quemado ("Robust Fuel Program", "CABRI Water Loop Project", "Argonne Hot Cell LOCA tests", por citar algunos), que han venido a complementar los programas experimentales "clásicos" que mantienen los laboratorios de investigación con más solera como Halden, Karlsruhe o Studsvik, entre otros, han hecho posible el que la confianza en la operación segura del combustible con alto quemado hasta los límites licenciados (≈ 60 Gwd/tU, quemado medio de varilla) en todas las condiciones de operación sea muy superior a la que había entonces. Por añadidura, parece que los nuevos resultados experimentales que se están obteniendo podrían justificar un pequeño paso adelante en la dirección de aumentar el quemado, hasta un valor en el rango entre 65 y 70 Gwd/tU. No obstante, ello dependerá de que la industria sea capaz de dar respuesta a todas las dudas aparecidas en los años pasados en cuanto al comportamiento del combustible, y de que los programas experimentales y de elementos de demostración envuelvan, sin vacíos aparentes, todas las condiciones de operación a las que previsiblemente tendrá que hacer frente el combustible durante su operación en el reactor, e incluso ulteriormente durante su mane-

jó y almacenamiento una vez irradiado.

SITUACIÓN EN ESPAÑA

De entrada, se debe reconocer que la situación de partida en España, en lo que se refiere a la investigación en el campo del combustible, no es, ni con mucho, la esperable para una industria nuclear que suministra un proporción considerable de la energía eléctrica que se consume, y que incluso dispone de la fábrica de combustible de Juzbado, desde la que se suministra combustible a un notable número de países europeos. Todavía sorprende más la cuestión cuando se hace memoria y se recuerda que España, a través del programa de Westinghouse de irradiación de combustible de alto quemado en la central nuclear de José Cabrera, podría ser considerada pionera de la investigación en este campo. Por desgracia, todo el subtrato de investigación creado en aquella época en torno a dicho programa experimental no se consolidó, con posterioridad, con el establecimiento de una infraestructura acorde con la relevancia del tema. Como en otras ocasiones en relación con otros temas, los frutos tecnológicos de programas realizados en centrales de nuestro país terminaron por escaparse por entre los dedos.

No es el objeto de este artículo hacer un análisis profundo de las causas por las que se ha llegado a la situación actual, pero el hecho cierto es que, en el momento actual no existe infraestructura alguna en lo que se refiere a investigación experimental en el campo del combustible nuclear. Este hecho tiene una relevancia importante, ya que, como consecuencia de ello, la dependencia tecnológica de los suministradores principales, que, por el momento, operan en España (Westinghouse, General Electric, Framatome, Siemens y ABB si no se tienen en cuenta las fusiones realizadas posteriormente) es casi total. Al margen de las capacidades propias de ENUSA como suministrador de combustible, puede afirmarse que no se dispone en el país de ningún centro de investigación consolidado en la materia. Bien es cierto que en el CIEMAT se están haciendo esfuerzos para mantener un mínimo equipo de técnicos que trabajen en el tema, pero ni siquiera este pequeño grupo tiene garantizada, hoy por hoy, su estabilidad.

Podría argumentarse que en el mundo actual, en la era de globalización en que nos toca vivir, no es necesario disponer de recursos propios más allá de los estrictamente necesarios, pues

este mercado globalizado nos facilita, en todo momento, el identificar el lugar donde el producto deseado se oferta en las condiciones más favorables, y permite acudir a él posteriormente de manera sencilla. Indiscutiblemente esto es cierto, pero no lo es menos que para disponer de garantías de que se está optando por la mejor alternativa a la hora de decidir el combustible con el que se va a operar el reactor, además de conocer al detalle los términos puramente económicos, es imprescindible dominar hasta un cierto nivel el resto de las disciplinas de carácter tecnológico que gobiernan el comportamiento del combustible. Análogamente, a la luz de los problemas que han ido apareciendo en el pasado, el impacto de las condiciones de operación del reactor sobre el comportamiento del combustible se ha demostrado como un aspecto determinante del comportamiento del combustible, y también para conocerlas y definir las de forma adecuada se ha de disponer de un profundo conocimiento acerca de las propiedades y características del combustible, si se quieren evitar nuevos sucesos inesperados o la repetición de los errores del pasado.

Por todo ello, desde los organismos reguladores, y en particular desde el CSN, se está haciendo una apuesta muy seria en la línea de impulsar el desarrollo tecnológico propio conmensurado en el campo del comportamiento del combustible, promoviendo la participación propia y de la industria en general en los programas de investigación internacionales más relevantes, facilitando el desarrollo de programas de investigación en combustible en el país, e impulsando la presencia de una representación española adecuada en los foros y grupos de trabajo de los organismos internacionales de mayor interés.

En los últimos años se han sucedido diversos encuentros entre la industria y el CSN en materia de investigación sobre comportamiento del combustible, que no siempre han conducido a acuerdos entre las partes. Sin embargo, y unidos a otros factores, todos ellos han servido para provocar una toma de conciencia de los problemas, y permitir una visión optimista sobre la posibilidad de mejoras considerables de la situación, incluso a corto plazo. En parte debido a este nuevo ambiente de mayor entendimiento y unificación de esfuerzos, se ha hecho posible el que la industria nuclear española se haya embarcado en el "Robust Fuel Program" que se está desarrollando en USA, y que el CSN haya aprobado la participación en el "CABRI Water Loop

Project", que son, quizá, los proyectos de carácter internacional más importantes que se llevarán a cabo en el campo del combustible en los próximos años. Tampoco se puede olvidar dentro de este capítulo de proyectos relevantes el programa de elementos combustibles de demostración de alto quemado impulsado por ENUSA, cuya irradiación en base se hará en el reactor de la central nuclear de Vandellós 2, y que se enmarca dentro de un incremento de la actividad investigadora del suministrador nacional en los últimos años.

En lo que resta de artículo se hará una descripción del proyecto "CABRI Water Loop", y de la forma en que se instrumenta la participación española en el mismo. Tanto los objetivos y la planificación prevista del "Robust Fuel Program", en el que, como ya se ha dicho, participa la industria nuclear española, como la descripción del programa de irradiación de combustible de alto quemado de ENUSA son objeto de otros artículos de esta misma revista.

Es preciso hacer notar que los tres programas citados hasta ahora están esencialmente dedicados a verificar la seguridad del combustible durante su operación en el reactor, hasta los grados de quemado deseados. Las necesidades de investigación, sin embargo, incluyen otros temas de importancia relevante, como la caracterización del comportamiento del combustible a largo plazo con vistas a su almacenamiento y transporte en distintos sistemas. La posibilidad de aplicación de técnicas realistas de análisis (como el crédito al quemado del combustible para análisis de criticidad del transporte y almacenamiento a corto y largo plazo), basadas en evidencia experimental sólida, pueden suponer un cambio en la cuantificación económica del coste de la segunda parte del ciclo, que podría afectar al grado de quemado definido como objetivo por la industria si el esquema de financiación de esta segunda parte del ciclo se modifica en el futuro.

PROYECTO CABRI

Serie REP-Na

Antes de pasar a describir el proyecto de instalación de un lazo de agua a presión en el reactor experimental CABRI en las instalaciones del Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) en Cadarache (Francia) para experimentar con combustible de alto quemado, es necesario hacer una referencia al denominado programa CA-



Figura 1.

BRI-REPNa, ya que el nuevo proyecto es, básicamente, una continuación del anterior.

El programa REP-Na, liderado por el Institute pour la Protection et la Sûreté Nucleaire (IPSN) francés en colaboración con la Nuclear Regulatory Commission (NRC) de EE.UU. y el Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), nace en el contexto de una petición de Electricité de France (EdF) al organismo regulador francés para aumentar el quemado de descarga del combustible, en línea con lo que venía ocurriendo en otros países como EE.UU (figura 1). El programa se inicia en 1993, y desde entonces hasta bien recientemente se han desarrollado un total de 10 experimentos dentro de la serie. El antecedente más directo del programa debe buscarse en el interés que habían suscitado los resultados de una serie de experimentos con combustible de alto quemado desarrollados en el reactor NSRR de JAERI. En dichos experimentos se puso en evidencia que la respuesta del combustible de alto quemado frente a transitorios de inserción de reactividad (RIA), tal como la eyección de una barra de control en un reactor PWR o la caída de una barra de control en un reactor BWR, podía ser mucho peor de la prevista, produciéndose fallos de varillas de combustible con niveles de inyección de energía muy inferiores a los que se contemplaban en la normativa (del orden de 100 cal/g frente a, por ejemplo, 280 cal/g en la normativa americana). Si bien es cierto que las notables diferencias entre las condiciones de operación del

reactor NSRR y las que se dan en un reactor comercial ponían directamente en cuestión la representatividad de los resultados, las especiales características del modo de fallo observado (fallo frágil con liberación de combustible al refrigerante en algún caso), en combinación con el reciente descubrimiento de las consecuencias del denominado efecto "rim" en las pastillas de combustible, si que podían entenderse como una seria llamada de atención en cuanto a los posibles efectos adversos asociados a la fenomenología específica asociada al combustible de alto quemado.

El IPSN francés, siguiendo los pasos de JAERI, decidió lanzar un proyecto de investigación con combustible de alto quemado en el reactor CABRI. El reactor se concibió originalmente para dar soporte a la investigación sobre comportamiento del combustible en los reactores rápidos previstos en el programa nuclear francés, por lo que, en su diseño actual, está refrigerado por sodio en un sistema a presión. Sin embargo, las peculiares características de los transitorios de potencia de tipo RIA, en los que, en su primera fase cuasi-adiabática, no hay apenas transmisión de calor a la vaina y al refrigerante, invirtiéndose toda la energía en incrementar la temperatura del combustible, hacía concebible el pensar en un programa de combustible para reactores de agua ligera en este reactor. Debe hacerse mención a que, por aquel entonces, existía el convencimiento, actualmente cuestionado, de que la única preocupación relacionada

TABLA 1
 EXPERIMENTOS DE LA SERIE REP-NA CON COMBUSTIBLE DE UO_2
 (Subrayado especímenes con "SPALLING")

CABRI - LAZO DE SODIO						
	Test	Quemado (Gwd/tU)	Oxido (μm)	Pulso (ms)	Reactor	Fallo?
280 °C	Na-1	64	<u>80</u>	9,5	30	Sí
0.5 Mpa	Na-2	33	4	9,5	210	No
4 m/s	Na-3	53	40	9,5	125	No
Combustible:	Na-4	62	80	75	99	No
UO_2	Na-5	64	20	9,5	115	No
0.1-0.3 Mpa	Na-8	60	<u>130</u>	80	83	Sí
0.44-0.55-1. m	Na-10	62	<u>80</u>	31	79	Sí

con la seguridad se centraba en la resistencia del combustible de alto quemado para soportar la tensión generada por el hinchamiento térmico del combustible en esta primera fase. En ese programa se renunciaba, por tanto, al estudio del comportamiento del combustible en la segunda fase del transitorio, cuando el tiempo transcurrido es suficiente como para que se haya iniciado la transmisión de calor del combustible a la vaina y de ésta al refrigerante, ya que, obviamente, la refrigeración del reactor con sodio hace poco menos que irrelevante la información obtenida a partir de ese momento.

El primer experimento de la serie, conocido como REP-Na1, se diseñó con miras muy ambiciosas, en el sentido de que se escogió como espécimen para la prueba una varilla de combustible, la cual, aunque se había irradiado en un reactor comercial, presentaba un aspecto seriamente degradado en cuanto al nivel de corrosión (con un espesor de capa de óxido medido por encima de las 80 micras), e incluso con áreas de la superficie exterior de la vaina en las que ya se había producido la descamación o exfoliación de la capa de óxido ("spalling"). Todavía más, el pulso de potencia escogido para la prueba, con muy alta inyección de energía en un intervalo de tiempo muy reducido, pretendía evidenciar, sin ningún género de dudas, que el combustible de alto quemado era perfectamente apto para soportar este tipo de transitorios. Desafortunadamente, lo ocurrido fue todo lo contrario, dado que el espécimen falló de forma drástica cuando el nivel de inyección de energía era de tan sólo 30 cal/g (la energía realmente inyectada en el momento del fallo era incluso inferior a las 20 cal/g). Además, se observó en el "hodoscopio" (un dispositivo de vigilancia del combustible durante el experimento, que permite detectar desplazamientos del mismo) que se producía un signifi-

cativo movimiento de la columna de combustible, acompañado por una pequeña liberación de combustible finalmente fragmentado al refrigerante. Como es lógico, los resultados del experimento conmocionaron a todos los que seguían este tema, ya que el resultado debe calificarse de totalmente inesperado. Desde entonces se continúa discutiendo acerca de si este experimento es realmente representativo o no, y en cualquier reunión internacional sobre el tema se producen debates enconados acerca de si se debe mantener este experimento dentro de la base de datos.

En la tabla 1 se resumen los resultados de los experimentos de la serie REP-Na con combustible de UO_2 , con niveles medios de quemado entre 33 y 64 Gwd/tU, aproximadamente. Aunque no es el objeto de este artículo hacer una valoración exhaustiva de los resultados del programa REP-Na, si se destacan los principales resultados obtenidos. Como se observa en dicha tabla, se ha producido el fallo del combustible en tres ocasiones, en todos los casos con varillas de combustible seriamente degradadas, lo que evidencia la gran importancia del estado de la vaina antes de ser sometida al transitorio. Por otra parte, en los experimentos en los que no se ha llegado a producir el fallo de la vaina, sí se ha observado una notable liberación de gases de fisión (hasta un 15%), en buena medida como consecuencia del efecto "rim", y, en varios casos, fuerte deformación de la vaina con "spalling" transitorio. En cuanto al combustible, en la práctica totalidad de los experimentos se observó el rellenado de los cuencos basales de las pastillas, y se ha detectado un grado considerable de fragmentación y agrietamiento del combustible.

Los fenómenos observados en la serie de experimentos REP-Na vinieron a confirmar la importancia de la fenomenología específica del combustible de

alto quemado en lo que respecta a su comportamiento frente a los transitorios de inserción de reactividad: efecto "rim", corrosión acelerada, "spalling",... Sin embargo, las limitaciones inherentes al diseño del reactor de CABRI en su estado actual, hacen imposible profundizar mucho más allá en el estudio del comportamiento del combustible de alto quemado en este accidente. En particular, existen dos restricciones evidentes provocadas por el diseño: su refrigeración mediante sodio, que hace imposible su uso para el estudio de la fase en la que ya se ha iniciado la transmisión de calor, y su limitada flexibilidad para generar pulsos de potencia suficientemente anchos como para ser representativos de los que se observarían en un reactor comercial. Si bien es cierto que este segundo problema puede soslayarse, hasta cierto punto, con el diseño actual del reactor, mediante la combinación de dos pulsos de potencia solapados, los niveles de energía que se pueden llegar a alcanzar están muy por debajo de lo que sería deseable. Por estos y otros motivos más de detalle, incluso antes de finalizar la serie de experimentos REP-Na ya se empezó a vislumbrar la posibilidad de reconvertir al reactor de CABRI en un reactor experimental refrigerado por agua a presión y con unas condiciones experimentales más acordes con la realidad de los reactores comerciales.

Proyecto de instalación de un lazo de agua a presión en el reactor de CABRI

El objetivo principal que se plantea dentro de este proyecto es, lógicamente, el esclarecimiento de las incertidumbres existentes acerca del comportamiento del combustible de alto quemado tras el análisis de la serie de experimentos REP-Na, y que, esencialmente, se puede resumir en la valoración de los siguientes aspectos:

- Importancia del efecto "rim" en el comportamiento seguro del combustible con quemados por encima de los límites actuales, al menos hasta los niveles objetivo previstos por la industria a corto plazo.
- Influencia en el comportamiento del combustible de la elevada liberación de gases de fisión en el combustible de alto quemado.
- Efecto de la presión interna de la varilla en el ritmo y cantidad de gases de fisión liberados durante el transitorio.
- Efecto del "spalling" transitorio, observado en algunos experimentos,

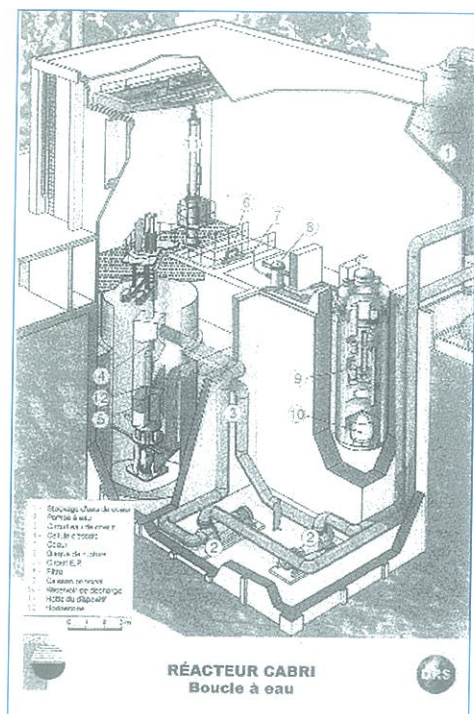


Figura 2.

en las condiciones de transmisión de calor de la vaina al refrigerante y sobre las propiedades mecánicas de la vaina.

- Evaluación del riesgo de fallo retrasado de la vaina en caso de alcanzarse condiciones de DNB durante el transitorio, con posible liberación de combustible al refrigerante.

Con estos objetivos en mente, el IPSN hizo una primera propuesta de modificación del lazo de refrigeración de CABRI y de una matriz de experimentos que permitiera continuar y completar la serie de experimentos REP-Na. El diseño previsto para el lazo se muestra en la figura 2, y su funcionamiento se ha esquematizado en la figura 3. Esta propuesta se transmitió a mediados de 1998 al Comité de Seguridad de las Instalaciones Nucleares (CSNI) de la Agencia de Energía Nuclear (NEA) para su discusión entre los posibles países participantes en el proyecto. Desde entonces, se han mantenido múltiples reuniones técnicas y de gestión entre el IPSN y los diversos países que han manifestado su interés en el proyecto, hasta llegar a la fecha actual en que las negociaciones están prácticamente finalizadas, y la firma de los correspondientes acuerdos entre las partes se espera que se produzca en breve, antes del verano de 2000.

La participación en el proyecto del lazo de agua a presión de CABRI se ha estructurado en dos niveles. El primer

nivel de participación lo conformarán aquellos países que dispongan de un acuerdo bilateral con el IPSN para la financiación del proyecto. Los países incluidos en este nivel serán miembros de pleno derecho y estarán representados en los órganos directivos del proyecto. Aquellos países que no se muestren dispuestos a participar en la financiación, quedarán representados en estos órganos por la NEA, y tendrán evidentes restricciones en el acceso a la información generada por el proyecto.

La organización del proyecto se materializa en dos comités permanentes, más una estructura de grupos de trabajo temporales encaminados a resolver problemas concretos. El órgano máximo de decisión dentro del programa internacional es el Comité de Dirección del proyecto (CD), formado por representantes de aquellos países que han alcanzado un acuerdo bilateral con el IPSN para la financiación de CABRI. Es responsabilidad de este Comité la decisión final sobre todos los temas, tanto económicos como de programación, contenido de los experimentos, etc. Para las decisiones de carácter técnico, este Comité cuenta con el apoyo de un Grupo Técnico Asesor (TAG), que examina y debate en detalle este tipo de temas y presenta sus propuestas al CD para su aprobación. El CSN se ha encargado de la vicepresidencia de este grupo durante el año 2000, y accederá a su presidencia en el año 2001. Por último, el TAG tiene la capacidad de crear grupo de trabajo temporales con objetivos concretos. En este momento, solamente existe un grupo de trabajo dedicado a estudiar la instrumentación más adecuada con la que debe dotarse al reactor.

Interés del CSN en el proyecto CABRI

El CSN ha mantenido un seguimiento exhaustivo de la evolución de todos los temas relacionados con el comportamiento del combustible de alto quemado desde mediados de los años 90. De hecho, ha mantenido representación permanente en los grupos de especialistas que se han ido creado sucesivamente bajo el paraguas de la NEA, y más concretamente del CSNI. Por lo tanto, el CSN ha estado presente en todas las discusiones habidas en relación con el proyecto CABRI desde su inicio, lo que ha facilitado el que se haya tomado la decisión de participar en este proyecto, de gran relevancia internacional, como miembro de pleno derecho.

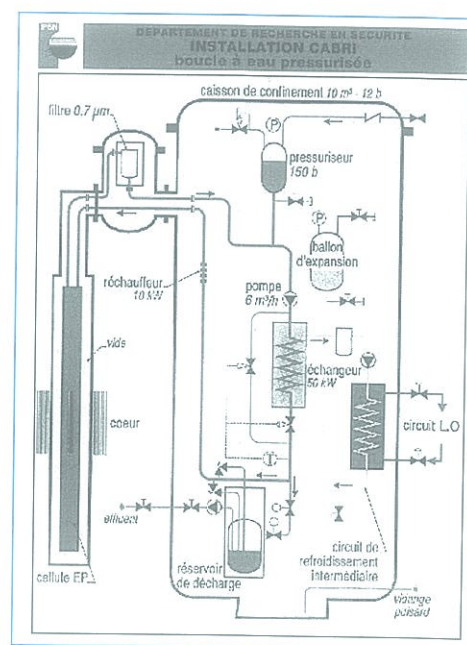


Figura 3.

No obstante, el camino seguido desde que se hizo la propuesta inicial por el IPSN hasta el momento actual ha sido largo y no siempre fácil. Ello se debe a que el proyecto del lazo de agua ha sido contestado con crudeza desde su inicio por la industria nuclear, tanto de España como de otros países, arguyendo tanto razones técnicas encaminadas a cuestionar su necesidad, como relacionadas con su elevado coste económico. Ello ha hecho imposible llegar a un acuerdo de co-financiación nacional del proyecto, situación extrema a la que solo se ha llegado en un reducido número de países. Cabe destacar el que entidades como EPRI, inicialmente muy crítica con el proyecto y extremadamente reticente a participar en el mismo, ha terminado por indicar su interés en el proyecto, tal como se detalla ligeramente en el último apartado.

Por otra parte, y mucho más importante si cabe, la matriz de experimentos que se propuso originalmente, en la que no se contemplaban materiales de vaina avanzados y en la que el peso de experimentos con combustible MOX era muy relevante, hacía injustificable la participación del CSN en el proyecto, a la vista de las opciones tomadas por las centrales españolas y de su previsible evolución futura. Por ello, se impuso como condición sine qua non para participar en el proyecto el que se incluyeran dentro de la matriz de experimentos aleaciones de vaina con contenido de Niobio (Zirlo, M5,...). En un principio, esta postura no fue apoyada por la totalidad de los países que habían manifestado su intención de

TABLA 2
EXPERIMENTOS PREVISTOS EN EL PROGRAMA DEL LAZO DE AGUA.

CABRI - LAZO DE AGUA			
Serie	Objetivo	Varilla	Comentarios
S0	Experimentos de referencia en el lazo de sodio	Óxido de Uranio, 60-80 Gwd/t	Vainas de materiales avanzados
S1	Comparación con lazo de sodio	Material similar al de la serie S0	Primeros experimentos en el lazo de agua
S2	Alto quemado, 80-100 Gwd/t	Dos niveles de quemado	Vainas de materiales avanzados
S3	Comprensión de la fenomenología física		Estudios paramétricos: presión interna, microestructura de la pastilla,...
S4	Comportamiento de MOX	MOX de alto quemado	
S5	Experimentos abiertos		BWR, LOCA, otros

participar en el proyecto, aduciendo que el principal interés de los organismos reguladores era garantizar la seguridad del combustible de uso mayoritario en aquel momento (vainas de Zircaloy-4 mejorado). Sin embargo, en parte por la obcecación de los técnicos del CSN y otros organismos, y en parte porque la realidad se ha empañado en demostrarnos que la transición hacia materiales avanzados iba ser mucho más rápida de lo previsto inicialmente, se ha acordado modificar la matriz, hasta el extremo de que la mayoría de los experimentos se realizarán con materiales de vaina avanzados.

Otro hecho que ha sido determinante para la participación del CSN en el proyecto ha sido el convencer al resto de los participantes de la viabilidad y el interés de incluir dentro de la matriz de experimentos dos varillas de Zirlo fabricadas por ENUSA e irradiadas en el reactor de la central nuclear de Vandellós 2. Como es lógico, aun cuando el CSN no puede manifestar ningún tipo de preferencia en lo que se refiere al origen del combustible que se irradia en los reactores españoles, el hecho de que el Zirlo sea en la actualidad el material de vaina con aleación avanzada que más se utiliza en nuestros reactores PWR, a su vez mayoritarios, justifica el que se haya impulsado esta propuesta. Las perspectivas futuras, hasta donde puede preverse, la refuerzan. Por este motivo, en la fase inicial de discusión de la participación del CSN en el proyecto, se contactó con Vandellós II y ENUSA para conocer la posibilidad de disponer de dos varillas de Zirlo irradiadas hasta valores de quemado superiores a los actualmente licenciados, que estaban inicialmente incluidas en la extensión del programa de barras segmentadas. La respuesta positiva de ambas organizaciones fue inmediata, y debe ser adecuadamente valorada y agradecida.

El interés de estas varillas para el

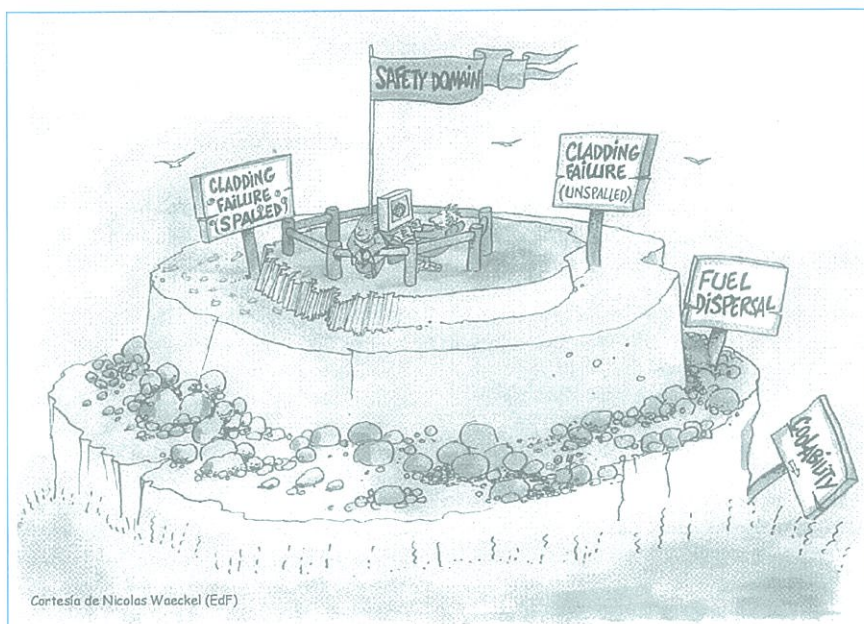
proyecto del lazo de agua es evidente, y de ello se han hecho conscientes todos los participantes con relativa rapidez. Pero además, existen otros muchos beneficios de carácter nacional aparejados a la utilización de este material, que han sido decisivos en la postura tomada por el CSN. En primer lugar, se plantea como objetivo prioritario el utilizar este proyecto, junto a otros, para contribuir al desarrollo y mantenimiento de una estructura estable de investigación del país en materia de comportamiento del combustible, hasta el punto en que ello sea posible. Para ello cual se ha llegado a un acuerdo de colaboración con el CIEMAT, que será el agente técnico encargado del seguimiento del proyecto para el CSN, de manera que se contribuya a crear un núcleo estable de personal experto en tema de combustible.

En segundo lugar, aunque no de menor importancia, carece de sentido

desde la perspectiva del CSN que el suministrador nacional de combustible, y responsable de la evaluación de seguridad del combustible de la mayoría de las centrales nucleares, sea ajeno a un proyecto de esta relevancia. La utilización de estas varillas en el proyecto se vislumbró como un medio excelente para resolver esta situación. Como resultado, el proyecto cuenta en este momento con el decidido apoyo de ENUSA, que ha tenido que superar las reticencias iniciales de alguno de sus socios tecnológicos.

Se considera también un objetivo prioritario el que las empresas eléctricas españolas, aunque sea indirectamente a través del CSN, estén presentes en un proyecto de la relevancia de CABRI, y que en el mismo se utilice combustible fabricado e irradiado en España. Se discute actualmente la forma en que la información generada en el proyecto va a ser transmitida por el CSN a la industria.

Además, y como beneficios adicionales asociados al uso específico de estas varillas, esta previsto que el material, aparte de que pueda ser utilizado para los experimentos de CABRI propiamente dichos, sea sometido a un conjunto de pruebas de efectos separados para determinar los principales parámetros asociados a su comportamiento mecánico, información que se espera que pueda ser de gran interés para todos los participantes en el proyecto a la hora de actualizar sus modelos analíticos de comportamiento. Por último, aunque de menor relevancia, la aportación de las dos varillas de



Cortesía de Nicolas Waackel (EdF)

Figura 4.

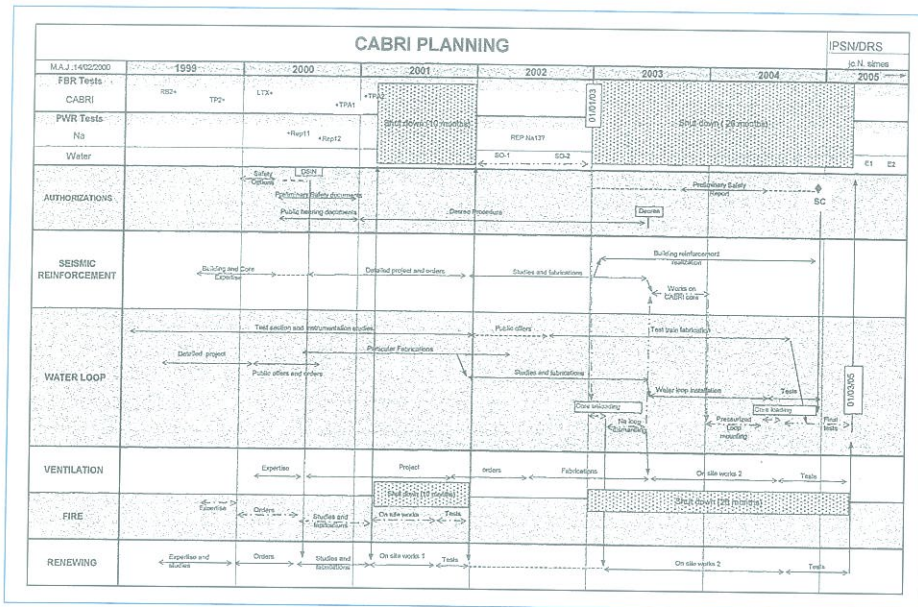


Figura 5.

combustible permitirá al CSN reducir en parte el coste de la cuota mediante la aportación de contribuciones en especie.

Estado actual del Proyecto

El proyecto CABRI con lazo de agua, en su grado de definición actual, incluye la realización de 12 experimentos, que se describen de forma somera en la Tabla 2. Las varillas irradiadas en Vandellós II serán utilizadas para un experimento de la serie S0 (todavía con el lazo de Sodio) y para el primer experimento con el lazo de agua, dentro de la serie S1. Serán por tanto el material nuclear de referencia del programa.

El esquema de la figura 4 muestra la programación actualmente existente para el lazo de agua. Como puede observarse, las modificaciones del lazo se realizarán en dos fases, quedando entre ambas una ventana temporal en la que se realizarán los primeros experimentos del programa internacional, todavía con el lazo de Sodio (serie S0). Los primeros experimentos en el lazo de agua tendrán lugar en el año 2005 (serie S1), adoptándose a partir de ese momento un ritmo de realización de 3-4 experimentos por año natural.

Hasta la fecha, han mostrado su disposición a firmar un acuerdo bilateral con el IPSN una serie de organizaciones, tales como EPRI, EDF, CSN,... En particular, es interesante destacar que uno de los aspectos claves que ha facilitado la participación de la industria americana en el proyecto a través de EPRI ha sido la disponibilidad de la ventana del 2001-2002 para realizar

una serie de experimentos todavía en el lazo de sodio, y el que estos experimentos se vayan a realizar con materiales de vaina avanzados como el Zirlo. De hecho, en el momento presente, EPRI, junto con organizaciones como EDF, está diseñando una nueva estrategia de licenciamiento para el combustible de alto quemado que consiste en determinar el rango de una serie de parámetros con el que definir un dominio seguro de operación del combustible de alto quemado ("Fuel Safety Domain", figura 5), que sea consistente con los resultados experimentales obtenidos en los experimentos de tipo RIA. Dentro de esta propuesta en estudio de EPRI, esta previsto que se tengan también en consideración los resultados de los experimentos que se realicen en CABRI con el lazo de sodio y materiales de vaina avanzados, para de esta forma disponer de una base de datos sólida con la que definir el citado dominio seguro de operación del combustible de alto quemado.

En este contexto, es importante destacar la importancia que tiene para la industria el disponer cuanto antes de resultados experimentales con vainas de material avanzado para continuar con las mejoras y desarrollos en los modelos analíticos de los códigos de termomecánica, de manera que con tiempo suficiente se pueda disponer de medios que hagan factible el licenciamiento de nuevos límites de quemado. Obviamente, estos desarrollos deberán avanzar en paralelo con los que previsiblemente será necesario introducir en los códigos acoplados de neutrónica y

termohidráulica para disponer de modelos 3D mas realistas que permitan compensar en parte la pérdida de márgenes que es previsible que lleve asociada la definición del dominio seguro de operación del combustible de alto quemado.



José Manuel CONDE LÓPEZ es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Actualmente es responsable del Área de Ingeniería Nuclear del Consejo de Seguridad Nuclear, organismo al que pertenece desde 1984 y donde dirige anteriormente la Unidad de Análisis del Núcleo. Es miembro de distintos grupos de trabajo de la Agencia de la Energía Nuclear de la OCDE sobre temas de neutrónica y termohidráulica y ha participado como experto del OIEA en diversas ocasiones, actualmente es Vicepresidente del Grupo de Asesoramiento Técnico del Proyecto CABRI.



Manuel RECIO SANTAMARÍA, es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. En el año 1987 se incorporó al Departamento de Informática y Simulación de Tecnomat. En 1989 se incorporó a la Unidad de Análisis del Núcleo del Consejo de Seguridad Nuclear. Actualmente pertenece al Área de Ingeniería Nuclear, donde se encarga de las evaluaciones de temas relacionados con la neutrónica y el comportamiento del núcleo y el combustible. Es miembro de distintos grupos de trabajo de la Agencia de la Energía Nuclear de la OCDE sobre temas de neutrónica y comportamiento del combustible, y ha participado como experto del OIEA en diversas misiones.