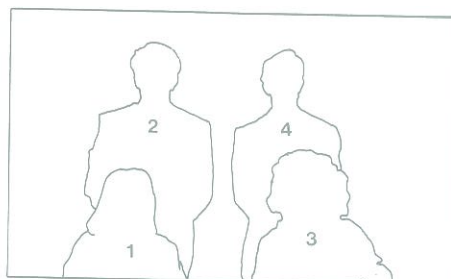


FENOMENOLOGIA DE DEGRADACION DEL NUCLEO. COMPARACION CON UNA SIMULACION PREDICTIVA PARA UN PWR COMERCIAL

R. ARROYO - J. A. MARTINEZ - C. VICENTE - P. VILLALIBRE



En la elaboración de este artículo han participado: 1) Rosario Arroyo (UNION-FENOSA); 2) José Angel Martínez (CSN); 3) Carmen Vicente (CIEMAT) y Palmiro Villalibre (CSN).



INTRODUCCION

Después de un accidente en un reactor LWR, si los sistemas de mitigación fallan, el núcleo se descubrirá y comenzará el calentamiento de las barras de combustible. Se inicia entonces la fenomenología propia de un accidente severo, la cual puede incluir los siguientes procesos:

Oxidación de las vainas de Zircaloy y de los elementos de acero inoxidable, y generación de gas Hidrógeno.

Sobrecalentamiento del núcleo conducente a interacciones químicas y a la licuefacción de los distintos materiales que lo forman.

Recolocación de los materiales líquidos hacia la parte inferior del núcleo y formación de taponamientos de materiales resolidificados.

Transferencia de energía por circulación natural, en sistemas PWR a alta presión hacia otras partes del sistema primario. Interacción de los materiales líquidos con el plenum inferior y fallo potencial de la vasija del reactor.

Toda la fenomenología anterior se produce en el interior del sistema primario y supone el punto de partida para la definición de las cargas que actuarán sobre el recinto de contención en el

transcurso del accidente severo, si los materiales del núcleo son proyectados fuera de la vasija del reactor o se produce transferencia de energía por circulación natural que provoque el fallo de otros componentes del sistema primario.

Por tanto, es fundamental el conocimiento y cuantificación de esta fenomenología mediante la realización de experimentos que reproduzcan, con la mayor fidelidad posible, las condiciones de en las que se encontrará el combustible nuclear en el transcurso de un accidente severo. Los experimentos tienen un doble objetivo: descubrir procesos de degradación que no eran conocidos y obtener una base de datos cuantitativa que permita la contrastación de los modelos de cálculo disponibles en los códigos de análisis del accidente severo.

Phebus-CSD es un programa experimental "in-pile" cuyos objetivos han sido descritos en otros artículos, y que consta de un abanico de experimentos que pretenden cubrir gran parte de la fenomenología responsable de los procesos de degradación del combustible de un reactor PWR. Este artículo describe sucintamente estos procesos, y analiza los resultados disponibles.

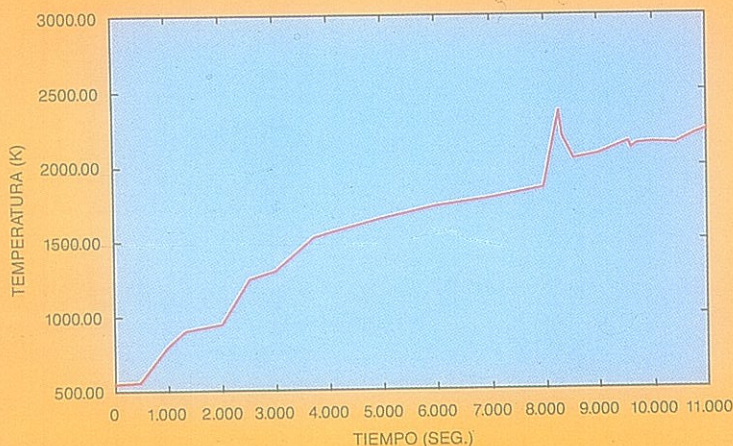
OXIDACION DE LAS VAINAS DEL COMBUSTIBLE Y BARRAS DE CONTROL

Entre el Zircaloy-4 y el vapor de agua se produce una reacción de oxidación fuertemente exotérmica y con producción de hidrógeno, que se hace especialmente notoria a temperaturas superiores a 900° C, modificando las propiedades térmicas y mecánicas del material metálico.



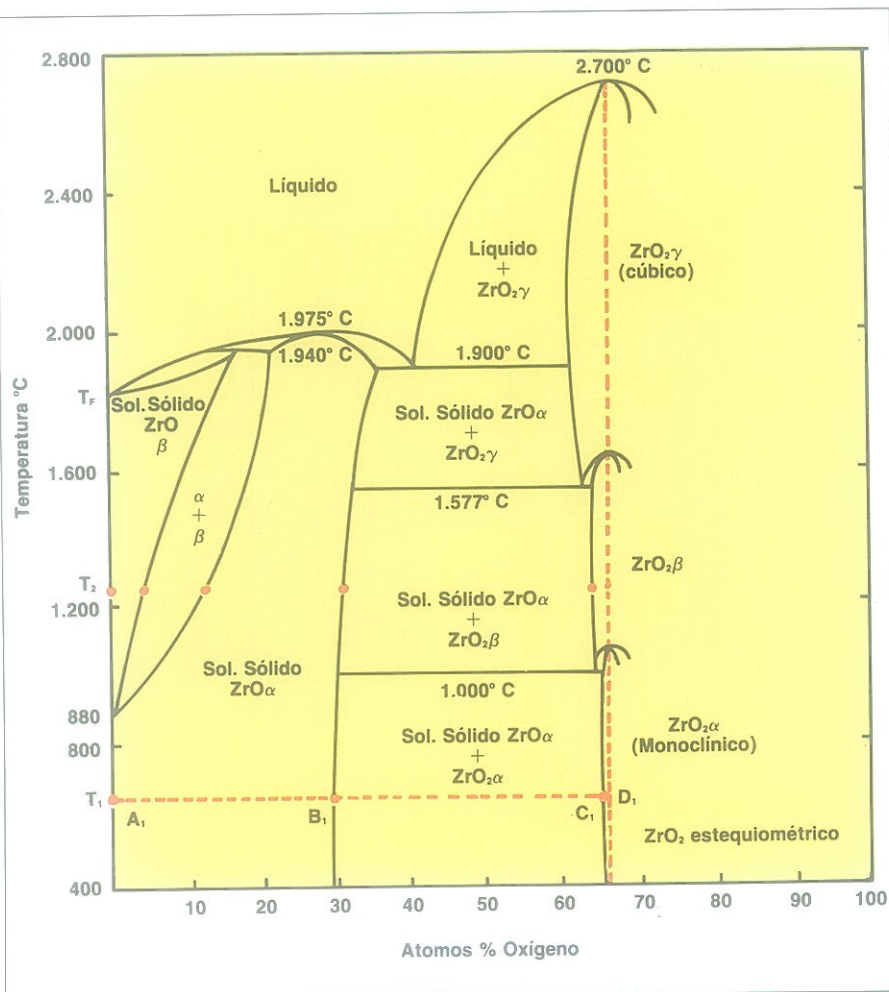
A temperaturas cercanas a los 1.550° C tiene lugar una aceleración brutal de la misma, pudiendo producirse picos de temperatura que causen la fusión de las vainas (fig. I).

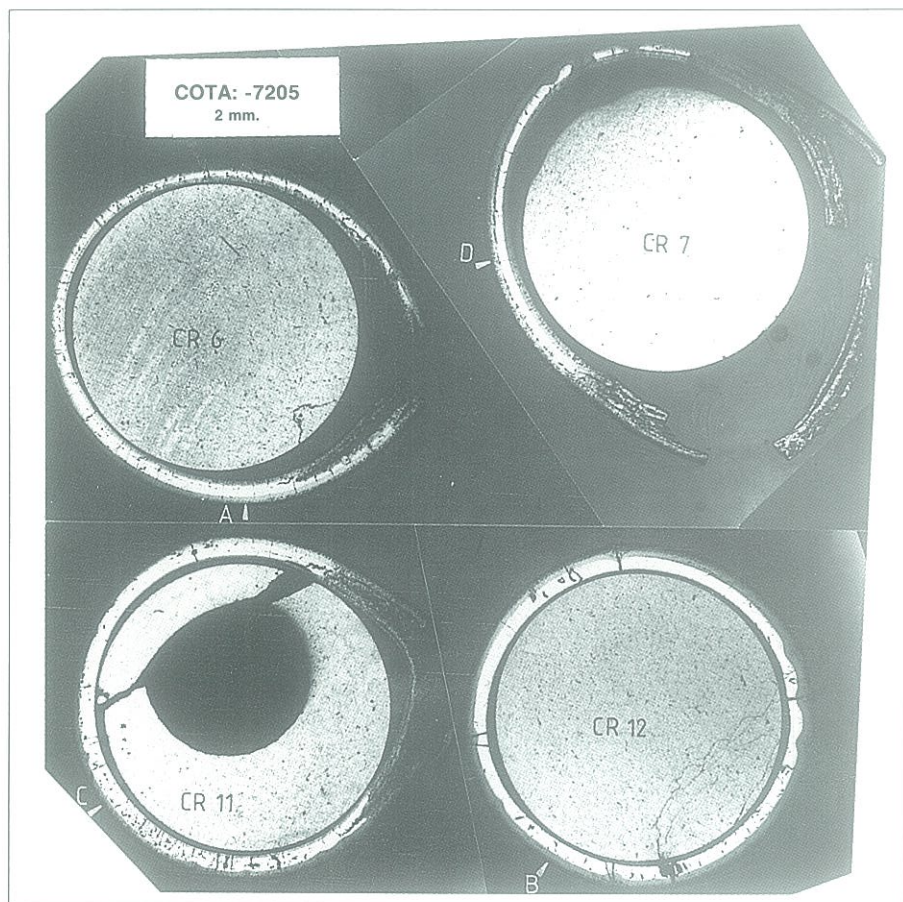
El mecanismo de reacción consiste en una quimiabsorción y disociación de las moléculas de agua por el metal caliente, con posterior difusión del oxígeno a través de las lagunas aniónicas que presenta el metal, cuyo número es función de la temperatura. En la masa gaseosa que rodea la vaina del Zircaloy se produce una concentración del hidrógeno liberado junto a la pared, que diluirá el vapor de agua y causará un gradiente de concentraciones del mismo entre el centro del canal y la pared.



F I Temperatura del combustible B9+.

F II Diagrama de estado Zircorium-Oxígeno.





F III PHEBUS 2101

Durante el proceso de oxidación se producen cambios en la composición y estructura del metal que resume el diagrama de fases de Levin & McMurdie (fig. II). A medida que el metal absorbe oxígeno pueden aparecer dos estados de oxidación denominados fases alfa y beta, además del óxido, ZrO_2 . La solubilidad de oxígeno en cada fase depende de la temperatura, siendo su valor máximo del 13% para la fase beta y 33% para la alfa en fracción atómica, a temperaturas del orden de $1.850^\circ C$.

El ZrO_2 puede contener entre 33 y un 67% de oxígeno. Su estructura cristalina es monoclinica a bajas temperaturas y tetragonal hasta $1.550^\circ C$, a la cual comienza la transformación a cúbico. Puede observarse que el paso de un sistema a otro, en especial de tetragonal a cúbico, está asociado a un importante incremento de temperatura, cuando el óxido está saturado en oxígeno, que es el caso más general.

La temperatura de fusión de la fase beta es de 1.850 y $2.000^\circ C$ de la fase alfa y la del óxido es del orden de $2.700^\circ C$.

Es importante destacar que una débil oxidación del Zircaloy puede protegerle

de ser disuelto a temperaturas inferiores a su punto de fusión, al entrar en contacto con el acero o con el material absorbente en las barras de control, debido a la formación de eutécticos. En el primer caso, contacto acero-Zircaloy, la fusión de éste comienza a los $1.000^\circ C$ si no ha habido oxidación previa. En el segundo, contacto (Ag, In, Cd)-Zircaloy, a $1.250^\circ C$. Una fina capa de óxido puede evitar o retardar dichas interacciones.

CINETICA Y SIMULACION DE LA REACCION

En 1962 Baker y Just publicaron una ley de crecimiento de las capas de óxido de tipo Arrhenius, la cual ha sido mayoritariamente aceptada en criterios de licenciamiento, y que todavía sirve de comparación a los resultados más recientes. El crecimiento de las masas de ZrO_2 y alfa Zr obedece a las leyes parabólicas de tipo:

$$W^2 = K_p \cdot t$$

donde K_p es la constante dependiente de la temperatura que las diferencia, W es cualquiera de las anteriores masas y t es el tiempo. Para calcular K_p , BIEDERMAN, LEISTIKOV, CATHCART & PAWEL, URBANIC-HEIDRICK son algunas de las correlaciones más conocidas internacionalmente, que se han obtenido en diferentes experimentos de oxidación isoterma.

La figura IV ilustra la comparación de los resultados de las correlaciones más utilizadas actualmente, con la inicial de Baker & Just. Se observa que dicho criterio es bastante conservador a $T < 1.500^\circ C$ y realista después del embalamiento de la oxidación.

FENOMENOS MAS IMPORTANTES QUE PUEDEN INTERVENIR EN LA OXIDACION DEL ZIRCALOY

El proceso de oxidación está afectado por ciertas condiciones que intervienen en la cinética de la reacción. Las más importantes son las características de la atmósfera oxidante y del transitorio (velocidad de calentamiento).

- El crecimiento de las capas ricas en oxígeno es independiente de la concentración del vapor de agua en la mezcla refrigerante hasta un cierto valor crítico, situado a concentraciones muy bajas, que es función de la temperatura. Por debajo de él disminuye drásticamente la cinética de oxidación, formando únicamente óxidos heterogéneos y dilución de oxígeno en el metal.

Este fenómeno se conoce como agotamiento o "starvation" y hace necesaria la diferenciación en dos tipos de atmósfera oxidante: "vapor agotable" y "no agotable", según que la concentración del mismo pueda o no alcanzar dicho umbral.

- En transitorios con velocidades de calentamiento lentas y larga duración (varias horas), a temperaturas inferiores a $1.050^\circ C$ puede producirse un "escamado" de la capa externa de óxido, con posterior separación y caída. La reacción sufre una aceleración debido al aumento de la superficie expuesta, ya que la capa de óxido pierde capacidad de protección.

- Tras haber realizado experimentos a muy baja presión (≤ 1 Bar), algunos autores consideran que la acumulación de hidrógeno junto a la pared puede suponer una barrera a la oxidación. El fenómeno se reconoce como "blanketing", pero se produce solamente a muy altas concentraciones de H_2 en la pared de Zircaloy, superiores al 90%.

LA OXIDACION EN LOS TRANSITORIOS EXPERIMENTALES PHEBUS CSD

Los experimentos del Programa Phebus ha incluido fases de oxidación de características diferentes. El objeto de ello ha sido:

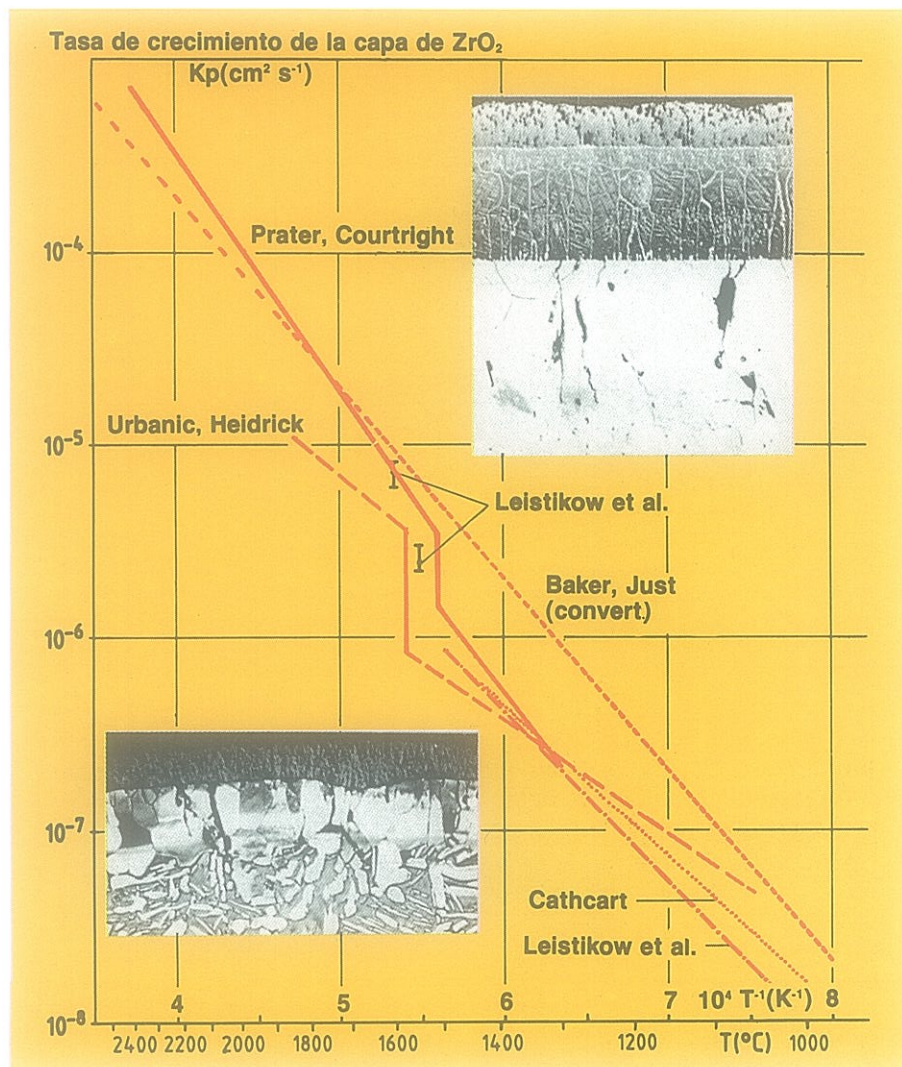
- Validar las leyes parabólicas disponibles frente a resultados de la oxidación realizada en distintos rangos de temperatura.
- Conocer el comportamiento del óxido a altas temperaturas, en presencia o no de Zircaloy fundido.
- Evaluar la protección que representa una capa de óxido en las vainas frente al ataque de estos por el inonel de las rejillas, y el material de control AIC.

En el artículo anterior, apartado 4.1 y 4.2 se han presentado algunos resultados obtenidos en dichos experimentos. Adicionalmente cabe destacar los siguiente:

- El Zircaloy sufre una fuerte expansión volumétrica tridimensional al ser oxidado, dando origen a tensiones entre la matriz metálica y las capas de óxido. Estas tensiones se ponen de manifiesto principalmente durante la refrigeración. El aumento de volumen de la vaina es del 50% cuando la oxidación es total. En la figura III se muestra un ejemplo típico de fisuración observado en el experimento B9, en la parte superior, zona más caliente.
- En los experimentos B9 y B9+, con oxidación previa importante superior a los 100 μm , se minimizan los efectos de la interacción con el inonel de las rejillas.
- En algunos experimentos en que la oxidación ha sido débil o muy débil se observa una reducción de la capa de óxido, o su desaparición, al final de los mismos. Cuando una fase de oxidación rápida es seguida de un transitorio lento en atmósfera neutra, puede tener lugar una "desoxidación" por difusión del oxígeno en sentido inverso, según ha podido confirmarse en otros experimentos de efectos separados.

INTERACCIONES ENTRE MATERIALES

El calentamiento del núcleo más allá de las bases de diseño del combustible



F IV Dependencia con la temperatura de la tasa de crecimiento de la capa de óxido formada en Zircaloy.

provoca determinadas interacciones entre sus componentes las cuales son responsables de la degradación de las propiedades mecánicas de los mismos. Estas interacciones son de tipo químico, definidas en los diagramas de fase binarios o ternarios en los que uno de los elementos suele ser el Zr, y producen habitualmente compuestos de tipo "eutéctico" cuyo punto de líquido está a una temperatura notablemente inferior a la del material original. Este fenómeno es responsable entonces de la pérdida prematura de integridad del componente y el inicio de la recolocación de los materiales del núcleo hacia la parte inferior del mismo a niveles de temperatura entre 1.000 y 2.000° C. Los tipos de interacciones más impor-

tantes encontrados en los experimentos realizados y en los análisis del reactor TMI-2 son:

- Interacción entre el Zr y el material de control AIC (Ag-In-Cd) fundido.
- Interacción entre el Zr y el Inonel de las rejillas espaciadoras.
- Interacción entre el Zr y el acero inoxidable de los tubos guía de las barras de control PWR.
- Interacción del B4C del material de control BWR con el acero inoxidable de las vainas y el canal de Zircaloy.
- Interacción del Zr sólido o líquido con el UO_2 .

Las interacciones estudiadas en los experimentos Phebus CSD corresponden a los reactores PWR, y son:

INTERACCION ENTRE COMBUSTIBLE Y ZIRCALOY SOLIDO

Este fenómeno ha sido observado en numerosos dispositivos experimentales (ref. 1) y consiste en la reducción química del UO_2 por el Zircaloy en fase beta. En el proceso se producen las siguientes capas metalúrgicas: una capa interna de Zircaloy alfa, una capa de aleación metálica (U Zr) y la capa externa de Zircaloy alfa. El crecimiento de las capas obedece a una ley de tipo parabólico cuyas constantes dependen de la temperatura y han sido determinadas por Hofmann (ref. 2). La reacción progresa hasta el agotamiento de la capa de Zircaloy beta libre de oxígeno. En estas condiciones la vaina está fragilizada y no es mecánicamente estable.

La aleación (U Zr) tiene un punto de fusión relativamente bajo, por lo que se produce su recolocación antes de alcanzar el punto de fusión del Zr. La reacción se inicia a partir de $800^\circ C$, y progresa siempre que se mantenga un buen contacto entre la pastilla de combustible y la vaina.

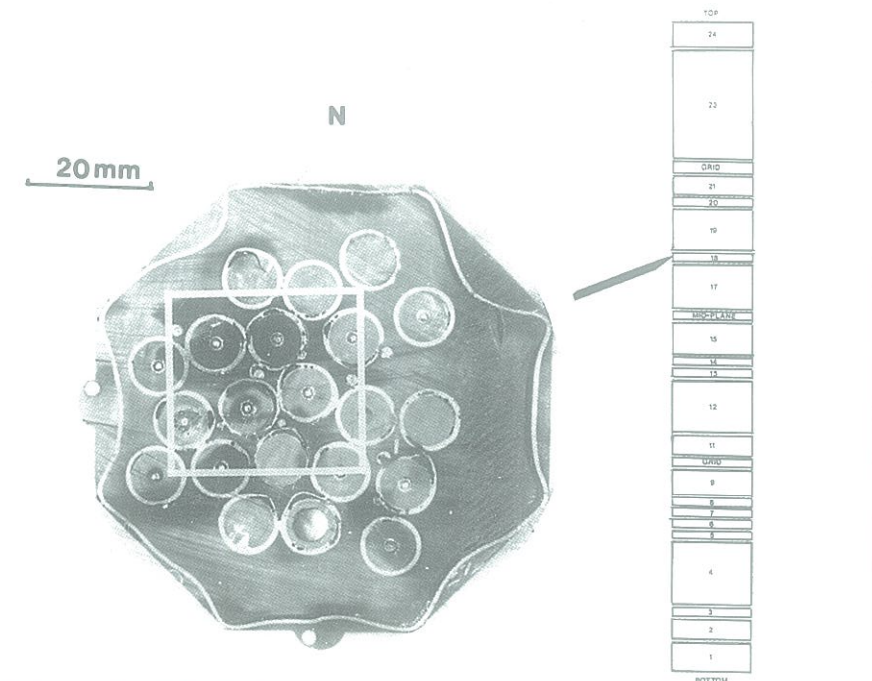
En el Programa Phebus CSD el fenómeno se ha estudiado en las experiencias C3 y C3+, donde se aplicó una presión externa suficientemente alta al exterior de la vaina con el fin de lograr un diferencial de presión superior a 10 bar, y un buen contacto pastilla-vaina.

En el experimento C3 se alcanzó una temperatura máxima de $1.750^\circ C$, que se mantuvo durante casi 2.000 seg. según los cálculos pre-test con objeto de obtener una capa de aleación (U, Zr) de al menos 0,1 mm. de espesor. Los exámenes post irradiación realizados a la vaina del conjunto experimental muestran que la interacción se ha producido, aunque de forma muy localizada en algunas zonas de la vaina, mientras que los experimentos "out-of-pile" muestran una interacción mucho más importante. En la figura V se aprecian los huecos dejados entre la pastilla y la vaina en las zonas donde se formó la aleación (U, Zr), la cual fundió y se recolocó a temperaturas relativamente bajas.

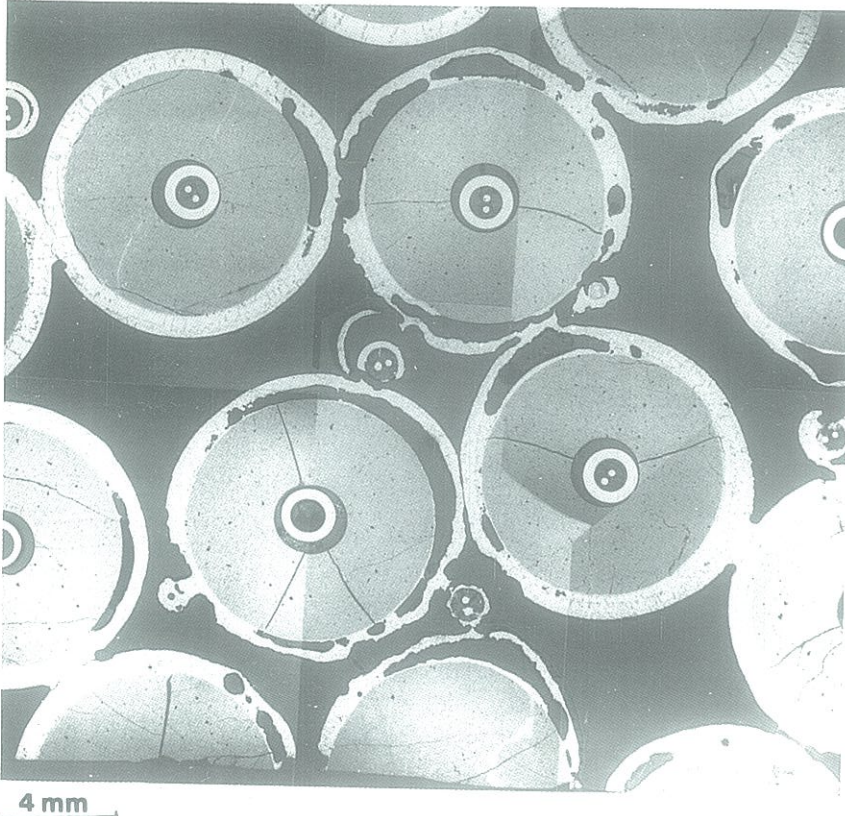
Las leyes parabólicas, utilizadas en códigos como ICARE para calcular este tipo de interacción, parecen excesivamente conservadoras en sus predicciones, en relación con la magnitud observada de la reacción.

INTERACCION ENTRE EL INCONEL DE LAS REJILLAS Y EL ZIRCALOY

Se ha observado que el Ni forma un compuesto eutéctico con el Zr a partir de $900^\circ C$, el cual es líquido a temperaturas por encima de $1.200^\circ C$, lo que supone



Interacción UO_2 -Zr. Las cavidades de la vaina indican las zonas de interacción (U, Zr). La aleación líquida (U, Zr) se ha recolocado.



el inicio de la licuefacción localizada en la parte de la vaina. El eutéctico líquido puede a su vez atacar a la pastilla de combustible adyacente y comenzar la disolución del UO_2 .

La fenomenología descrita se ha observado en los experimentos Phebus con un grado bajo de oxidación de la vaina antes de alcanzar altas temperaturas, es decir, en los experimentos C3 y C3+. La presencia de una capa inicial de óxido en la vaina puede retardar la reacción entre el Zr y el Ni. El espesor máximo calculado de óxido para el experimento C3+ fue de 0,120 mm., aunque este espesor posiblemente disminuyó durante la fase de calentamiento con He (ver apartado 2). La oxidación inicial del experimento C3 fue prácticamente nula. La figura VI muestra un corte del elemento experimental C3 a la altura de la rejilla superior, donde puede observarse la práctica desaparición de todo el material de vainas. La relocalización de materiales desde la zona de la rejilla superior ha producido arrastre de materiales en las zonas que se encuentran por debajo de dicha rejilla. La rejilla inferior también ha fundido y los materiales líquidos se han resolidificado en la zona inferior, más fría, del combustible.

En el experimento C3+ se observó una fenomenología similar, pero los materiales líquidos se resolidificaron fuera de la zona activa del combustible, en la zona cuya temperatura máxima estimada fue de 900° C.

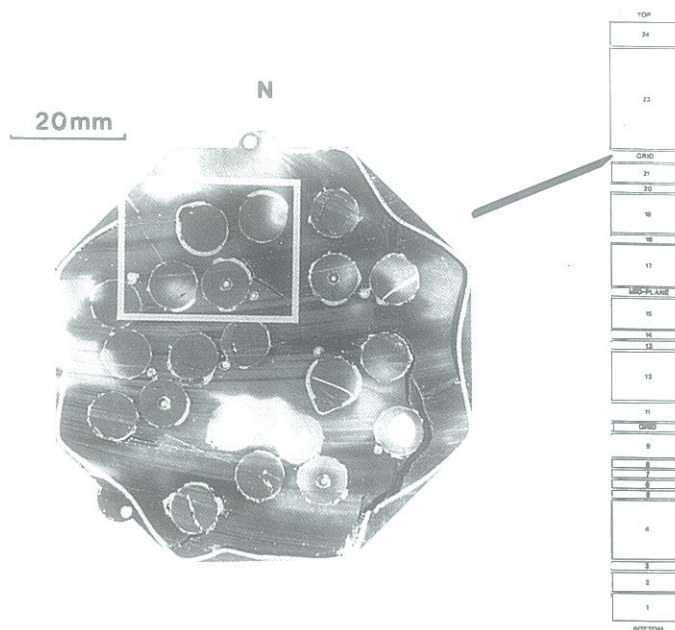
Actualmente, los códigos de análisis del accidente severo no disponen de modelos de cálculo de la reacción Zr-Ni ni de propiedades térmicas del compuesto formado.

DISOLUCION DEL UO_2 POR ZIRCALOY LIQUIDO

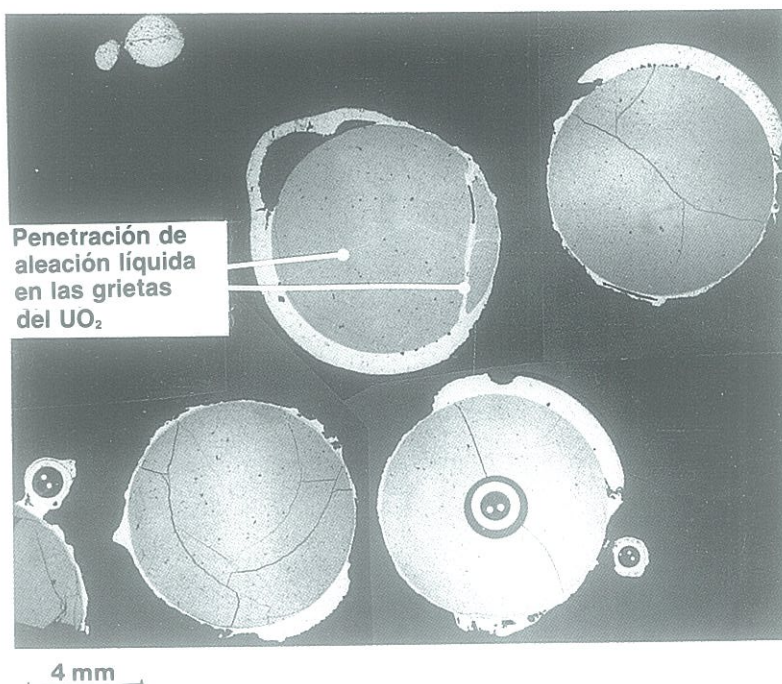
El Zr líquido en contacto con el UO_2 es capaz de reducirlo y producir una mezcla líquida cuya composición varía en función del tiempo de reacción y del contenido inicial en O del Zircaloy.

Actualmente existen la teoría de Kim-Olander, que explica la reacción (ref. 3) como un proceso de enriquecimiento en U de la mezcla fundida producido por convección natural, y la teoría de Hofmann (ref. 4) que se basa en la difusión del O desde la pastilla de combustible hacia las diferentes capas de la mezcla fundida, cuyo crecimiento obedece a una ley de tipo parabólico, con coeficientes dados por una correlación tipo Arrhenius.

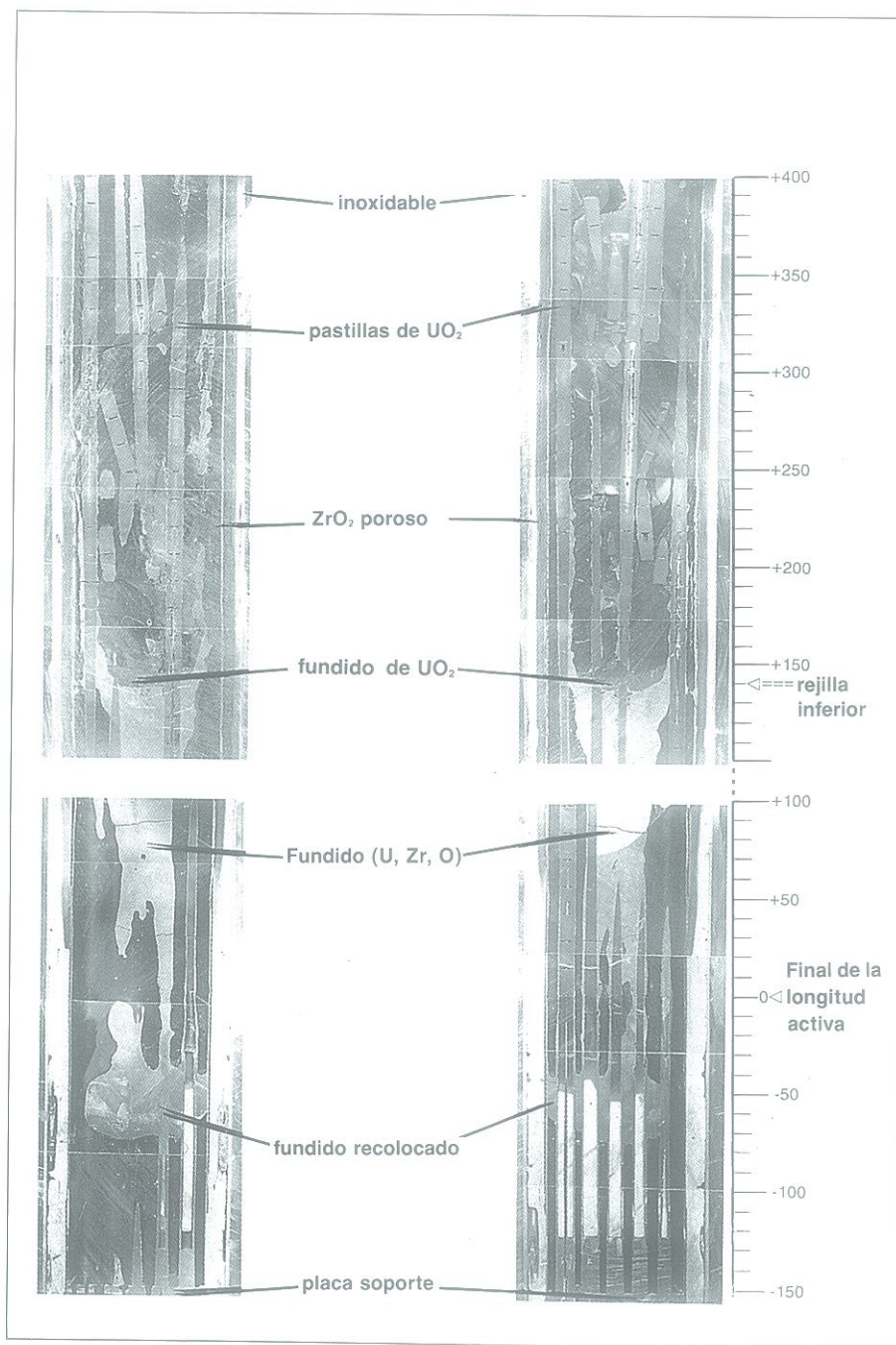
Se ha encontrado que si el contenido inicial en O del Zr es suficientemente alto y el tiempo de reacción superior a algunos minutos, se forma una mezcla



La vaina de Zircaloy es disuelta por contacto con el inconel fundido



MACROGRAPH LEVEL-7222 (32)



F VII Sección vertical de C3+

líquida U-Zr-O en contacto con la pastilla de UO_2 . Dicha pastilla se disgrega por la aparición de U líquido en los bordes de grano; por lo que la reacción avanza muy rápidamente.

El tiempo de reacción es el tiempo de contacto entre el Zr líquido y el UO_2 , que depende de la resistencia de la capa externa de óxido de Zr, ya que en el momento de la rotura del óxido la mezcla líquida U-Zr-O comienza a fluir y el

proceso de disolución de UO_2 termina. La mezcla U-Zr-O, líquida a temperatura de reacción, se resolidifica formando un compuesto cerámico $(U, Zr)O_2$ y fases metálicas como U-Zr y α -Zr. Por tanto, este fenómeno produce la licuefacción del combustible UO_2 a partir de temperaturas cercanas a $2.000^\circ C$, mucho antes de alcanzar el punto de fusión del UO_2 a $2.800^\circ C$. La mezcla líquida puede fluir y recolocarse, aportando calor residual

debido a los productos de fisión contenidos.

En los experimentos Phebus C3+ y B9+ se alcanzaron temperaturas por encima del punto de fusión del Zr y se ha observado disolución del UO_2 . Se estima que el contenido en O inicial del Zr en dichos experimentos era alto al llegar a la temperatura de fusión, debido a la oxidación inicial de B9+ y a la interacción entre la vaina y la pastilla de combustible en C3+. En este experimento el espesor máximo de la capa de óxido fue de 0,12 mm., por lo que el tiempo de contacto no debió ser prolongado, probablemente con rotura de la capa externa de óxido rápidamente después de producirse la fusión del Zr.

En el experimento C3+ se ha encontrado un taponamiento de material resolidificado proveniente de la interacción entre el Zr líquido y el UO_2 , cuya composición es fundamentalmente de $(U, Zr)O_2$ en forma cerámica. La proporción de UO_2 disuelto respecto de la masa original se ha calculado que oscila en torno al 10%, lo que está próximo a los valores de otros experimentos como LOFT PF-2.

En el experimento B9+ se obtuvieron espesores de óxido más elevados, por lo que el tiempo de contacto entre el UO₂ y el Zr líquido fue superior. Los resultados de análisis de la mezcla resolidificada en este experimento permitirán determinar la importancia del espesor inicial de la capa de óxido frente al porcentaje de combustible disuelto.

INTERACCIONES EN PRESENCIA DE MATERIAL DE CONTROL PWR (Ag-In-Cd)

Una barra de control estándar de un PWR se compone de una aleación de materiales absorbentes (80% de Ag, 15% de In y 5% de Cd), rodeada por una vaina de acero inoxidable situada en el interior de un tubo guía de zircaloy. Entre los materiales absorbentes y la vaina de acero existe un huelgo cuyo gas de llenado es aire, en los reactores comerciales y en algunas instalaciones experimentales. En otros experimentos se usa Helio como gas de llenado. El refrigerante circula entre la vaina y el tubo guía, en la operación normal.

Durante un transitorio accidental se alcanzan temperaturas elevadas, que pueden conducir al fallo de las barras de control. El factor determinante del modo de producirse dicho fallo es la presión del sistema (ref. 5).

Al aumentar la temperatura, el AIC (Ag-In-Cd) es el primer material que funde, a $780^\circ C$ y queda confinado en el interior de la vaina de acero, hasta que se produzca el fallo de la misma.

En los escenarios a baja presión, el fallo

de la barra de control se produce debido a una expansión térmica que provoca contacto físico e interacción química entre la vaina de acero inoxidable y el tubo guía de zircaloy, cuando se alcanza el límite elástico del primero (1.270° C). Dado que la presión del sistema es baja se produce una expulsión violenta del material de control fundido, debido a la alta presión de vapor del Cadmio, el más volátil de los elementos absorbentes. La Plata líquida, procedente de la aleación de control, ataca el zircaloy de las barras de combustible vecinas, produciendo su disolución y la interacción posible con el combustible.

Cuando la presión del sistema es elevada, la rotura de la barra de control se produce al alcanzar la temperatura de fusión del acero inoxidable, 1.400° C. La Plata contenida en la aleación absorbente fundida, ataca al zircaloy del tubo guía produciendo su disolución. La mezcla de materiales fundidos se desliza por el exterior de la barra de control hacia zonas próximas al pleno inferior.

La interacción entre el material AIC-Zr y el combustible representa una contribución importante en la formación de aerosoles, y en la modificación de la naturaleza de los productos de fisión.

Las mezclas del tipo AIC-Zr-SS, conteniendo o no combustible, pueden recolocarse y resolidificarse en zonas de menor temperatura, formando taponamientos en la parte inferior más fría del núcleo.

Dentro del proyecto PHEBUS CSD, el experimento AIC (ref. 6) simula un escenario experimental correspondiente a una secuencia accidental de tipo baja presión, y en el experimento se reproduce la evolución de la temperatura en una zona caliente del núcleo.

La presión del sistema fue suficientemente importante para impedir el hinchamiento de las vainas, pero no tan elevada que impida la expulsión de la aleación de control fundida.

Este experimento permite apreciar el efecto neutrónico debido a la pérdida de material de control en las zonas altas del elemento, y su relocalización en las zonas bajas del mismo. En la figura VIII se muestra la evolución de las temperaturas del combustible en función del tiempo para cada cota axial, y puede observarse el incremento de temperatura experimentado en los niveles superiores del elemento de combustible debido a la pérdida del material de control, especialmente en la cota +60 cm., nivel -7.300 mm., donde se produce el fallo de la barra de control, a una temperatura vecina de la fusión del acero inoxidable: 1.400° C.

La figura IX muestra el corte realizado en el elemento experimental AIC en la parte superior de la columna de combustible, donde puede apreciarse la fusión com-

pleta del material de control y de la vaina en acero. Se aprecia asimismo como una barra de combustible próxima presenta un fallo en la vaina debido a la proyección del material AIC-SS-Zr fundido, el cual ha roto la capa de ZrO_2 del tubo guía para interactuar con las barras adyacentes.

El material de control ha desaparecido en los 20 cm. superiores de la longitud activa, y se ha relocalizado en el huelgo entre el tubo guía y la vaina en acero, y en la superficie exterior del tubo guía. La geometría del elemento se ha conservado intacta y se observan solamente interacciones localizadas.

RECOLOCACION Y FORMACION DE TAPONES EN EL CANAL DE REFRIGERACION

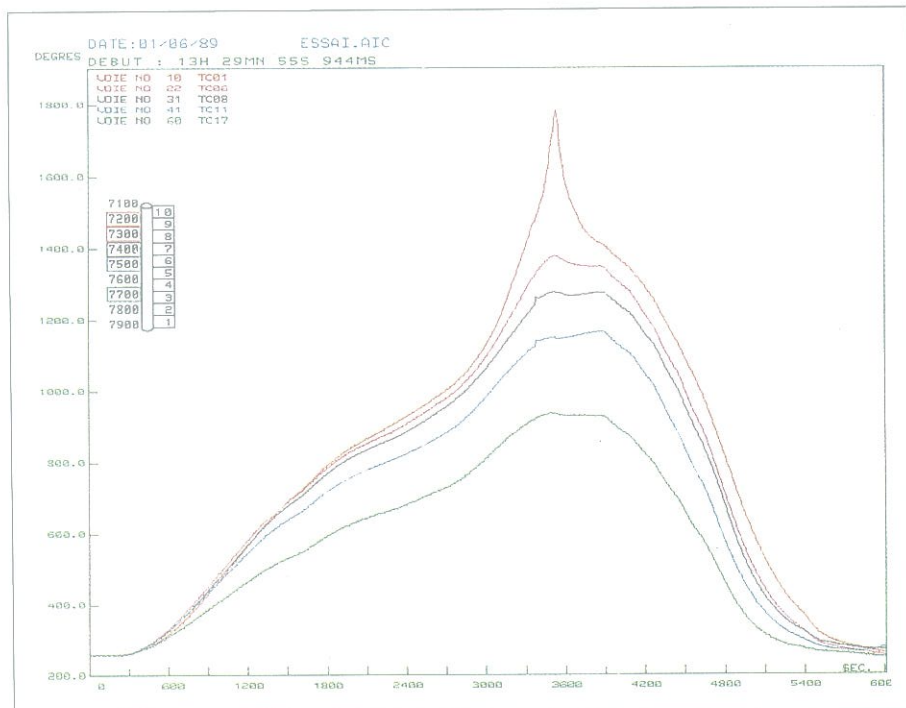
Los materiales fundidos se recolocan por gravedad y se resolidifican en las zonas inferiores más frías formando taponamientos que pueden obstruir el paso de refrigerante y acelerar el daño al núcleo. Si dichos materiales producen calor de desintegración, pueden producirse fusiones y recolocaciones sucesivas.

Los experimentos realizados y los análisis del reactor TMI-2 muestran que la recolocación se realiza sobre todo en forma de goteo o "rivulets" y que los taponam-

ientos se localizan preferentemente en la zona de las rejillas espaciadoras intactas, donde existe un foco frío más importante y un obstáculo al flujo de material fundido.

Las radiografías y análisis tipo microsonda realizados en el elemento experimental C3+ han puesto de manifiesto la disposición típica de taponamientos encontrada en otros experimentos con daño al núcleo: materiales metálicos, materiales cerámicos y "debris" procedente de la fragmentación de pastillas de UO_2 , desde la parte inferior a la superior. Los materiales metálicos procedentes de la formación de eutécticos entre el Zr y las rejillas de Inconel se situaron en las zonas más frías fuera de la longitud activa del combustible, ya que el perfil de potencia nuclear es relativamente plano en dicha zona activa. A la altura de la rejilla inferior se observa un importante taponamiento constituido por materiales cerámicos en su mayor parte, con temperatura de fusión elevada. Dicho taponamiento tiene forma de menisco con formación de un crisol o "crucible" en la zona central. En el centro de este menisco aparece una fase constituida por fragmentos o "debris" provenientes de la fragmentación de las pastillas de UO_2 y de las vainas de Zr oxidadas.

En la figura VII se muestra la estructura longitudinal de los taponamientos encontrados en el experimento C3+. Puede apreciarse el tapón superior a la cota



F VIII Medida de temperatura de las barras de combustible en el experimento AIC a diferentes cotas.

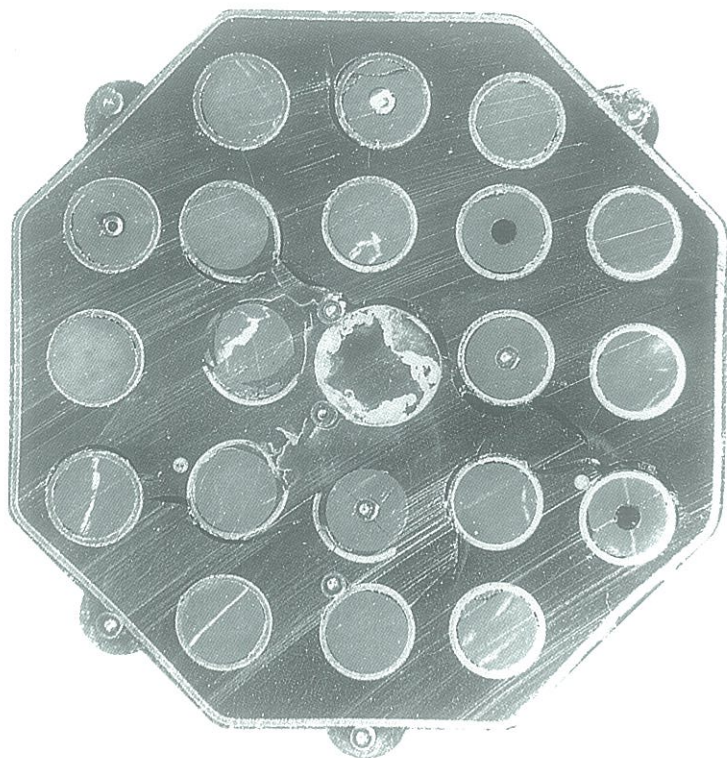


FIG 1A Experimento PHEBUS AIC nivel + 600 mm.

+139 mm. con bloqueo de hasta el 85% de la superficie de paso y el tapón inferior, con bloque del 70% de la superficie de paso, situado a la cota -50 mm. Encima del tapón superior existe una acumulación de pastillas de combustible procedente de la parte superior del elemento, y una fase más oscura constituida por "debris" de fragmentación.

COMPARACION CON UNA SIMULACION PREDICTIVA PARA UN PWR COMERCIAL

Para la simulación del daño severo en un PWR comercial, se ha tomado a C.N. CABRERA, de UNION-FENOSA, como reactor de referencia, de modo que el modelo del núcleo empleado y la termohidráulica asociada al daño severo se refiere lo más fielmente posible a la real de la planta mencionada.

Una vez analizadas las herramientas de cálculo disponibles se seleccionaron para este trabajo RELAP5/MOD2 desde el

punto de vista termohidráulico y SCDAP/ MOD1 para el análisis de daño severo al núcleo. La metodología de cálculo empleada ha sido, basándose siempre en datos y modelos realistas, analizar con RELAP5/MOD2 los escenarios desde el punto de vista termohidráulico hasta que las temperaturas de las vainas sean tan altas como para iniciarse el daño severo, que se ha estudiado con SCDAP/MOD1 con unas condiciones de contorno termohidráulicas extrapoladas de los resultados de RELAP5. El cálculo con el código de daño severo se desarrolla hasta alcanzar el momento de la fusión generalizada del combustible (en torno a 3.000. 0° C), es decir, el momento en que los modelos de "debris" son necesarios, terminando en ese punto la simulación. El modelo de núcleo empleado contempla tres barras de combustible, una barra de control y la envuelta o "shroud". Las barras de combustible simulan las zonas central, media y periférica del núcleo y tienen, por tanto, distintos factores de pico de potencia. Todos los componentes tienen 10 nodos axiales y distinto número de nodos radiales (6 para las barras de

combustible, 2 en la barra de control y 5 en el "shroud") y presentan distribuciones de potencia y factores de pico axiales y radiales constantes con el tiempo. También se simulan las 6 rejillas espaciadoras.

Los escenarios seleccionados para el análisis han sido tres: un LOCA grande (LBLOCA) sin inyección de seguridad, un LOCA pequeño (SBLOCA) sin inyección de seguridad y una pérdida total de agua de alimentación al generador de vapor, todos ellos sin actuación de los operadores, que corresponden a la termohidráulica postulada para el experimento AIC y las series B y C de experimentos PHEBUS, respectivamente. Respecto al escenario B, el SBLOCA, hay que señalar que para asemejarse a lo postulado en PHEBUS se ha seleccionado en C.N. JOSE CABRERA una rotura de una línea del RHRS de 6", que se comporta como una LOCA intermedio, ya que no requiere enfriamiento desde el generador de vapor y descarga por sí mismo el acumulador. Por este motivo, la fenomenología que aparece en este escenario es bastante similar a la del LBLOCA, si bien a más largo plazo pues el tiempo necesario para vaciar el núcleo es mayor en el SBLOCA, el caudal de vapor es menor y, en consecuencia, al comenzar la simulación el calor residual es menor también.

Fenomenológicamente, lo que más destaca en estos escenarios es la aparición del "ballooning" o hinchamiento debido a la diferencia de presiones entre el interior de la barra de combustible y el exterior y que depende además, de la temperatura del nodo donde se estudia. Este fenómeno no aparece en los experimentos PHEBUS de la serie B pues existen en el elemento combustible PHEBUS unos tapones que llegado un momento determinado se funden para igualar las presiones dentro y fuera de la vaina, evitando precisamente el ballooning.

Además, en la citada serie de experimentos el mayor interés se centra en el estudio de la oxidación y, para proteger la capa de óxido formada de cara a su análisis posterior, la temperatura máxima alcanzada, no es tan elevada como la alcanzada en las simulaciones con SCDAP. Este código además supone, de cara a la licuefacción del combustible, que siempre existe contacto pastilla-vaina de modo que aun en estos casos donde aparece hinchamiento, simula la formación de autécticos, la fusión de estos materiales y cuando rompe la capa protectora de ZrO_2 , la caída de este material hasta los nodos inferiores o al lower plenum.

Por todo lo mencionado anteriormente, los escenarios de roturas simulados para la planta presentan diferencias sustanciales respecto a los experimentos

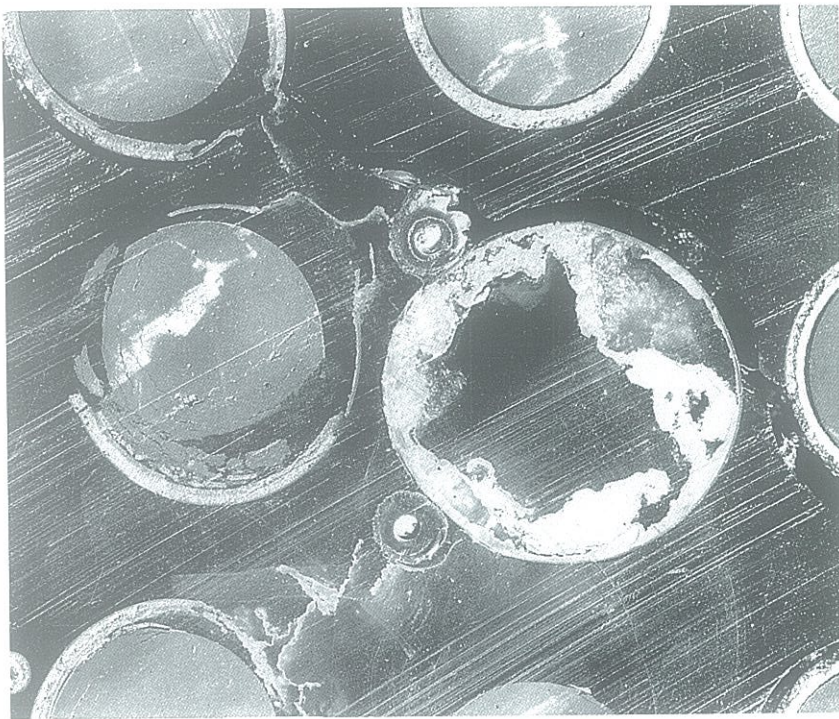
PHEBUS correspondientes (serie B, especialmente). Adicionalmente, los resultados obtenidos con SCDAP son discutibles en ciertos aspectos por el impacto de los modelos e hipótesis del código en el desarrollo de los transitorios.

Todo esto es radicalmente distinto para el tercer escenario simulado, la pérdida total de agua de alimentación al generador de vapor, y su comparación con los experimentos PHEBUS de la serie C a "alta" presión. Aquí las condiciones de contorno termohidráulicas asumidas en PHEBUS son similares a las que se derivan para C.N. JOSE CABRERA con el código RELAP5/MOD2 y también la fenomenología que surge es similar. En este caso lo más importante es el contacto pastilla vaina desde el principio de la simulación (excepto en el primer nodo, que al ser el más frío lo sufre algo después) y que aparece a temperaturas ligeramente más bajas que en los experimentos PHEBUS, debido a que la diferencia de presión es menor en la instalación experimental. Posteriormente aparece una ligera oxidación debida a un pequeño caudal de vapor, de espesor muy similar en el PWR y en PHEBUS, que protege la barra de combustible hasta que se rompa o sea disuelta por el Zircaloy fundido. La mezcla fundida de U-O-Zr que se ha ido generando en el interior de la vaina fluye entonces hacia el exterior resolidificando temporalmente en el nodo más bajo y más frío y cayendo finalmente al plenum inferior. Todo lo mencionado anteriormente hace concluir que los experimentos PHEBUS de la serie C no sólo cumplen su objetivo de contemplar detalladamente una determinada fenomenología, sino que también reflejan con gran fidelidad lo que sucedería realmente en una planta comercial donde se diera el escenario accidental postulado.

Por último, es importante destacar que la herramienta utilizada para el estudio de daño severo, SCDAP/MOD1, presenta diversos problemas, ya mencionados, en la simulación de escenarios con ballooning, comportándose de manera fiable si este hinchamiento no aparece. Hay que señalar que el usuario puede producir un impacto significativo en los resultados del código, tanto por la forma de suministrar las condiciones de contorno como por la elección del paso de tiempo, que se deja por completo a criterio del usuario.

CONCLUSIONES

Se ha presentado la fenomenología estudiada por los experimentos Phebus CSD, la cual cubre parte de los procesos de degradación de un reactor tipo PWR



F IXb Experimento PHEBUS AIC nivel + 600 mm.

en el transcurso de un accidente con daño al núcleo. Existen, sin embargo, aspectos que no han sido estudiados en dichos experimentos y que se consideran importantes:

Oxidación de las mezclas fundidas y "debris".

Reinundación del núcleo y "quenching" con incremento de temperatura debido a la oxidación y producción de hidrógeno. Los resultados obtenidos aportan en algunos casos datos adicionales importantes para el conocimiento de la fenomenología estudiada, y permiten disponer de una base de datos adecuada para la validación de los modelos de degradación del núcleo de los códigos existente. Se han determinado lagunas en los modelos de los códigos en los siguientes aspectos de la fenomenología estudiada:

Criterios de fallo y formación de "debris" de la vaina oxidada sometida a calentamiento y enfriamiento.

Modelos de interacción química entre el Zr y el material AIC, así como entre las vainas y las rejillas de Inconel.

Modelo de propiedades térmicas de la mezcla O-Zr-U formada por interacción entre el Zr líquido y el UO_2 . Los experimentos futuros sobre la degradación del núcleo se centran en la fenomenología asociada a la progresión del daño al núcleo, estudiando el comportamiento de los materiales recoloca-

dos y "debris" hasta su interacción con la vasija. Otro aspecto importante, que se estudiará en los futuros experimentos Phebus PF, es la relación entre el daño al núcleo y la liberación de productos de fisión al primario.

REFERENCIAS

- (1) Chemical Interactions of Reactor Core Materials up to Very High Temperatures, KfK 4485, P. Hofmann at als. Enero 1989.
- (2) "Chemical Interactions of Zircaloy - 4 tubing with UO_2 fuel and Oxygen at temperatures between 900 and 2000 °C". P. Hofmann, report KfK 4422. October 1988.
- (3) "Dissolution of UO_2 by Molten Zircaloy". Kim and Olander. Journal of Nuclear Materials, 154 (1988).
- (4) "Dissolution of UO_2 by Molten Zircaloy and its Modelling". P. Hofmann. IAEA-SM-296/1. Sorrento, 1988.
- (5) "Analysis of Control Rod Pressure Evolution". L. E. Herranz, J. C. García Cuesta. CIEMAT, ITN/TS-19/II-90.
- (6) J. Papin, C. Rognier. Definition and Calculations of the PHEBUS AIC Test. Note technique SEMAR 89/51, Note PHEBUS CSD 89/104.