



Bernard ADROGUER es jefe del Laboratorio de Interpretación Phebus CSD del CEA/IPSN/DERS. Desarrolla su actividad profesional en el Centro de Estudios Nucleares de Cadarache, Francia.



Christian GONNIER es jefe del Grupo Experimental de Phebus CSD en el CEA/IPSN/DERS. En la actualidad trabaja en el Centro de Estudios Nucleares de Cadarache, Francia.

PROYECTO PHEBUS

LA INSTALACION, LA MATRIZ EXPERIMENTAL Y EL ANALISIS DE LOS RESULTADOS

B. ADROGUER - C. GONNIER - J. A. MARTINEZ

INTRODUCCION

El reactor experimental PHEBUS fue montado en el emplazamiento de Cadarache por el CEA en el año 1977 para estudiar el comportamiento del combustible de PWR bajo condiciones simuladas de refrigeración accidental.

En el primer programa experimental, terminado a finales del año 1984, se pretendía investigar el comportamiento de un haz de barras de combustible presurizado del tipo PWR bajo condiciones producidas por un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA) por gran ruptura. Se alcanzaron unas temperaturas máximas de vaina de casi 1.570 K, siendo éste el valor límite tolerado en el accidente de referencia que se tuvo en cuenta en el análisis de seguridad para este tipo de reactor.

El segundo programa experimental, que se presenta más detalladamente en el presente documento, comenzó en el año 1986 y concluyó en el mes de junio de 1989. Contempla el comportamiento del combustible en caso de accidentes hipotéticos en los que se postula fallo del sistema de refrigeración de emergencia. Bajo estas "condiciones fuera de dimensionamiento", el descubrimiento del núcleo puede dar lugar a temperaturas muy altas (hasta la temperatura de fusión del combustible) y a Daños Severos al Combustible (Programa PHEBUS CSD).

Los fenómenos de degradación que se pueden producir bajo dichas condiciones son complejos, dependiendo principalmente de la temperatura.

- El "zircaloy" (aleación de circonio utilizada para el revestimiento del combustible) es un fuerte agente reductor, reaccionando energicamente con vapor. La reacción, altamente exotérmica, se vuelve sensible a unos 1.570 K y su cinética acelera rápidamente a altas temperaturas (posible escalada). Está acompañada por producción de hidrógeno y modificación de las propiedades mecánicas de la vaina debido a la oxidación (fragilización).
- El "zircaloy" reacciona con UO_2 para formar mezclas de U-O-Zr, particularmente a las temperaturas superiores al punto de fusión del "zircaloy" (que oscila entre 2.030 y 2.220° K, en función del contenido de oxígeno en la solución metálica). Esta reacción conduce a una "disolución" del combustible a una temperatura de 1.000 K por debajo de su punto de fusión (aproximadamente 3.120 K).
- Otros fenómenos de degradación se deben a las interacciones entre "zircaloy" y materiales estructurales, como inconel (rejillas o resortes de rejillas de "zircaloy"), acero inoxidable o la aleación de plata-indio-cadmio

(materiales absorbentes). Estas interacciones dan lugar a la formación de aleaciones licuadas a temperaturas inferiores al punto de fusión de materiales "puros" (formación de eutécticos).

El objetivo principal de la instalación PHEBUS es la reproducción de un ambiente tan representativo como sea posible de lo que existiría en un núcleo bajo condiciones severas de accidente (térmico-hidráulico, distribución de energía, etc.), para permitir que se produzcan los fenómenos arriba mencionados. Los exámenes posttest permiten la evaluación del orden de magnitud de los daños, así como un mejor conocimiento de los fenómenos de degradación.

Un punto clave de la instalación es el buen control de los parámetros principales que influyen en las secuencias de daños (condiciones térmicas y térmicas-hidráulicas, condición de potencia, condiciones iniciales de combustible y estructuras) para poder disponer de una base de datos técnicos fiable para el desarrollo y la verificación de los códigos de ordenador, tal como ICARE, capaces de describir un comportamiento de daños severos al núcleo.

INSTALACION

El principio de los experimentos consiste en el suministro de un haz de 21 barras de combustible frescas del tipo PWR de 1,3 m. de altura con una mezcla de gases sobrecalentados de baja velocidad de circulación (vapor-hidrógeno o helio), durante un período de tiempo variable (de unas cuantas horas).

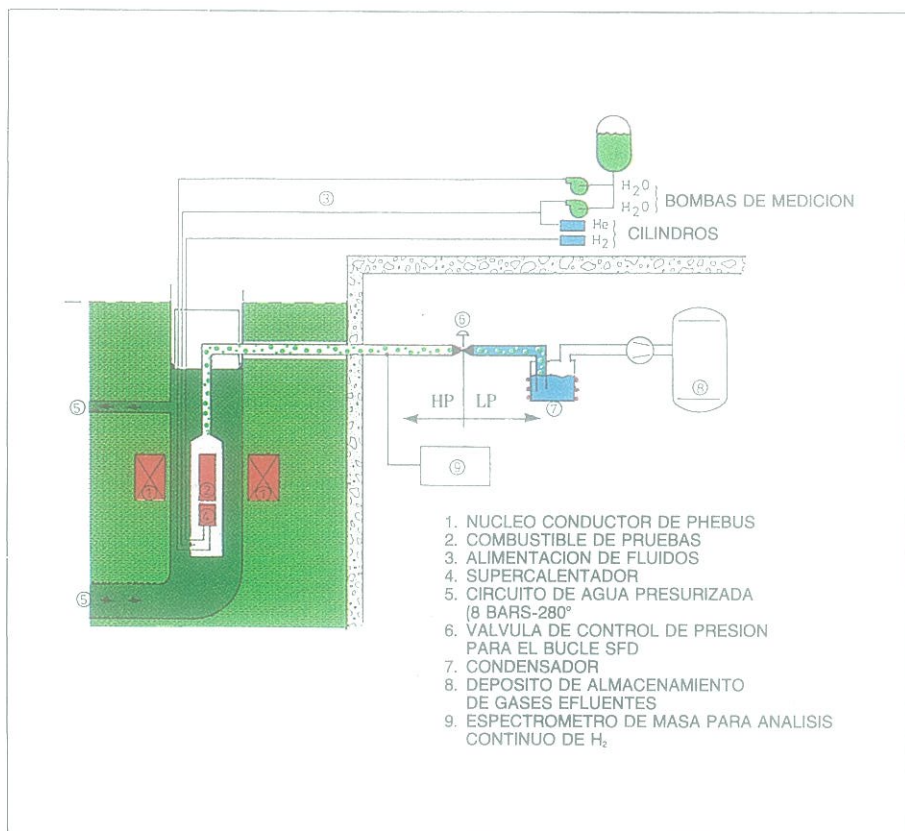
Se ajusta la potencia de combustible según la evolución de temperatura deseada.

Se realizan las pruebas en la planta PHEBUS, que consta de tres partes principales (Fig. I):

- El núcleo conductor, que suministra energía nuclear al combustible experimental.
- El lazo CSD, cuya función consiste en crear el ambiente termohidráulico alrededor del combustible experimental, correspondiente a las condiciones de daños severos al combustible de un PWR.
- El lazo de agua presurizada, que cumple la función de un circuito tampón entre el lazo CSD y el núcleo conductor.

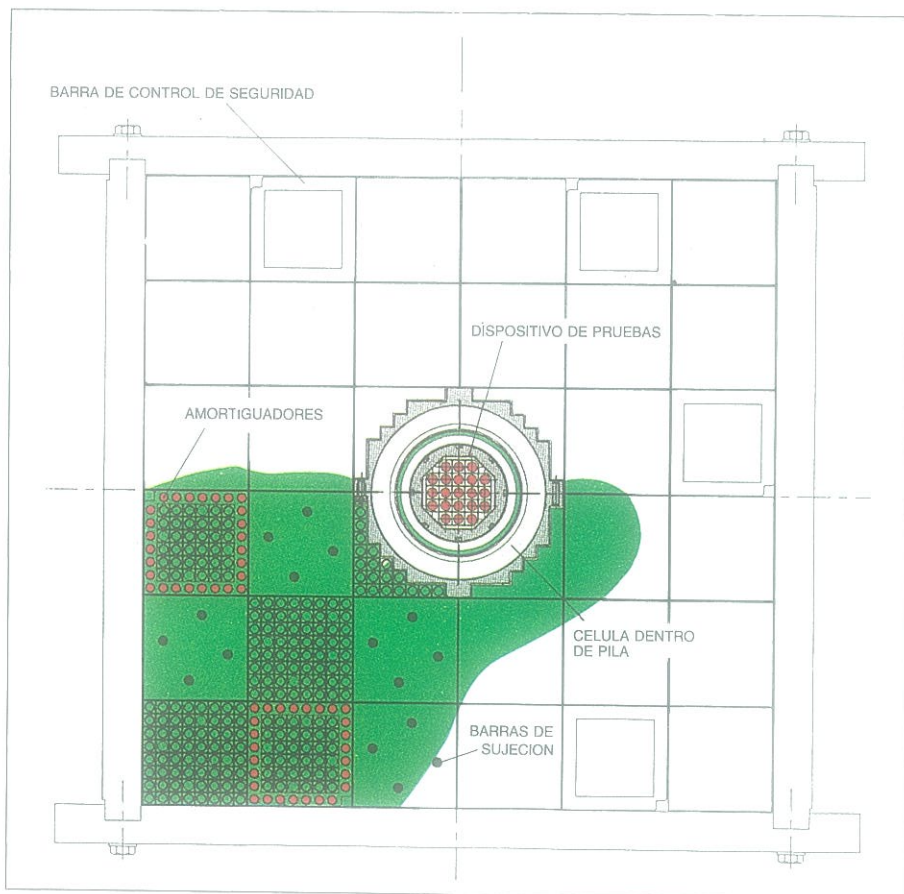
NUCLEO CONDUCTOR

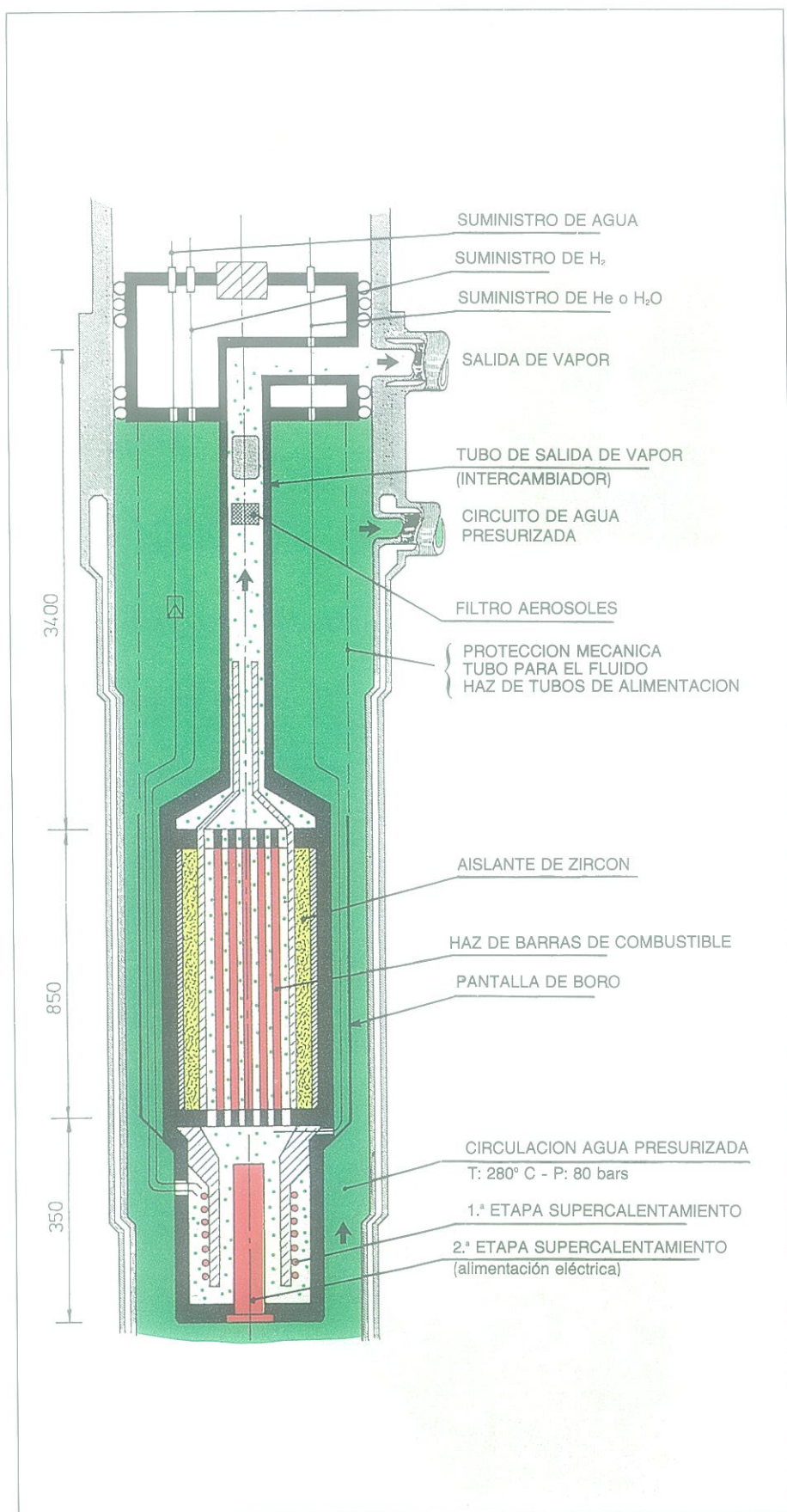
El núcleo conductor suministra energía nuclear al haz de pruebas. El reactor asociado es un reactor de tipo piscina, enfriado por circulación de agua en circuito abierto (Fig. I). La potencia má-



F I Esquema general de la instalación PHEBUS-CSD.

F II Sección transversal del núcleo.





F III Dispositivo experimental de PHEBUS-CSD.

xima de funcionamiento es alrededor de los 15 MW para pruebas de SFD. El núcleo consta de 1.576 barras de combustible del mismo diámetro que los utilizados en reactores de potencia. En el centro del núcleo, se ha creado una cavidad cilíndrica que recibe la célula interna de la pila que contiene el dispositivo experimental dentro de tubos de presión y seguridad concéntricos (Fig. II). La longitud fisible de combustible tanto en el núcleo conductor como en el haz de pruebas es de 80 cm. Para poder simular mejor una zona limitada del núcleo de un reactor PWR se instaló una pantalla de acero de boro entre el núcleo conductor y el elemento experimental, lo que produjo un aplanamiento del perfil de potencia axial alrededor del plano medio. La potencia lineal máxima en el haz de pruebas que se puede alcanzar en esta configuración es alrededor de los 40 W/cm.

EL LAZO CSD

Este lazo, que está situado en la posición más interior de la célula interna del reactor, transporta el flujo de fluidos hasta el tren experimental y desde él (Fig. III). Este lazo funciona en circuito abierto y consta de lo siguiente:

- Tres líneas de inyección que suministran el gas (vapor, hidrógeno o helio) a la entrada de la sección experimental. El caudal máximo de vapor es de unos 30 g/s. y del helio e hidrógeno de 0,5 g/s.
- Un dispositivo eléctrico de supercalentamiento utilizado para aumentar la temperatura de entrada de gases hasta el nivel requerido en el escenario experimental (temperatura máxima, 1.270 K).
- La sección experimental, con 21 barras del tipo PWR en una matriz de 12,6 mm. de paso entre barras (Fig. IV). El enriquecimiento del combustible fresco utilizado durante el programa CSD se realiza de forma regular y se ha establecido en 2,6%. La altura fisible total es de 800 m. Dos rejillas (inconel o zircaloy) separadas por 560 mm. y situadas a cada lado del plano de cota media mantienen las barras. El haz de barras de combustible está rodeado por un revestimiento de zircaloy (el cual simula los revestimientos de las barras vecinas en un montaje de combustible PWR real) y por un aislante térmico fabricado con óxido de zirconio poroso.
- La línea de salida, que dirige el flujo de gases a una válvula de control de presión (para obtener la presión necesaria para las condiciones de prueba desde 1 hasta 40 bars) y, posteriormente, al condensador y de-

pósito de almacenamiento en la línea final de baja presión (ver Fig. I).

EL LAZO DE AGUA PRESURIZADA

Este lazo, que se coloca como circuito tampón entre el núcleo conductor y el lazo CSD, hace circular el agua presurizada a 530 K bajo una presión de 80 bars (representado con el color verde en la Fig. III). Cumple dos funciones principales:

- A efectos de seguridad, permite el enfriamiento exterior del dispositivo experimental a través del tubo del tren experimental.
- A efectos experimentales, sirve como fuente de calor para la ebullición de la línea de inyección de agua que desciende hasta la entrada del supercalentador, a través del agua presurizada, puesto que la presión del bucle CSD es inferior a la presión de saturación a 530 K, el agua inyectada se vaporiza y se sobrecalienta hasta dicha temperatura.

INSTRUMENTACION Y EXAMENES POSIRRADIACION

Se utilizan termopares especiales para medir las temperaturas en esta sección experimental, lo que supone la utilización de dos tipos de tecnología diferentes, teniendo sus orígenes en programas de investigación y desarrollo.

En ambos casos, los termoelementos son hilos de aleación de tungsteno-renio aislados por óxido de hafnio. El revestimiento, que garantiza resistencia a la oxidación, está fabricado de renio cubierto con silicato de renio o zircaloy revestido con tantalio.

Se colocan estos termopares en el centro del combustible, y vainas de Zr dentro y fuera del revestimiento de Zr sobre el tubo octogonal, en el aislante de óxido de zirconio poroso, a la entrada y salida de gases. Se utilizan termopares convencionales en la zona fría.

La entrada de vapor está determinada por dos bombas de medición; se regula el suministro de hidrógeno desde un cilindro mediante un sistema de medición de flujo de válvula de servocontrol.

Se mide de forma continua la concentración de hidrógeno en la mezcla de gases, a la salida del lazo, mediante un espectrómetro de masa.

Los exámenes posirradiación permiten unos medios adicionales de medición; se comprueba el estado del haz en fases sucesivas, empezando con medidas no destructivas (exploración por radiografía y por gamma), para determinar la ubicación del combustible, seguidas por exá-

menes destructivos, por ejemplo cortes, para incorporar un estudio topológico que proporciona las distintas especies y compuestos químicos derivados de las pruebas. Las técnicas de examen son en su mayor parte exámenes por microscopio óptico (para las microestructuras de los compuestos, espesor de las capas de óxido, etc.), difracción por rayos X y análisis por microsonda (para la determinación de las especies químicas).

FUNDAMENTOS DE LA MATRIZ EXPERIMENTAL PHEBUS-CSD

En Francia se ha llevado a cabo un gran programa tanto experimental, con el programa "en pila" PHEBUS-CSD (Ref. 1), como analítico, con el desarrollo del código ICARE (Ref. 2), para poder analizar los fenómenos de daños severos al núcleo, que se producen en los accidentes hipotéticos fuera de la base de diseño. Se definió la matriz de pruebas PHEBUS-CSD dentro del marco de algunas secuencias de accidentes con aspectos fenomenológicos bien marcados. Un LOCA por ruptura pequeña con fallo de inyección de seguridad (secuencia B) y una pérdida total de agua de alimentación del generador de vapor (secuencia C), son los dos tipos de accidentes que se han considerado para estudiar la degradación por descubrimiento del núcleo.

Se han realizado cálculos del reactor para evaluar los rangos de variación de los parámetros experimentales tales como potencia lineal, flujo de entrada de vapor e hidrógeno y temperatura y presión del gas de entrada. La representatividad de cada prueba está limitada a una "ventana de espacio en el tiempo" que representa una pequeña parte del núcleo del reactor durante el período del descubrimiento del núcleo, seguido por el proceso de fusión del núcleo hasta el comienzo de una recolocación importante del material cerámico.

Las zonas del núcleo consideradas para la definición de las pruebas en el programa CSD son, por un lado, la zona central (número 3), y, por otro, la zona periférica en el plano a media altura del núcleo (número 9).

Para evitar unos experimentos integrales demasiados complejos, que comprenden todos los aspectos de la degradación del núcleo, se ha centrado cada uno de los seis experimentos de la matriz CSD (tabla I), principalmente en uno o varios fenómenos importantes que se producen durante dicha degradación.

- La oxidación de las vainas de Zr por vapor (cinética lenta y rápida), con la generación correspondiente de H_2

(B9, B9R, B9+).

- Disolución de UO_2 por Zr sólido (C3, C3+) y Zr líquido (C3+, B9+).
- Interacción química de ZrO_2 con Zr líquido (B9+).
- Interacción de rejilla separadora de inconel con la vaina original de Zr en distintos estados de oxidación (todas las pruebas, salvo la de AIC).
- Comportamiento de rejilla separadora de zircaloy (prueba AIC).
- Fundición, reubicación y solidificación de las mezclas del haz de barras (C3+, B9+, AIC).
- Fragilización de barras altamente oxidadas bajo enfriamientos diferentes (B9, B9R) y la fragmentación de combustible correspondiente con formación de lecho de escombros (B9R).
- Comportamiento de barras de control (Ag, In, Cd) e interacción de material absorbente fundido con barras cercanas (AIC).

El objetivo principal de las pruebas PHEBUS-CSD es ampliar los conocimientos de los fenómenos de degradación, y proporcionar una base de datos para el desarrollo y verificación del código ICARE, capaz de describir el comportamiento de daños severos al núcleo. Se utilizó este código para preparar cada prueba. Es ahora la principal herramienta analítica utilizada para interpretar los resultados experimentales en estrecha colaboración con el Consorcio español PHEBUS, y más recientemente con la cooperación de JAERI (Japón). Aparte de los experimentos PHEBUS-CSD en geometría de haz, se han realizado o serán realizados próximamente experimentos sobre efectos únicos fuera de pila para comprender algunos puntos particulares y para obtener resultados complementarios a la base de datos PHEBUS. En particular se han programado experimentos analíticos para estudiar la fragilización de las vainas de Zr con distintos niveles de oxidación y para distintos impactos térmicos. También están en curso pruebas analíticas para estudiar los criterios de ruptura de la capa exterior de ZrO_2 de una vaina oxidada y la modalidad de flujo descendente de reubicación de Zr fundido.

RESULTADOS EXPERIMENTALES E INTERPRETACION DE LOS EXPERIMENTOS

EXPERIMENTO B9

El fenómeno principal estudiado es una oxidación dominante de la vaina de zircaloy antes de alcanzar su punto de fusión. Una disminución lenta de la velocidad del flujo de vapor desde 4

hasta 1 g/s. permitió obtener una baja velocidad de calentamiento de 0,2 K/s entre los 1.270 y 1.800 K. Luego se produjo un aumento de la velocidad de calentamiento (un máximo aproximado de 5 K/s) al final del experimento, debido al aumento de la velocidad de oxidación de zircaloy a 1.800 K (transición de ZrO_2 de fase tetragonal a cúbica). Se obtienen niveles altos de oxidación, de entre el 60 y el 90%, en la zona caliente, pero no se produjo ninguna pérdida significativa de geometría durante la prueba. Se han observado agrietamiento y pequeñas deformaciones de la vaina oxidada en la parte superior del elemento. El espesor estimado de la capa de ZrO_2 (de 100 a 150 μm) en el momento de la fusión de la rejilla separadora superior de inconel impide la interacción química con la vaina.

Los primeros cálculos realizados con ICARE dieron una sobreestimación significativa de la temperatura de las barras en la parte caliente y superior del haz. De hecho, la capa porosa de ZrO_2 del envoltorio se iba contaminando con hidrógeno procedente de la oxidación del revestimiento exterior del envoltorio de Zr, dando lugar a un aumento de la conductividad del ZrO_2 poroso cuando el hidrógeno sustituía al vapor en los poros. Esta contaminación es local, afectando principalmente a la parte superior del haz. Teniendo en cuenta este efecto, se obtuvo una buena concordancia respecto al comportamiento térmico de las barras entre el cálculo y las mediciones. La correlación Urbanic-Heidrick hace una subpredicción de la oxidación, y la de Cathcart-Prater una sobrepredicción, sin embargo, el error relativo entre el cálculo y las mediciones están dentro del rango de validez de correlación.

EXPERIMENTO B9R

El experimento B9R estaba dedicado al estudio del comportamiento del haz de barras de combustible entre 1.300 y 2.150 K, con una oxidación dominante (>50%) y un estudio posterior del efecto de un enfriamiento rápido (>10 K/s) por vapor.

Se programó este experimento con características generales similares a las de la B9, salvo la fase final de enfriamiento. Debido a incidentes de operación, se realizó este experimento en dos partes independientes:

- La primera parte, B9R1, es similar a la B9 desde 550 hasta 1.800 K. Se realizó un enfriamiento lento al final de esta parte.
- La segunda parte, B9R2, permitió obtener una alta velocidad de oxidación y temperaturas altas (2.150 K). Se llevó a cabo la parte inicial de B9R2 (hasta 1.300 K) con He para

T I EXPERIMENTOS PHEBUS-CSD				
Prueba	Fenómenos dominantes	Presión	Temp. máx. comb.	Otras condiciones de prueba
B9 Dic. 1986	— Alta oxidación del revestimiento — Criterios de aquebradización bajo un enfriamiento lento	Baja	— Alta velocidad de flujo vapor 2.150 K	— Velocidades bajas de calentamiento
C3 Oct. 1987	— Disolución de UO_2 por zircaloy sólida — Interacción de rejilla separadora Zr/inconel	Alta 3,0 MPa	2.000 K	— Nivel muy bajo de oxidación — Velocidad baja de flujo de masa H_2 — Enfriamiento lento
B9R 1 abril 1988 14 abril 1988	— Alta oxidación del revestimiento — Enfriamiento rápido por vapor	Baja 0,5 MPa	— Prueba realizada en dos partes independientes 2.150 K	— 1.ª parte: similar a B9 — 2.ª parte: flujo de He hasta 1.300 K, luego baja velocidad de flujo de vapor
C3+ Nov. 1988	— Disolución de UO_2 por Zr sólido y fundido — Fundición importante y reubicación	Alta 3,5 MPa	— Bajo nivel de oxidación para impedir interacción de Zr/inconel 2.600 K	— Fase de calentamiento en He — Enfriamiento final lento en He
B9+	— Oxidación variable con elevación — Disolución de UO_2 y ZrO_2 — Reubicación de material fundido	Media	2.750 K	— Fase de oxidación hasta 2.200 K — Fase de calentamiento y enfriamiento final lento en He — Rejillas de inconel
AIC Junio 1989	— Modalidad de ruptura de barras AIC — Efecto de AIC en degradación del núcleo	Baja 0,6 MPa	2.000 K	— Nivel de oxidación medio — Enfriamiento final lento en He — Rejillas de zircaloy

impedir la oxidación durante esta fase, y luego se pasó de He a H_2O . En dicha fase se observó una intensificación de la reacción de vapor-zircaloy (velocidad de calentamiento, unos 20 K/s hasta 1.800 K). Luego se produjo un incidente de operación (parada de emergencia-scram) y se puso a cero la potencia nuclear. Después, se volvió a aumentar la potencia nuclear para obtener una temperatura máxima de 2.150 K y, por último, se llevó a cabo un enfriamiento final (10 K/s).

El experimento B9R1 es similar al expe-

rimento B9, y demuestra la buena reproducibilidad de los experimentos PHEBUS-CSD. El código ICARE permite un cálculo óptimo del comportamiento térmico del haz, teniendo en cuenta la contaminación por hidrógeno del envoltorio. La oxidación de las vainas alcanzó más o menos el 50% en la zona caliente. Está bien calculado el comportamiento térmico en B9R2, hasta que se produce la subida imprevista y no calculada de temperaturas al nivel caliente, al inyectar vapor. Se han realizado cálculos de sensibilidad para explicar esta subida: oxidación de la vaina no sólo en la cara exterior, sino en dos caras; modelación

de canales múltiples; efecto de deformación de la vaina en la oxidación para las deformaciones correspondientes al contacto entre barras adyacentes (aproximadamente el 30%). Ninguno de estos parámetros llega a explicar totalmente la subida, pero una deformación más acusada, tal como se evidenció en exámenes pospruebas, probablemente sería una de las razones más importantes de esta subida.

En los niveles inferiores, donde no se encontró tanta deformación de las vainas, el código ICARE permitió un cálculo óptimo del aumento de la temperatura de las vainas debido a la oxidación durante la inyección de vapor.

Los exámenes posirradiación (PTE) han demostrado una fragmentación importante de las vainas fragilizadas en la zona que evoluciona más allá de los criterios ECCS para temperatura y oxidación máximas. Se produjo una pérdida total de la geometría de barras de combustible en la proximidad de la rejilla separadora superior, seguido por la reubicación de escombros sueltos conforme se iba reduciendo la potencia del haz, enfriándose rápidamente el mismo. Estaban completamente oxidados los escombros residuales de la zona superior de las vainas, y se encontró un bloqueo importante del flujo, debido al lecho de escombros y a las deformaciones "en flor" producidas en medio del haz.

En este experimento B9R se consiguieron resultados claves para las barras altamente oxidadas, en cuanto a deformaciones de las vainas, sin efecto de diferencias de presión, criterios de fragilización y características de un lecho de escombros formado por la fragmentación (tamaños de partículas, porosidades, relación de volumen "stub" de partícula a componente).

Las pruebas analíticas realizadas fuera de pila para estudiar la fragilización de las vainas oxidadas servirán para completar los resultados B9 y B9R en estos campos.

Se utilizarán estos datos para desarrollar el código ICARE, que actualmente no permite la modelación de las deformaciones de la vaina y el lecho de escombros formado por la fragmentación. Los criterios de fragilización y los modelos de agrietamiento de la vaina de las barras serán valorados a partir de dichos resultados experimentales.

EXPERIMENTO C3

Para este segundo experimento, el escenario de referencia es una pérdida total y prolongada del agua de alimentación del generador de vapor, así que las características principales de esta situación son un alto nivel de presión con colapsamiento de la vaina combustible, una baja velocidad de flujo de la masa

de vapor, ocasionando una baja velocidad de oxidación, y un alto contenido de hidrógeno.

El fenómeno previsto es una interacción de materiales con formación consiguiente de compuestos líquidos:

- Interacción entre UO_2 y el zircaloy sólido de las vainas (análisis de la posible formación de un compuesto líquido U-Zr y el efecto de un bajo contenido de oxígeno del circonio en dicha formación).
- Interacción entre los materiales de la rejilla (inconel) y la vaina.

Durante el experimento, la presión oscilaba alrededor de los 3 MPa y se suministraba el elemento con hidrógeno a una velocidad muy baja de flujo de masa (aproximadamente $0,02 \times 10^{-3}$ kg/s). Se ajustó la potencia lineal (aproximadamente 700 W/m.) para estabilizar la temperatura máxima, 200 K, por debajo del punto de fusión de zircaloy alfa durante 45 m.

Se advirtió un aumento acusado de la velocidad de calentamiento, desde 900 hasta 1.400 K (de 20 a 30 K/s comparados con unos 3 K/s debidos a la energía nuclear), a principios de la fase de calentamiento. Este fenómeno iba asociado a una reducción de la presión, y se debía a una hidruración de las vainas de zircaloy. En este momento, las vainas utilizadas para la prueba C3 no estaban oxidadas.

PTE han demostrado una fuerte interacción entre las rejillas separadoras de inconel y la vaina de zircaloy, con una reubicación total de la mezcla Zr-inconel cerca del fondo del haz. La interacción de los granos de combustible con el revestimiento de zircaloy sólido, bien mantenidos en contacto durante 3.000 s, se produjo en la parte caliente del haz (1.800-2.000 K), dando lugar a una interacción limitada con fusión local de la aleación U-Zr.

La hidruración de las vainas de Zr ha dado lugar a un aumento importante de la velocidad de calentamiento, debido a su reacción exotérmica. Este fenómeno, que no se modeló en el código ICARE, es simulado mediante una adición de más energía nuclear definida por la utilización del modelo de regulación automática de potencia del código.

Durante la fase de alta temperatura del transitorio, el código subprecide en 45 K la alta diferencia imprevista de temperaturas medidas entre las barras centrales y exteriores (125 K). Ninguno de los estudios de sensibilidad realizados sobre la modelización del haz o sobre los modelos de convección y radiación pueden explicar esta discrepancia. Dos efectos dimensionales indicados por medidas de temperatura han sido probados con el código TRAC, lo que da un ligero flujo de conexión libre, pero no prevé la diferencia entre temperaturas medidas.

EXPERIMENTO C3+

Esta fase es una continuación del experimento C3, pero prolongando la fase de calentamiento hasta 2.600 K para poder cumplir los objetivos principales, que son el estudio de la disolución de UO_2 por el Zr sólido y luego líquido del revestimiento, y la posterior investigación de la reubicación y resolidificación de la mezcla U-O-Zr resultante.

El experimento consta de cuatro fases. La primera fase de oxidación realizada con vapor puro (0,345 g/s) a 0,61 MPa permite alcanzar la temperatura de vaina objetivo en 3.000 s ($T_{\text{MAX}} = 1.473$ K), evitando una subida de temperatura. Durante la segunda fase de calentamiento se cambió el flujo de gas de vapor a He (0,45 g/s durante 900 s reducidos a 0,07 s en 100 s), se aumentó la presión a 3,5 MPa para obtener un buen contacto de UO_2 -Zr y se disminuyó la potencia para bajar la temperatura de las barras a 1.073 K. La tercera y principal fase de calentamiento, que duró 7.000 s, permitió aumentar de forma escalonada la temperatura de vaina hasta 2.600 K, mediante varios aumentos escalonados de la potencia. La fase final permitió un enfriamiento muy lento del haz por reducciones escalonadas de la energía nuclear para poder conservar intacta la geometría de estado final de la fase anterior.

PTE han demostrado la fusión de las dos rejillas separadoras y la resolidificación de la mezcla correspondiente de Zr-inconel de 40 a 70 mm. por debajo de la columna fisible de las barras.

Se ha encontrado un segundo tapón importante con un bloqueo de flujo equivalente (70%) al nivel justo por debajo de la rejilla inferior. Este tapón, en forma de crisol, es claramente una consecuencia de la fusión del metal Zr no reaccionante y de las aleaciones procedentes de la disolución de UO_2 . Está cubierto por un lecho de escombros de 150 mm. de espesor compuesto principalmente de granos de combustible.

Durante la fase de oxidación se ajustó la resistencia térmica del envoltorio en el cálculo de ICARE (mediante la contaminación por H_2 del ZrO_2 poroso), para obtener un comportamiento térmico del tren de pruebas de acuerdo con las mediciones. Se prevé una oxidación máxima del revestimiento (espesor de $120 \mu\text{m}$ del ZrO_2) justo por debajo de la rejilla superior, con una disminución rápida, hasta $40 \mu\text{m}$, de la rejilla inferior. No parece suficiente el espesor de la capa de ZrO_2 para evitar la interacción eutéctica entre Zr e inconel, cuya fusión a 1.500 K fue detectada mediante mediciones de temperatura. La producción calculada de H_2 es dos veces la medida, pero actualmente no se explica esta discrepancia. Se analizan distintas razo-

nes, tal como efectos de apantallamiento de la vaina.

Durante la fase de calentamiento, se pronosticó correctamente el comportamiento térmico del tren de pruebas utilizando la conductividad real del ZrO_2 poroso relleno con He. Mediante el modelo Hofmann, se calculó una disolución débil del combustible por Zr sólido. La mayor parte del revestimiento se transformó en α -Zr(O), siendo el espesor máximo de U-Zr el 8% del revestimiento inicial, con una composición de U-Zr del 97% U(Wt).

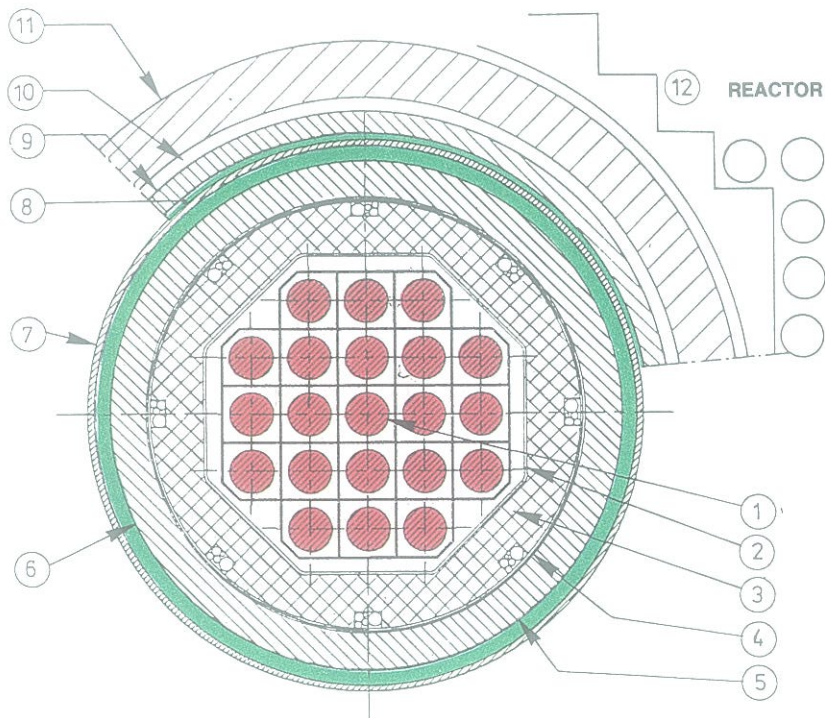
Se han utilizado los tres modelos de ICARE para calcular la disolución de UO_2 por Zr fundido: el diagrama de Politis-Skokan, el modelo de difusión de Hofmann y un modelo de convección controlada de Kim y Olander. La mezcla líquida de U-O-Zr resultante se mantiene en su sitio hasta que falle el ZrO_2 protector cuando supera una temperatura de reubicación especificada por usuario. Cuando se escoge este criterio a $5^\circ K$ por encima de la temperatura de fusión de α -Zr(O), los tres modelos dan resultados similares, con el 10% (Wt) de UO_2 disuelto entre las dos rejillas separadoras. Este resultado está conforme con los PTE, que demuestran una disolución de combustible limitada entre el 5 y el 10%, en función de la elevación. El espesor de la capa de óxido que puede mantener en su sitio el Zr fundido debería ser lo suficientemente bajo para impedir una reubicación descendente adelantada de la mezcla de U-O-Zr y un período largo de disolución.

Por falta de un modelo de rejilla en ICARE, no se puede calcular la interacción de Zr con inconel. Se ha calculado que todo el Zr y las mezclas U-Zr de las vainas y del forro del envoltorio, situado entre las dos rejillas separadoras, estarán fundidos y reubicados (tal como se indica en los PTE) durante la última fase más caliente. Este resultado está correctamente previsto por el código ICARE, sin embargo, se ha pronosticado la situación del tapón a unos 35 mm. por debajo de la situación real indicada por los PTE.

EXPERIMENTO B9+

Este experimento constituye una continuación del experimento B9, pero prolongando la fase de calentamiento encima de los 2.150 K hasta más allá de la temperatura de fusión de Zr y parando antes de la temperatura de fusión de ZrO_2 .

El objetivo del experimento consistía en estudiar los siguientes fenómenos principales que se producen durante accidentes CSD de un PWR: la oxidación de



REACTOR				
	DESIGNACION (materiales)	Radio int. (mm.)	Radio ext. (mm.)	Espesor (mm.)
Lazo de agua presurizada del dispositivo experimental	1. Haz experimental de 21 barras: UO_2 , Zr, vap H_2O , H_2			
	2. Tubo octogonal: zircaloy			0,60
	3. Aislamiento térmico: ZrO_2 poroso	47,00		
	4. "Schoop" de ZrO_2 denso	47,00	48,00	1,00
	5. Tubo del dispositivo experimental inoxidable	48,00	56,00	8,00
	6. Agua presurizada: $-H_2O$, 80 b, $280^\circ C$	56,00	9,25	3,25
	7. Pantalla: acero de boro	59,25	60,75	1,50
	8. Agua presurizada: $-H_2O$, 80 b, $280^\circ C$	60,75	62,00	1,25
Célula en pila no modificada	9. Tubo de presión de inconel	62,00	67,00	
	10. Vacío	67,00	70,00	3,00
	11. Tubo de seguridad de zircaloy	70,00	82,00	12,00
Reactor	12. No modificado			

F IV Configuración radial básica.

las vainas; el comportamiento mecánico de las vainas con una capa de circonia de espesor variable, que contiene zircaloy fundido, disolución de UO_2 y ZrO_2 por zircaloy fundido, y reubicación de la mezcla fundida.

Puesto que todos estos fenómenos son críticos para valorar los códigos y para sugerir las restantes áreas de incertidumbre fenomenológica, este experimento ha sido seleccionado para ser un Problema Estándar OCDE/CSNI, el ISP28 (Refs. 3 y 4).

En la primera fase de oxidación, que duró 8.000 s, se le alimentó con un flujo de vapor puro, permitiéndola alcanzar un perfil axial de ZrO_2 en la vaina desde un porcentaje bajo en la parte inferior hasta 100% en la parte superior del haz de 21 barras. Se aumentó la temperatura de las vainas de forma escalonada hasta 1.800° K. En la segunda fase de calentamiento, realizada con un flujo de helio puro, los siguientes aumentos escalonados de potencia permitieron alcanzar una temperatura máxima de barras de 2.700 K. La fase final permitió un enfriamiento lento del haz mediante reducciones escalonadas de la potencia nuclear, para conservar intacta la geometría del estado final de la fase anterior.

Los PTE han demostrado que se han cumplido los objetivos principales de esta prueba. Se ha fundido una gran cantidad de material del núcleo, pero en conjunto se ha conservado intacta la geometría de las columnas fisibles.

Francia y España (Consorcio PHEBUS) han acordado una participación conjunta en el ISP28 con el código ICARE. En los informes de especificación (Refs. 3 y 4) se describen en detalle las condiciones experimentales y el comportamiento térmico del elemento experimental (parte abierta del ISP28).

Se han realizado cálculos preliminares de sensibilidad con ICARE sobre la modelización del envoltorio. Una modelización detallada de la geometría real del envoltorio no incide de forma significativa en el comportamiento térmico, pero la conductividad del ZrO_2 poroso, que depende mucho de la porosidad y del gas de relleno, es un parámetro muy sensible.

Para el experimento B9+ se le alimentó al ZrO_2 poroso del envoltorio con He durante toda la fase de oxidación, para evitar un aumento de la conductividad, debido a la contaminación del ZrO_2 poroso por H_2 , liberado de la oxidación del forro de Zr.

Para los participantes cuyo código no puede describir el aislante complejo del envoltorio PHEBUS se han definido las condiciones térmicas límites en el forro interior del envoltorio. Estas condiciones han sido dadas por un cálculo ICARE de la mejor estimación del comportamiento térmico del tren de pruebas, realizado con una modelización detallada del en-

voltorio con ajuste de las propiedades térmicas.

Se analizarán los aspectos fenomenológicos de daño severo de este experimento dentro del marco del ISP28.

EXPERIMENTO AIC

Este experimento, que ha sido el último del programa PHEBUS-CSD, tenía como objetivo estudiar el proceso de degradación de las barras de control, y sus repercusiones en la degradación de las barras de combustible cercanas, en caso de situaciones de baja presión.

Se utilizó solamente una barra de control, situándola en el centro del haz. Durante la prueba existía un nivel de presión de unos 0,7 MPa, con una velocidad de flujo de la masa de vapor de 2×10^{-3} kg/s, a la temperatura de entrada de 550 K. Se reguló la potencia nuclear para seguir las velocidades de calentamiento especificadas hasta la temperatura máxima adecuada de 2.000 K. El enfriamiento antes de la fusión del zircaloy se realizó con He a una velocidad de 1 a 3 K/s.

Se produjo la degradación de la barra de control a unos 1.700 K, cerca del punto de fusión de acero inoxidable, induciendo un gran taponamiento del filtro de salida por aerosoles de cadmio y una perturbación rápida de la potencia del núcleo conductor, debido al desplazamiento de la aleación AIC. Se calcula que un 25% aproximadamente de la aleación AIC fue expulsado de la barra de control.

En estos momentos, los PTE están en curso. Los primeros exámenes visuales de las secciones transversales del haz demuestran que, en conjunto, se ha conservado intacta la geometría del mismo. Se han observado interacciones químicas locales y limitadas entre la barra de control y las barras de combustible adyacentes.

Se han observado a distintas elevaciones todos los primeros estados importantes de la degradación de la barra de control; por ejemplo, fusión del acero inoxidable (SS), flujo descendente en el hueco entre los dos tubos, disolución del Zr del tubo guía por AIC, ruptura del resto de la capa exterior de ZrO_2 y reubicación de la mezcla fundida de AIC-SS-Zr en el canal de flujo.

Está actualmente en curso el análisis de este experimento con el código ICARE. El carácter analítico del experimento AIC permitirá mejorar y calibrar el modelo AIC del código.

CONCLUSIONES

Los seis experimentos de la parte CSD del programa PHEBUS terminaron en el año 1989, estando en curso el análisis de cada uno de ellos. Quedan por

realizar los PTE para el experimento C3+, y sobre todo para los experimentos B9+ y AIC. Todos estos esfuerzos han permitido la elaboración de una base de datos importante para comprender mejor los procesos principales asociados con los accidentes con daños severos al núcleo, con excepción de la liberación de productos de fisión (FP). Esta fuente tan importante de la base de datos, que se utiliza mucho para el desarrollo y verificación del código ICARE, también ha sido incorporada, por razones del ISP28 o algunos acuerdos bilaterales con países u organizaciones extranjeras, como España, Alemania, Japón o Ispra, en la matriz de validación de códigos como MELCOR, SCDAP, RELAP5/SCDAP, KESS y ATHLET-SA.

El alcance de los procesos y condiciones de accidentes en el programa PHEBUS se completará en el futuro con el proyecto PHEBUS-FP, particularmente en lo que se refiere al área de gran incertidumbre, que es la de la liberación de FP y los fenómenos de degradación con combustible irradiado. En este nuevo programa se ampliará la base de datos del SFD para incluir condiciones más severas de degradación, hasta la fusión de UO_2 , con una matriz experimental que consta de otros seis experimentos más globales.

REFERENCIAS

1. M. BERNE, C. GRANDJEAN, E. SCOTT DE MARTINVILLE y G. GONNIER. "Investigaciones dentro de pila en la instalación PHEBUS sobre el comportamiento de haces de barras de combustible del tipo PWR bajo condiciones de accidente severo que sobrepasan los criterios de diseño". SFEN, NUCSAFE 88 (2-7 octubre 1988). Avignon.
2. A. PORRACCHIA, C. GRANDJEAN, A. MAILLIAT, P. CHATELARD y B. BRUN. "ICARE: Un código de ordenador para análisis de daños severos al combustible. Desarrollo de modelos para la primera versión, ICARE 1". SFEN, NUCSAFE 88 (2-7 octubre 1988). Avignon.
3. C. GRANDJEAN y C. GONNIER. "Especificaciones preliminares para el Problema Estándar Internacional ISP28". Informe PHEBUS-CSD, CEA/IPSNI/DERS, 112/90.
4. B. ADROGUER. "Problema Estándar Internacional ISP28. Prueba B9+ de SFD PHEBUS. Especificaciones finales para cálculos e informe de resultados". Informe PHEBUS-CSD, CEA/IPSNI/DERS, 115/90.