

Participación española en proyectos internacionales de investigación sobre combustible

J. M. Conde, J. M. Alonso y J. A. Gago

La investigación sobre el comportamiento del combustible y sobre su operación segura requiere de un elevado volumen de recursos humanos y económicos. Ello hace que la cooperación entre organizaciones con intereses comunes sea una necesidad imperiosa, existiendo en la actualidad un elevado número de iniciativas de carácter internacional en este sentido.

La actividad internacional de las organizaciones españolas en el campo de la investigación sobre combustible ha crecido de forma muy importante en la última década y ha permitido implantar un modelo de colaboración eficaz. En este artículo se pasa revista a la situación actual, describiendo el contenido y características principales de los proyectos en los que participan organizaciones españolas. Esta participación en foros internacionales de investigación se caracteriza por una involucración activa de las entidades de nuestra industria nuclear, por el liderazgo de algunos de los proyectos, y por la contribución mediante aportaciones de materiales propios o de productos de otros proyectos de investigación.

The research activities on the behaviour and safety of the nuclear fuel entail the use of extensive human and economic resources. As a result, cooperation arrangements that include different organizations having similar objectives become a must. A relevant number of cooperation initiatives on fuel research are presently running in the international arena. The international fuel research activities of the Spanish organizations have been increasing continuously during the last ten years, based on an efficient collaboration model between the different parties involved. This paper reviews the current status of this effort, describing the main characteristics and objectives of the research projects in which Spanish organizations are involved. The participation in the international fuel research forums is characterized by an active involvement in the projects, having a leading role in some cases, and by in-kind contributions of nuclear materials or of valuable research results coming obtained in other projects.



JOSÉ MANUEL CONDE. Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid. Actualmente es responsable de la Oficina de Investigación y Desarrollo del Consejo de Seguridad Nuclear.



JOSÉ MANUEL ALONSO. Ingeniero Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente es el jefe de Tecnología y Programas de I+D+i de ENUSA.



JOSÉ ANTONIO GAGO. Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. En la actualidad dirige el Departamento de Ingeniería de residuos de alta actividad de ENRESA. Dirige asimismo las actividades de I+D asociadas a la caracterización, comportamiento y tratamiento del combustible gastado y barreras de ingeniería asociadas.

INTRODUCCIÓN

La investigación sobre seguridad del combustible, y en general sobre su comportamiento durante todas las fases de su vida, requiere de un elevado volumen de recursos humanos y económicos. En algunos casos, la investigación de aspectos concretos, como puede ser el comportamiento del combustible en condiciones anormales o accidentales, precisa de la utilización de instalaciones experimentales específicas, con un elevado costo de construcción, mantenimiento y operación.

Por este motivo fundamental, la necesidad de cooperación entre organizaciones con intereses comunes se hace imprescindible, lo que desemboca en que la mayor parte de los proyectos de

investigación sobre el combustible de cierta envergadura es de carácter internacional. Por otra parte, este tipo de cooperación produce sinergias también de carácter técnico, puesto que la participación de organizaciones que, aunque tienen un mismo interés concreto, persiguen objetivos diferentes, ayuda a focalizar las actividades a realizar y eleva el nivel técnico de los proyectos.

La actividad internacional de las organizaciones españolas en el campo de la investigación sobre combustible viene de largo tiempo atrás, pero ha crecido de forma muy importante en la última década y ha permitido implantar un modelo de colaboración eficaz. La participación española en estos foros internacionales

de investigación se caracteriza por una involucración activa de las entidades de nuestra industria nuclear, por el liderazgo de algunos de los proyectos, y por la contribución mediante aportaciones de materiales propios o de productos de otros proyectos de investigación.

En este artículo se pasa revista a la situación actual, describiendo el contenido y características principales de los proyectos en los que participan organizaciones españolas.

PROYECTOS COORDINADOS POR LA NEA-OCDE

La Agencia de Energía Nuclear ("Nuclear Energy Agency", NEA) de la OCDE ha promovido y coordinado proyectos de investigación en el campo del combustible desde hace décadas. La participación en este tipo de proyectos es en general de carácter nacional, es decir, se favorece el que las distintas organizaciones de cada país interesadas en un proyecto se asocien entre sí, de forma que la participación en el proyecto se formaliza mediante un convenio en el que hay un único firmante de cada país, salvo excepciones. El representante suele ser el Organismo Regulador del país correspondiente, aunque de nuevo en este aspecto puede haber excepciones. En todo caso, la participación técnica de las organizaciones de un país concreto en el proyecto es directa, sin que exista ningún tipo de limitación en este sentido.

La participación española en proyectos de investigación sobre combustible auspiciados por la NEA comenzó en 1991 con la entrada en el proyecto Halden, y se vio reforzada por la participación en el proyecto CABRI a partir de 1999. En este apartado se describen los proyectos en los que las organizaciones españolas participan actualmente de forma activa.

Proyecto del reactor de HALDEN

El proyecto Halden está operado por el "Norwegian Institute for Energy Technology" (IFE). El proyecto se creó hace 49 años, y es el mayor de los operados por la NEA en términos de participación (aproximadamente 100 organizaciones de 18 países). El proyecto incluye, en realidad, actividades en tres campos diferentes: combustible nuclear, integridad de los internos del reactor y control y monitorización de la planta y factores humanos. El proyecto Halden dispone de una organización estable y con experiencia, y de una infraestructura técnica que ha alcanzado un elevado desarrollo a lo largo de los años. Los objetivos del proyecto se adaptan de forma continua a las necesidades de los usuarios, para

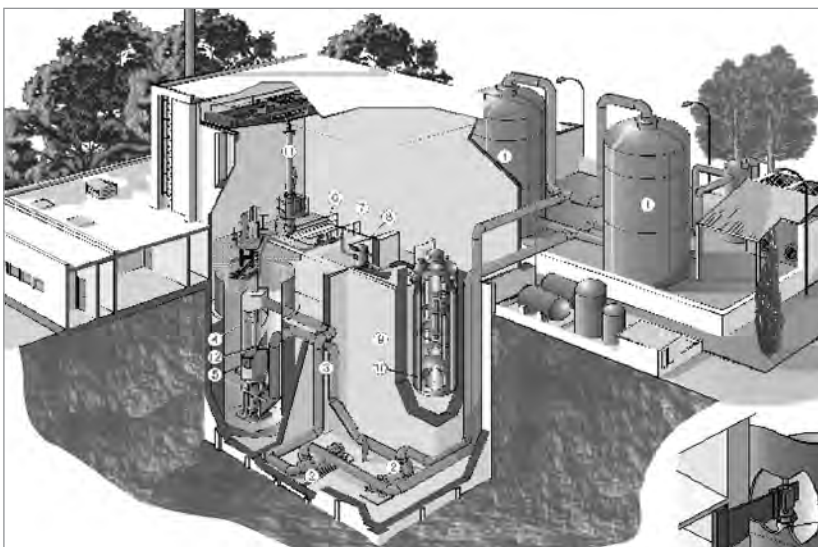


Figura 1: Vista general del reactor de CABRI (IRSIN) con el lazo de refrigeración de agua.

lo cual se opera mediante programas de trabajo trienales acordados por los participantes.

La participación española en el proyecto se articula mediante un Convenio Nacional específico en el que participan el CSN, Ciemat, Enusa y Tecnatom. La coordinación de este Convenio Nacional la realiza el Ciemat.

La principal característica de este proyecto es la disponibilidad de un reactor de ensayos en el que se pueden irradiar barras de combustible altamente instrumentadas y someterlas a unas condiciones de operación previamente establecidas. La barras de combustible representan razonablemente bien los productos comerciales, normalmente la única diferencia reside en su longitud y en muchos casos se trata de segmentos refabricados a partir de barras que han operado en reactores comerciales. La instrumentación permite monitorizar de manera continuada variables tan significativas como las temperaturas en la pastilla y en la vaina, la elongación de la columna de combustible y de la vaina, la presión interna de los gases y su actividad, así como las condiciones de contorno de la operación: flujo neutrónico, caudal del refrigerante y su temperatura.

En el trienio en curso, que finaliza en 2008, los trabajos relacionados con combustible han incluido experimentos de simulación de accidentes con pérdida de refrigerante (LOCA), utilizando combustible de alto quemado. Estos experimentos son los únicos que se han realizado en reactor, y complementan los realizados a escala de laboratorio en EE.UU., Japón y Francia, entre otros. Los resultados, hasta ahora muy prometedores, están en fase de confirmación mediante ensayos en celda caliente.

Además de estos experimentos recientes, el proyecto Halden ha continuado sus líneas tradicionales de investigación sobre propiedades y características del combustible, en las que destacamos los siguientes grupos de experimentos:

- Investigación del combustible sometido a condiciones normales de operación hasta quemados elevados (en el rango 60 a 100 MWD/kg) con el fin de obtener datos relevantes que permitan extender los actuales límites licenciados. Se incluyen tanto combustibles PWR, BWR y VVER de diseño convencional, como combustibles con aditivos y óxidos mixtos.
- Investigación del comportamiento comparado del combustible con y sin gadolinia con el propósito de caracterizar y cuantificar los efectos de la adición de este veneno consumible y poder justificar modelos más realistas. Hay que destacar que en la serie de experimentos que se han venido desarrollando al respecto desde 1998 se han realizado en colaboración con Enusa, tanto en lo que concierne al suministro del combustible, como al diseño del dispositivo de ensayo y a la interpretación de los resultados.
- Estudios sobre el comportamiento de distintas aleaciones de vaina frente a corrosión y a fluencia. La ventaja que brinda el Proyecto Halden, además de la monitorización en línea de propiedades significativas, es la posibilidad de someter a los diferentes materiales a condiciones ambientales extremas de manera que queden suficientemente envueltas las esperables en los reactores comerciales. También se debe destacar que entre las aleaciones empleadas se encuentra el Zirlo, material de vaina típico de los

reactores PWR que operan en España, así como otras aleaciones que también forman parte de programas de investigación en curso en reactores españoles, por lo que se generan valiosas sinergias.

Además del programa conjunto en el que participan todas las organizaciones del proyecto, que es el que se ha descrito hasta ahora, el proyecto Halden ofrece la posibilidad de realizar experimentos bajo demanda con carácter bilateral.

Proyecto del reactor de CABRI con lazo de agua

El proyecto CABRI investiga la capacidad del combustible de alto quemado para soportar las condiciones de inyección brusca de potencia que se pueden producir en los accidentes postulados de inserción de reactividad (RIA). El objetivo del proyecto es determinar los límites de fallo del combustible y las consecuencias de la potencial eyección de combustible hacia el refrigerante. En el proyecto se utiliza combustible de diseño comercial irradiado en centrales de producción de energía hasta los niveles de quemado deseados. El programa experimental consta de doce experimentos que intentan cubrir la variabilidad de los parámetros más importantes del accidente (energía inyectada, anchura de pulso) y diferenciar el comportamiento de los diferentes tipos de combustible (MOX, aleaciones de vaina).

Los trabajos experimentales se realizan en el reactor de CABRI, que se encuentra en las instalaciones del "Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire" (IRSN) en Cadarache (Francia). La realización del proyecto requiere la realización de modificaciones sustanciales en el reactor, fundamentalmente para sustituir el lazo de refrigeración del reactor de sodio (utilizado en su momento para experimentos de reactores rápidos) por un lazo de agua a presión.

La participación española en el proyecto la encabeza el CSN, manteniendo Enusa una participación activa en todos los aspectos técnicos del proyecto, y realizando el CIEMAT tareas de seguimiento que han incluido la estancia de técnicos en Cadarache. El programa de trabajo incluye la realización de doce experimentos con distintos materiales de vaina y tipos de combustible. La colaboración de Endesa, que facilitó al CSN combustible irradiado en C.N. Vandellós 2 para este proyecto, ha desembocado en que cuatro de los experimentos,



Figura 2: El reactor NSRR de JAEA (Japón).

entre ellos los utilizados como referencia para el proyecto, serán realizados con combustible irradiado en España.

Hasta el momento se han realizado los dos primeros experimentos del programa, ambos en todavía en el lazo de sodio, utilizando combustible de alto quemado (por encima de 70 MwD/kgU) con vaina de Zirloy y de M5. En ambos casos se inyectó una energía aproximada de 100 cal/g durante el transitorio, sin que se detectase fallo de la varilla en ninguno de ellos. Estos primeros experimentos constituirán la referencia para el programa. Los restantes experimentos se realizarán a partir del año 2010, ya en el lazo de refrigeración por agua.

Dadas las características de los experimentos que se pueden realizar en CABRI, en términos de anchura del pulso de potencia, presión y temperatura del refrigerante, este programa puede considerarse complementario del que se está llevando a cabo en el reactor NSRR de Japón. Es por ello que la organización ha llegado a un acuerdo con "Japan Atomic Energy Agency" (JAEA) para que se incorpore al proyecto proporcionando, como contribución en especie, resultados de experimentos escogidos por los participantes en CABRI. Esta contribución significa un enriquecimiento muy notable del alcance técnico del proyecto, derivada del hecho de que varios de los combustibles utilizados en CABRI son iguales a los ensayados en NSRR, lo que permite realizar comparaciones de comportamiento en diferentes condiciones.

Proyecto Studsvik sobre integridad de la vaina (SCIP)

El proyecto SCIP ("Studsvik Clad Integrity Project") comenzó en Julio de 2004, y tiene como objetivo utilizar las celdas calientes y la experiencia disponible en los laboratorios de Studsvik (Suecia) para estudiar las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno que pueden conducir al fallo de la varilla. El objetivo que subyace es el de mejorar el conocimiento general sobre la fiabilidad de la vaina en condiciones de alto quemado, mediante estudios avanzados de los fenómenos y procesos que pueden amenazar la integridad de la varilla tanto durante la operación del combustible en la central como durante las fases de almacenamiento y transporte posteriores.

La participación española en el proyecto está coordinada por el CSN, con participación técnica directa de Enusa y con labores de seguimiento por parte tanto de Enresa como del Ciemat. Como en el caso del proyecto CABRI, la colaboración adicional de Enresa ha permitido que una parte apreciable de los experimentos se realicen con combustible irradiado en centrales españolas.

Los resultados que se pretende obtener en el proyecto son de aplicabilidad general, es decir, no restringidos a diseños específicos de combustible o a condiciones de operación concretas, con el fin de contribuir a resolver un espectro de problemas más amplio. La eficiencia del proyecto se basa en mezclar adecuadamente las técnicas experimentales, algunas de ellas desarrolladas dentro del propio proyecto, con aproximaciones teóricas.

Hasta el momento, las actividades se han centrado en la realización de rampas de potencia en reactor y en la definición de un programa de exámenes en celda caliente focalizado en el estudio de los distintos mecanismos de fallo, que se estudian en tareas individualizadas del proyecto. Estas tareas son las siguientes:

- Interacción entre la pastilla y la vaina (PCI): corrosión de la vaina bajo tensión iniciada desde el interior por el efecto combinado de las cargas mecánicas y del ambiente químico.
- Fragilización por hidruros: fallo de la varilla por fractura de los hidruros formados en la vaina.
- Fractura retardada por hidruros: fenómeno dependiente del tiempo en

el que la grieta se propaga por fractura de los hidruros que se van formando en el extremo de la misma.

PROYECTOS EN COLABORACIÓN CON LA INDUSTRIA DE EE.UU.

UNESA se integra en el año 1998 en el programa internacional de investigación denominado "Robust Fuel Program" (RFP), impulsado por el EPRI, y dedicado fundamentalmente a la investigación de aquellos aspectos que se consideraban más problemáticos en relación con la fiabilidad del combustible. Desde primeros de 2007, esa colaboración con EPRI se extiende a otras áreas de investigación, entre las que se ha de destacar el almacenamiento y transporte del combustible gastado.

Actualmente las líneas de investigación del vigente "Fuel Reliability Program" (FRP), heredero del citado RFP, son las siguientes:

- Estudio de los efectos de la química del primario de un PWR sobre la fiabilidad del combustible en general y los mecanismos de deposición de lodos ("crud", si se emplea el acrónimo con el que habitualmente se designa internacionalmente a estos depósitos en la vainas) en particular.

Se trata de una combinación de programas de vigilancia en varias centrales nucleares con unas condiciones de operación envolventes en lo que respecta a su potencial propensión al "crud", y la realización de experimentos "ad hoc" que ayuden a entender la cinética de esos mecanismos. La integración española en esta línea de investigación es decisiva ya que entre las centrales seleccionadas para los programas de vigilancia se encuentra Vandellós II, que está introduciendo una química con inyección de Zn, y entre los experimentos se encuentra el impulsado por ENUSA y realizado en colaboración con ENDESA, IBERDROLA, ANAV y CNAT.

- Estudio equivalente de los efectos de la química del primario de un BWR sobre la fiabilidad de este tipo de combustible
- Trabajos de investigación sobre el comportamiento del combustible en accidente. Se trata fundamentalmente de colaboraciones en programas experimentales de la NRC y de otros organismos regula-

dores, así como en los análisis propios para soportar técnicamente la justificación de criterios de diseño frente al LOCA y al RIA.

- En este caso también conviene poner de manifiesto que entre los programas internacionales vinculados se encuentra el del reactor de Cabri anteriormente descrito.
- Investigación de los fallos de fiabilidad. Se pretende establecer los principales mecanismos de fallo en servicio y cuantificar los márgenes de operación frente a dicho fallo.

Por otra parte, en lo que respecta a los proyectos de investigación sobre combustible gastado, dentro del Programa del EPRI "High-Level Waste and Spent Fuel Management", se enmarcan varias iniciativas para soportar el transporte y almacenamiento en seco del combustible gastado. Es indudable el interés de estos estudios para la industria española dada la decisión actual sobre la disposición del combustible gastado. Los resultados de este programa están siendo fructíferamente aprovechados en los trabajos de investigación que al respecto está realizando la industria española en el marco de la Plataforma CEIDEN.

A su vez, UNESA ha establecido acuerdos con varias entidades españolas

con el fin de garantizar el máximo aprovechamiento de su colaboración con EPRI. Mediante estos acuerdos UNESA reconoce a una determinada entidad como Centro de Referencia en cierto ámbito tecnológico, y la compromete a asimilar los frutos de los proyectos de investigación del EPRI en dicho ámbito y a realizar propuestas que mejoren el retorno tecnológico para UNESA.

Por otra parte, independientemente del RFP, desde 1982, el EPRI ha impulsado importantes programas de investigación sobre combustible nuclear mediante la creación del "Nuclear Fuel Industry Research group" (NFIR). Se trata de un consorcio internacional en el que participan empresas eléctricas, centrales nucleares, fabricantes de combustible y centros de investigación, y que realiza proyectos orientados a mejorar el conocimiento en aspectos fundamentales y prioritarios del comportamiento del combustible y de los componentes del núcleo. La participación de entidades españolas se remonta al Programa NFIR-III lanzado a comienzos de los noventa. En estos momentos se está ejecutando el Programa NFIR-V (2004-2010), en el que ENUSA participa, cuyas principales líneas de investigación se resumen a continuación:

Se resumen a continuación:

- Medida y caracterización de propiedades del combustible irradiado a elevado quemado
- Estudios sobre los mecanismos de liberación de gases de fisión
- Caracterización y estudio de la estructura de alto quemado en la pastilla ("rim") y sus efectos sobre la potencial dispersión del combustible durante un transitorio muy rápido (por ejemplo, en un RIA)
- Investigación de los mecanismos de gobiernan características esenciales de las aleaciones de Zr (esto es, de las vainas de combustible y de los tubos guía), tales como los cambios dimensionales inducidos por la irradiación, la reorientación de hidruros y las leyes de fluencia mecánica.

COLABORACIONES DIRECTAS CON ORGANIZACIONES EXTRANJERAS

La actividad desarrollada por las organizaciones españolas en proyectos nacionales de investigación sobre combustible, unida a la labor desarrollada en

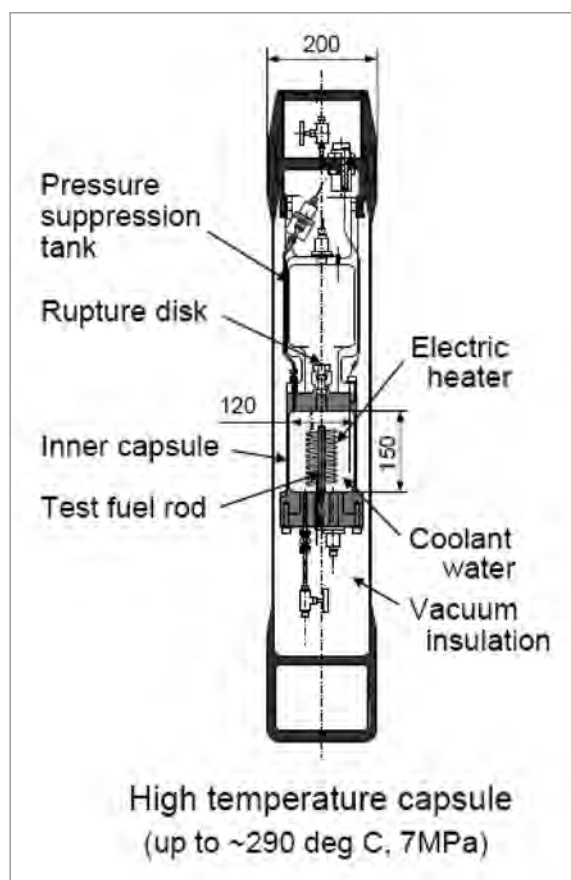


Figura 3: Cápsula utilizada en el reactor NSRR para los experimentos de inserción de reactividad.

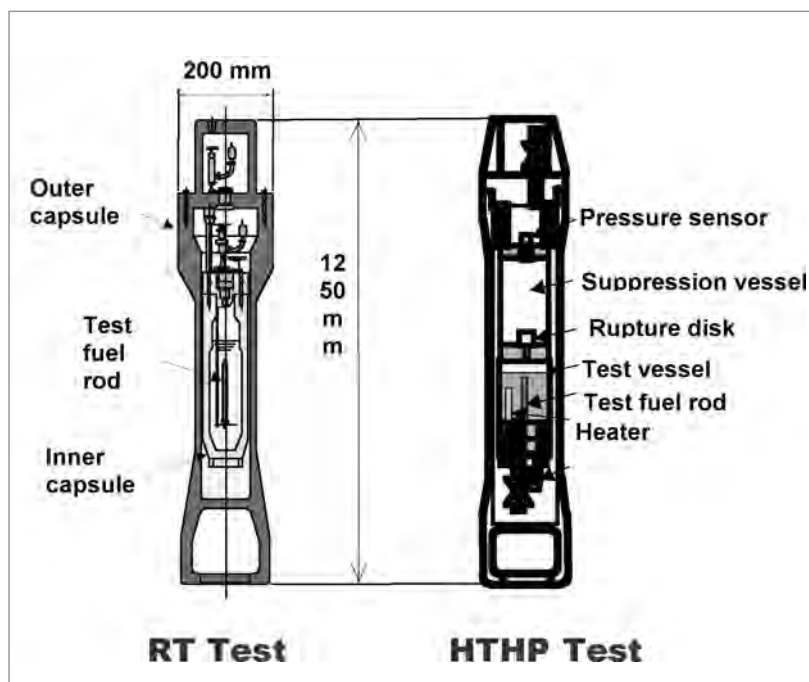


Figura 4: Dispositivo utilizado en el reactor NSRR para los experimentos integrales de RIA.

los foros internacionales, ha propiciado el establecimiento de relaciones y contactos técnicos con organizaciones de otros países que tienen intereses similares. Estas colaboraciones incluyen desde los intercambios de información hasta la puesta en marcha de proyectos experimentales conjuntos, como se expone a continuación.

Proyecto ALPS de JAEA (Japón)

La organización de investigación japonesa JAEA puso en marcha hace varios años el programa de investigación sobre seguridad del combustible denominado ALPS. Este programa, que se realiza bajo contrato con la autoridad reguladora japonesa, incluye la realización experimentos de simulación de RIA en el reactor NSRR y de simulación de LOCA, así como el desarrollo de códigos de comportamiento de varilla a partir de los resultados obtenidos. El programa inicialmente previsto finaliza el próximo año 2008.

La organización de este proyecto mostró su interés por disponer de combustible irradiado en centrales españolas similar al suministrado al proyecto CABRI, con el objetivo de obtener sinergias entre ambos programas. De esta forma, las organizaciones españolas involucradas (en este caso el CSN, Enusa y Endesa) han entrado a participar en el proyecto suministrando el combustible solicitado, como contribución en especie y

sin ninguna otra aportación adicional.

Como resultado de esta participación se han realizado experimentos tanto de RIA como de LOCA con combustible irradiado en la central nuclear Vandellós 2.

Acuerdo de colaboración en I+D con la USNRC

El CSN mantiene desde hace años un acuerdo de colaboración con la NRC que incluye diversos temas, y que consta de un Apéndice dedicado a actividades de I+D. En él se recogen los aspectos relacionados con la investigación sobre combustible, que se centran de forma básica en el comportamiento del combustible con alto quemado y los mecanismos de fallo en condiciones de almacenamiento y transporte.

Como resultado de este acuerdo, las organizaciones españolas tienen acceso a los resultados que se obtienen en el programa de investigación de la NRC en el laboratorio Nacional de Argonne, que incluye los dos temas citados, así como a los programas de desarrollo de códigos de comportamiento de la varilla (FRAPCON, FRAPTRAN) que mantiene la NRC. Tanto el CSN como el CIEMAT y Enusa participan activamente en estas actividades de colaboración.

Acuerdo de intercambio de información con JNES (Japón)

El Consejo de Seguridad Nuclear, Enresa y Enusa han llevado a cabo en

los últimos años una serie de proyectos experimentales en los que se han investigado distintas propiedades y características del combustible de alto quemado, como el comportamiento de la vaina irradiada ante cargas mecánicas del tipo RIA, el fallo de vaina por fluencia excesiva en condiciones de almacenamiento en seco o la composición isotópica a altos valores de quemado en combustible de alto enriquecimiento.

El alcance y contenido de estos proyectos ha despertado el interés de diversas organizaciones extranjeras que trabajan en estos campos, lo que ha conducido al establecimiento de acuerdos de intercambio de información. En el caso concreto de la organización "Japan Nuclear Energy Safety" (JNES), se ha establecido un intercambio de resultados experimentales sobre comportamiento en almacenamiento en seco y composición isotópica, que está proporcionando acceso a información muy relevante.

Proyectos compartidos con el laboratorio nacional de Oak Ridge (ORNL)

El laboratorio ORNL es el encargado en Estados Unidos de desarrollar el programa de implantación de las metodologías de análisis de criticidad con crédito al quemado, como apoyo técnico de la NRC y el DOE. Una de las tareas que realiza es la de obtener y analizar datos experimentales que puedan ser utilizados para la validación de los códigos que intervienen en estas metodologías. La mayor parte de esta actividad tiene que ver con la realización de medidas de la composición isotópica de combustible gastado, cuyos resultados se usan para la validación de los códigos de quemado del combustible.

Como ya se ha indicado en otro apartado, uno de los proyectos nacionales de investigación realizado en los últimos años se ha dedicado a la medida de la composición isotópica de combustible PWR con grados de quemado elevados. Este tipo de datos es muy escaso en la literatura, por lo que ORNL se dirigió a las organizaciones españolas para suscribir un acuerdo de acceso a los resultados de estas medidas. Como resultado de este acuerdo, se ha procedido a una co-financiación del proyecto que ha permitido dotarle de un alcance mucho mayor. ■