

HERRAMIENTAS DE ANALISIS E INTERPRETACION DE FENOMENOLOGIA DE DEGRADACION DEL NUCLEO

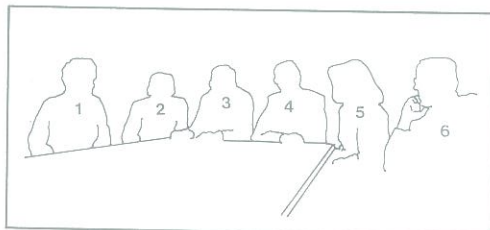
M. ALCONERO - A. I. ALVAREZ - J. A. BAGÜES -
J. C. GARCIA - J. GONZALEZ - A. LANTARON - J. SAIZ - O. VILLEGAS

INTRODUCCION

Las experiencias "in-pile" PHEBUS sirven para investigar a escala reducida los



Han colaborado en la realización de este trabajo: 1) Javier González Pindado (ETSIIM); 2) Ana I. Alvarez Saiz (CSN); 3) Juan C. García Cuesta (CIEMAT), coordinador del grupo; 4) Javier Saiz Alcántara (C. Trillo I); 5) Mercedes Alconero Delgado (ENUSA); 6) Juan A. Bagües (CSN). Han participado también Alfredo Lantarón (CSN) y Ower Villegas (CSN).



procesos de degradación del combustible durante accidentes graves, en reactores tipo del PWR. Estas experiencias forman parte de un programa general estructurado en cinco fases, que incluye también experiencias termohidráulicas ya efectuadas, así como de liberación y transporte de productos de fisión, proyectadas para realizarse a partir del año 1992.

La disponibilidad de herramientas informáticas para analizar las posibles situaciones accidentales en las centrales nucleares constituye uno de los objetivos fundamentales del Proyecto PHEBUS-ESPAÑA. La participación técnica de los expertos españoles se ha concretado en el análisis teórico de cinco experimentos de la fase CSD (Coeur Sévèrement Dégadé) del Proyecto, con los códigos de cálculo ICARE 2 V2, SCDAP/Mod1 V20 y MELCOR 1.8.0. Asimismo se trabajó en la instalación de la versión disponible en España de SCDAP/RELAP5. Estos códigos no son los únicos capaces de reproducir la fenomenología asociada a la degradación de núcleos, pero constituyen un conjunto representativo de las herramientas existentes en la materia.

Estos códigos, utilizados para el análisis de los fenómenos que se producen en el transcurso de un accidente en un reactor

de agua ligera, consideran tanto la modificación de las condiciones termohidráulicas al producirse tales situaciones, como la progresión del daño experimentado por los componentes del núcleo durante el transitorio y la etapa de inundación posterior.

En este artículo se describen las características básicas de estos códigos de cálculo y se comparan entre sí sus capacidades analíticas.

CALCULOS REALIZADOS POR LOS GRUPOS DE TRABAJO

De las cinco fases de que consta el Proyecto francés PHEBUS, la tercera y cuarta están dirigidas a tratar el problema del Daño Severo al Combustible (CSD), durante accidentes en los que se supone la existencia de fallos en los Sistemas de Salvaguardias (Sistemas de Refrigeración de Emergencia del Núcleo y Sistemas de Alimentación de Emergencia a los Generadores de Vapor). El consorcio PHEBUS-ESPAÑA se incorporó al Proyecto Francés en el transcurso de estas fases, en pleno desarrollo de las herramientas analíticas.

Con la ayuda de estas herramientas se pretendía adquirir los conocimientos asociados a la evolución termomecánica del elemento combustible tipo PWR, en condiciones accidentales que permitieran, como fin último, evaluar, diagnosticar y mitigar las consecuencias de estos sucesos.

Para cubrir estos objetivos era necesario realizar los cálculos previos y posteriores a la ejecución de los experimentos, analizar e interpretar los resultados experimentales y evaluar las herramientas analíticas, sus modelos y correlaciones. El primer código de cálculo al que los grupos de trabajo españoles tuvieron acceso fue el ICARE 1 versión 2 ciclo 5, código que se utilizó para definir los escenarios accidentales en los cuales se alcanzasen los objetivos deseados de los experimentos B9+ y C3+, así como cálculos complementarios sobre el control de la planta PHEBUS y estudios de su comportamiento, en respuesta a diferentes niveles de potencia. Estos estudios se utilizaron para obtener un mapa de potencia frente al porcentaje de material de vaina fundido, que sirviera para conducir el experimento en el hipotético caso de pérdida de la instrumentación. Sin embargo, el código era insuficiente para reproducir toda la fenomenología esperada de los ensayos, ya que, si bien permitía simular las etapas iniciales de la degradación del núcleo, no calculaba el flujo y la recolocación de material fundido que tenía lugar en la instalación, dadas las elevadas temperaturas previstas en el transcurso de ambas experiencias (2.600° C.).

T I
PAISES PARTICIPANTES Y CODIGOS UTILIZADOS EN EL ISP28 DE LA NEA

País	Organización	Código	Máquina
Francia + ESPAÑA	CEA + PHEBUS-ESPAÑA	ICARE	CRAY
España	PHEBUS-ESPAÑA	SCDAP MELCOR	CDC VAX
CC.EE.	JRC	ICARE	SUN
Checoslovaquia	REZ	FRAS	IC-1057
Finlandia	VIT	SCDAP/RELAP	CRAY
Alemania	IKE GRS	KESS ATHLET	CRAY IBM
Hungría	KFKI	MARCH	VAX
Italia	ENEA UNIV. PISA	SCDAP/RELAP SCDAP	CRAY
Japón	JAERI	SCDAP/RELAP	FUJITSU
Holanda	ECN	SCDAP/RELAP	CDC
Suecia	SKI	SCDAP/RELAP	CONVEX
Taiwan	AEC	MELCOR	VAX
R. Unido	UKAEA	SCDAP/RELAP	CRAY
EE.UU.	NRC EPRI	MELCOR CORMLT	CRAY
URSS	AS	CS STCP	EC EC

A primeros de enero de 1989 se recibió la versión 3 del código ICARE 1. La base de su desarrollo es el ICARE 1.2.5, en el cual se han modificado numerosos subprogramas con el fin de mejorar sus posibilidades analíticas, si bien su auténtica capacidad de cálculo se restringe a aquellos accidentes que ocurren sin alcanzar temperaturas que provoquen la fusión de las vainas. Con este nuevo código se llevaron a cabo los cálculos posteriores a los experimentos B9 y C3, encontrando una concordancia aceptable en la comparación de los resultados teóricos y experimentales.

Ocho meses más tarde, en el mes de septiembre de 1989, se recibió la primera versión del código ICARE 2, que añade nuevos modelos a ICARE 1 para representar el flujo y la recolocación de material fundido, así como reacciones químicas entre materiales, en las etapas posteriores del accidente. Pero no sólo es la extensión de la fenomenología simulada lo que diferenciaba a ambos

códigos; la estructura y el esquema numérico utilizado son también diferentes.

Con ICARE 2 V1 se llevaron a cabo los cálculos posteriores a las experiencias C3+ y AIC. El código reproduce de forma satisfactoria el comportamiento térmico del dispositivo experimental, a excepción del pico de temperatura observado en el desarrollo del experimento AIC, debido al aumento del flujo neutrónico, por la fusión de material de control en las cotas superiores. Esta discrepancia era previsible, al carecer ICARE 2 V1 de modelos neutrónicos.

En todos los casos fue necesario, una vez recibidos los códigos, desarrollar procedimientos gráficos que permitieran adaptar los programas franceses a las peculiaridades de los dispositivos gráficos disponibles en España.

De forma coincidente en el tiempo y con el fin de evaluar el código ICARE, identificando su capacidad de cálculo frente a otros adaptados en España, en el con-

T II FECHAS DE REALIZACION DE LOS EXPERIMENTOS DE LA FASE CSD DEL PROYECTO PHEBUS Y DE RECEPCION DE LOS CODIGOS UTILIZADOS CALCULOS LLEVADOS A CABO CON LOS MISMOS

FECHA (1)	EXPERIMENTO	CODIGO	CALCULOS
Diciembre 1986	B9	—	—
Octubre 1987	C3	—	—
Mayo 1988	—	ICARE 1.2.5	B9+PRE-TEST C3+PRE-TEST
	—	—	—
Noviembre 1988	C3+	—	—
Enero 1989	B9+	ICARE 1.3	B9 POST-TEST C3 POST-TEST
	—	—	—
Junio 1989	AIC	—	—
Septiembre 1989	—	ICARE 2.1	C3+ POST-TEST AIC POST-TEST
	—	—	—
Junio 1990 (2)	—	SCDAP/MOD 1 VER 20	B9+PRE-TEST
	—	(modificado)	B9+POST-TEST
	—	—	C3+PRE-TEST
	—	—	C3+POST-TEST
	—	—	AIC PRE-TEST
Septiembre 1990	—	MELCOR 1.8.0.	B9+POST-TEST
Diciembre 1990	—	SCDAP/RELAP MOD2.5	—

(1) Fecha de realización del experimento o de recepción del código.

(2) El proceso de la introducción de las modificaciones y validación de las mismas comenzó en el mes de mayo de 1988.

texto del Proyecto OCDE-LOFT (SCDAP) o conseguidos mediante acuerdos CSN/NRC (MELCOR), los grupos de trabajo del Proyecto PHEBUS-ESPAÑA emprendieron una actividad consistente en el estudio y aplicación al Proyecto, del código de cálculo SCDAP. Esto, a su vez, permitió, por contraste de resultados con otros códigos, participar en el diseño y análisis de las experiencias Phebus. Esta actividad dio origen a tres tipos de tareas:

- Estudio, evaluación y documentación del código de cálculo SCDAP.
- Diseño e introducción de modificaciones en el código.
- Aplicación del código modificado al diseño y análisis de las experiencias de alta temperatura B9+, C3+ y AIC.

SCDAP había sido desarrollado para experiencias integrales de tipo "boil-off" de pequeño LOCA y, por lo tanto, no era directamente aplicable a las condiciones particulares de los experimentos PHEBUS. Fue entonces necesario introducir

nuevos modelos y optimizar otros ya existentes, a la vez que se subsanaban algunos errores detectados en el código. La nueva versión generada permite analizar casos en los que, como en las experiencias PHEBUS, se utiliza hidrógeno o helio como refrigerante.

Con objeto de validar esta primera versión del código SCDAP modificado se llevaron a cabo cálculos pre-test y post-test de los experimentos B9+, C3+ y pre-test de AIC, que confirmaron los resultados obtenidos mediante otros códigos.

En el mes de abril de 1990 se decidió participar en el ISP-28 (International Standard Problem) de la NEA con los códigos ICARE 2 V2, SCDAP modificado y el código americano MELCOR, de características bien diferenciadas respecto de los otros dos códigos, ya que se trata de una herramienta de propósito más general que el análisis de daño severo al combustible (cálculo del término fuente), pero que incorpora modelos específicos para el análisis de núcleos degradados. Los primeros cálculos llevados a cabo fueron enviados al CEA,

estando a la espera de recibir el informe donde se compararán los resultados de estos tres códigos con los utilizados por otros países. En la tabla I se recogen los países participantes y los códigos empleados.

En la última etapa del proyecto estaba prevista la utilización del código SCDAP/RELAP5, desarrollado por INEL con la colaboración de la USNRC. Problemas de instalación, debidos a la incompatibilidad con los ordenadores disponibles, obligaron a solicitar otra versión, lo cual ha originado un retraso en su recepción. Esto ha impedido una participación efectiva con este código de cálculo. No obstante, el consorcio PHEBUS-ESPAÑA tiene prevista la realización de un seminario impartido por personal de INEL, sobre esta herramienta de cálculo.

En la tabla II puede verse la fecha de realización de los experimentos de la fase CSD en los que el consorcio PHEBUS-ESPAÑA ha participado, la fecha de recepción de los códigos utilizados y los ensayos analizados con ellos.

DESCRIPCION BASICA DE UN CODIGO GENERICO DE DAÑO SEVERO AL NUCLEO

Un código de daño severo al núcleo se desarrolla con el fin de proporcionar una herramienta capaz de reproducir los fenómenos físicos y químicos que tienen lugar durante transitorios que producen un daño severo al núcleo del reactor. En general, incluye modelos de calentamiento del núcleo, oxidación de materiales, con liberación de hidrógeno y agotamiento de vapor, formación de eutécticos, hinchamiento y rotura de vainas, pérdida de geometría por fusión y fragilización, recolocación de materiales, formación y liberación de productos de fisión y aerosoles.

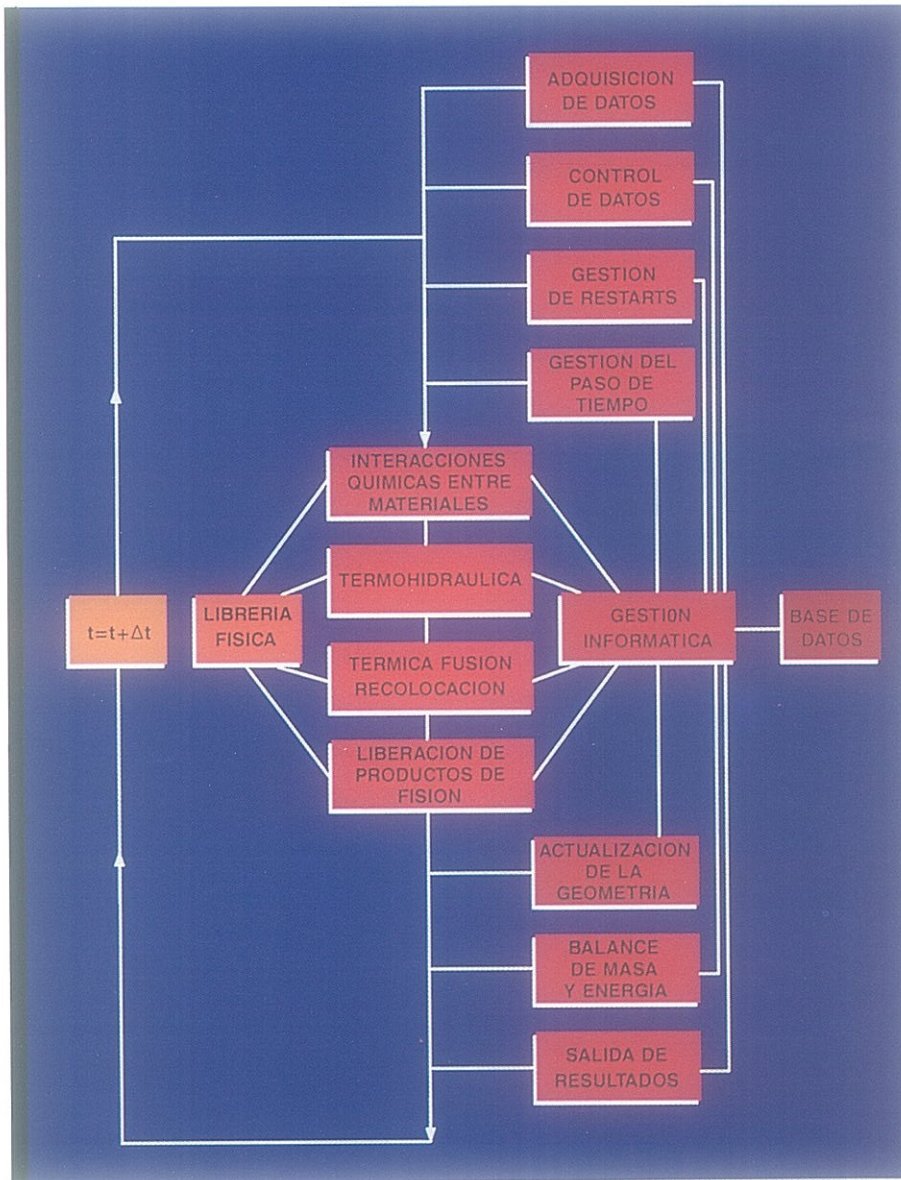
Su estructura general puede ser similar a la de la tabla III.

Los modelos principales que debe incluir son:

- **Modelo Termohidráulico**, con capacidad de simular la presencia de un flujo monofásico (vapor) o bifásico (vapor y agua) y gases no condensables (hidrógeno), por medio de ecuaciones de conservación de masa, energía y momento. Debe considerar los cambios de geometría debidos a la recolocación de materiales y transferencia de materia con las paredes.
- **Modelos Térmicos**, que consideren la generación de calor nuclear y la transferencia de calor por:
 - Conducción, en dirección radial y axial, tanto dentro de cada componente del núcleo (pastillas de UO_2 ,

T III

ORGANIGRAMA GENERAL DE UN CODIGO GENERICO DE DAÑO SEVERO AL NUCLEO



vainas) como entre componentes (pastilla-vaina), que será función de la geometría y de la conductividad térmica.

- Convección, tratada para un amplio rango de condiciones del fluido, con especial atención al flujo monofásico. Debe incluir correlaciones para flujos turbulentos y laminares, en convección libre o forzada.
- Radiación, para calcular el intercambio de calor, en sentido radial, entre los diferentes componentes, considerando al gas participativo en este intercambio. Para ello deben determinarse parámetros tales como los factores de forma, la longitud geomé-

trica media de radiación de la radiación térmica, así como emisividades y transmisividades de componentes y fluido.

- Modelo de Oxidación, que simule la reacción del vapor con el zircaloy y el acero inoxidable, mediante ecuaciones de tipo parabólico. Para el zircaloy debe considerarse la aceleración de la oxidación a temperaturas superiores a 1850K, existiendo varias correlaciones disponibles (Cathcart-Powel, Biederman, Leistikow, Urbanic-Heidrick...). La oxidación del acero inoxidable puede calcularse a partir de correlaciones como la de Dana Powers o la

desarrollada por White, que considera las reacciones químicas involucradas. En ambos casos, se debe tener en cuenta la cantidad de vapor disponible y la posibilidad de su agotamiento, así como el apantallamiento debido al hidrógeno y el consumo total del metal.

- **Modelo de deformación mecánica**, que considere las dilataciones térmicas, el cálculo de tensiones y el hinchamiento y rotura de las vainas.
- **Interacciones químicas entre materiales**, siendo las más importantes:
 - Interacción entre el UO_2 y el zircaloy sólido, que tiene lugar si existe un buen contacto entre ambos y la temperatura supera un cierto valor umbral ($\sim 1473\text{K}$). El UO_2 reacciona con el zircaloy β de las vainas, para formar el eutéctico U-Zr, localizado entre dos capas de zircaloy α .
 - Disolución del UO_2 por zircaloy fundido, que da lugar al compuesto ternario UOZr . La interacción se puede simular por medio de modelos de difusión controlada (Hofmann), transferencia convectiva (Kim-Olander) o a partir de una curva de solubilidad del UO_2 en zircaloy, en función de la temperatura (Politis/Skokan).
 - Disolución del ZrO_2 por zircaloy líquido, calculada en función de la temperatura y del espesor de la capa de óxido previa.
- **Modelo de Recolocación**, que determine la caída de una mezcla fundida, cuando su fracción de masa líquida sobrepase un valor umbral y no esté encerrada por una estructura sólida compacta. Debe calcular el movimiento descendente de la mezcla, considerando las fuerzas de gravedad y viscosidad, la interacción con el refrigerante y la transferencia de calor a la estructura sobre la cual se desliza. El modelo debe considerar la capacidad de retención de la mezcla fundida por las rejillas espaciadoras hasta en pérdida de integridad. La resolidificación de la mezcla fundida produce cuando su temperatura descienda por debajo de su punto de fusión. Esta resolidificación ocurrirá a distintas cotas axiales, a medida que la mezcla vaya cediendo calor a las estructuras.
- **Modelo de liberación de productos de fisión**, desde el combustible al huelgo y de éste al refrigerante. Este modelo sólo es necesario en caso de considerar combustible irradiado.
- **Propiedades de los materiales**, como conductividad térmica, densidad, capacidad calorífica, temperatura de fu-

sión, etc., que se pueden obtener directamente de una librería del tipo de MATPRO. No obstante, en algunos casos es útil para el usuario la posibilidad de cambiar estas propiedades.

COMPARACION DE LOS CODIGOS DISPONIBLES PARA EL PROYECTO

Los códigos de daño severo al núcleo, disponibles para el Proyecto PHEBUS-ESPAÑA, son ICARE, SCDAP, MELCOR y SCDAP/RELAP5, y han sido desarrollados en distintos centros:

ICARE, en el Institut de Protection et de Sûreté Nucleaire del CEA (Francia).

SCDAP, en el Idaho National Engineering Laboratory (USA).

MELCOR, en los Sandia National Laboratories (USA).

SCDAP/RELAP5, en el Idaho National Engineering Laboratory (USA).

Todos ellos presentan analogías en cuanto a la simulación de la degradación del núcleo. No obstante, muestran ciertas diferencias en sus modelos, que se comparan a continuación:

MODELO TERMOHIDRAULICO

Tanto SCDAP como ICARE consideran al refrigerante formado únicamente por una mezcla de vapor e hidrógeno, calculando ICARE la difusión del segundo en el primero. SCDAP simula el nivel del líquido mediante una ecuación adicional.

ICARE emplea las tres ecuaciones de conservación para la fase gaseosa del código CATHARE 1, a las que añade una ecuación de conservación para el hidrógeno, y es capaz de considerar varios canales de refrigeración, aunque sin flujos cruzados.

Por otra parte, MELCOR y SCDAP/RELAP5 pueden simular flujos bifásicos, representando los canales de refrigeración mediante volúmenes de control, considerando además SCDAP/RELAP5 flujos cruzados. Ambos códigos modelan la presencia de agua líquida, vapor, gases no condensables, productos de fisión y aerosoles.

Además, SCDAP/RELAP5 tiene un modelo especial para tratar la fase de reinundación que tendría lugar en un accidente con pérdida de refrigerante dando crédito al ECCS.

T IV
CARACTERISTICAS DE LOS CODIGOS UTILIZADOS EN EL PROYECTO PHEBUS-ESPAÑA (1)

Código	ICARE	SCDAP	MELCOR	SCDAP/RELAP5
Centro de desarrollo	IPSN (Francia).	INEL (USA).	SNL (USA).	INEL (USA).
Extensión	30.000 líneas.	150.000 líneas.	260.000 líneas.	~300.000 líneas.
Ordenador empleado	IBM 3090	CDC 180/810	VAX-Station 3100	CONVEX C-120
Geometría representada	PHEBUS detallada y reactor grosera.	PBF detallada y reactor.	Reactor.	Reactor detallada.
Termohidráulico	Monofásica con incondensables (4 cables).	Monofásica con incondensables (4 ecuaciones).	Bifásica con incondensables (5 ecuaciones).	Bifásica con incondensables (6 ecuaciones).
Térmico	Conducción: Axial y radial. Radiación: Radial. Calcula factores de forma.	Conducción: Radial. Radiación: Radial. Calcula factores de forma.	Conducción: Axial y radial. Radiación: Axial y radial. No calcula factores de forma.	Conducción: Radial. Radiación: Radial. Calcula factores de forma.
Oxidación ZRY	4 correlaciones.	2 correlaciones.	URBANIC u otra dada por el usuario.	2 correlaciones.
Interacciones químicas	UO ₂ con Zry sólido. UO ₂ con Zry líquido.	UO ₂ con Zry sólido. UO ₂ con Zry líquido.	No considera ninguna	UO ₂ con Zry sólido. UO ₂ con Zry líquido. UO ₂ con Zry líquido.
Recolocación	Retención capa óxido. No considera rejillas. Velocidad de caída dada por el usuario.	Retención capa óxido. Considera rejillas. Velocidad de caída calculada por el código.	No retención capa óxido. Considera rejillas. Velocidad de caída función del paso de tiempo.	Retención capa óxido. Considera rejillas. Velocidad de caída calculada por el código.

MODELOS

(1) En la tabla se describen las características de las versiones originales de los códigos sin modificar.

MODELOS TERMICOS

SCDAP, ICARE y MELCOR simulan la potencia instantánea mediante una tabla en función del tiempo dada por el usuario, mientras que el código SCDAP/RELAP5 utiliza el modelo de cinética puntual de RELAP cuando éste es operativo. Además, SCDAP y SCDAP/RELAP5 permiten el cálculo de la potencia de decaimiento y la variación de los perfiles axiales de potencia con el tiempo. En cuanto a los modelos de transferencia de calor existen ciertas diferencias:

- Conducción: Tanto ICARE como MELCOR calculan la transferencia de calor por conducción axial y radial, mientras que SCDAP y SCDAP/RELAP5 modelan la conducción radial en todo el dispositivo y la axial sólo en la interfase líquido-gas.
- Convección: Los cuatro códigos simulan esta transferencia para un amplio rango de condiciones del refrigerante mediante diversas correlaciones.
- Radiación: Todos los códigos consideran las superficies radiactivas como emisores/receptores grises (independientes de la longitud de onda). No obstante, las bandas de absorción del vapor sólo son simuladas en ICARE y SCDAP/RELAP5, mientras que en el resto se considera gas gris. Por otra parte, ICARE, SCDAP y SCDAP/RELAP5 calculan los factores de forma y los recorridos medios de los rayos y sólo tienen en cuenta la radiación en la dirección radial, mientras que MELCOR calcula la radiación en las direcciones axial y radial, siendo necesario que el usuario defina los parámetros anteriores. En cuanto a las emisividades, tanto en MELCOR como en SCDAP y SCDAP/RELAP5 son calculadas en función de la temperatura y el espesor de óxido, mientras que en ICARE sólo dependen de la temperatura. Con respecto a los métodos programados, ICARE utiliza el de Hotel, SCDAP y SCDAP/RELAP5 el de radiación de una cavidad y MELCOR el de Kreith.

MODELO DE OXIDACION

Los cuatro códigos simulan el crecimiento de las distintas capas metalúrgicas mediante leyes parabólicas de tipo Arrhenius, usando distintas correlaciones. Así, para la representación de la oxidación del zircaloy, ICARE permite utilizar cuatro tipos de constantes (Biederman, Leistikov, Urbanic-Heidrick y Cathcart-Powel), SCDAP y SCDAP/RELAP5 emplean Cathcart-Powel a bajas temperaturas y Urbanic para temperaturas superiores a 1850° C y MELCOR usa Urbanic-Heidrick

u otra introducida por el usuario. Además, todos ellos pueden simular el agotamiento del vapor y el apantallamiento del H₂. En cuanto a los modelos de oxidación del acero, ICARE sólo calcula el consumo de oxígeno y la liberación de energía, mientras que el resto también determinan el crecimiento de la capa de óxido mediante las correlaciones de White (SCDAP y SCDAP/RELAP5) y de Dana Powers (MELCOR).

MODELO DE DEFORMACION MECANICA

MELCOR carece de este modelo. ICARE calcula las dilataciones térmicas, tensiones e hinchamiento de las vainas y SCDAP y SCDAP/RELAP5 utilizan el modelo de deformación del código FRAP-T6.

INTERACCIONES QUIMICAS ENTRE MATERIALES

Excepto MELCOR, que no simula estos fenómenos, los otros códigos reproducen las siguientes interacciones:

- Interacción entre el UO₂ y el zircaloy sólido. El crecimiento de las capas de zircaloy α y UZr se estima mediante leyes parabólicas debidas a Hofmann (ICARE) o la ecuación de Turk (SCDAP y SCDAP/RELAP5).
- Disolución del UO₂ por zircaloy líquido. Este fenómeno es calculado mediante los modelos de Hofmann (ICARE, SCDAP y SCDAP/RELAP5), Kim-Olander o Politis (ICARE).
- Disolución del ZrO₂ por zircaloy líquido. Sólo es simulada por SCDAP/RELAP5, que considera la disolución instantánea de la capa de óxido, si alcanza cierta temperatura y tiene un espesor menor del especificado.

MODELO DE RECOLOCACION

Mientras que en el MELCOR, cuando se alcanza el punto de fusión de un material, éste empieza a recolocarse inmediatamente, tanto ICARE como SCDAP y SCDAP/RELAP5 tienen en cuenta la capacidad de la retención de la capa de óxido. Todos consideran despreciable la transferencia de calor del material fundido al refrigerante. Excepto en ICARE, el efecto de las rejillas espaciadoras en la recolocación consiste en soportar el material fundido, bien hasta que la rejilla alcanza su temperatura de fallo (MELCOR), o bien parando momentáneamente la caída del material (SCDAP y SCDAP/RELAP5). La velocidad de caída es calculada por SCDAP y SCDAP/RELAP5 en función de las fuerzas de gravedad y viscosidad. ICARE considera una velocidad constante, dada por el usuario, y para MELCOR es función del paso de tiempo.

MODELO DE LIBERACION DE PRODUCTOS DE FISION

El inventario de productos de fisión es calculado por SCDAP, SCDAP/RELAP5 y MELCOR. En el código ICARE debe darse éste en la entrada de datos. En cuanto a los modelos de liberación, ICARE utiliza el de CORSOR, SCDAP y SCDAP/RELAP5 el de PARAGRASS y MELCOR el de Powers (ORIGEN2). En la tabla IV pueden verse confrontadas las características de los códigos utilizados por España en el marco del Proyecto PHEBUS-CSD.

MODIFICACIONES DE LOS CODIGOS REALIZADAS EN EL MARCO DEL PROYECTO

Ha sido necesario modificar los códigos MELCOR y SCDAP para contemplar la fenomenología asociada a los experimentos PHEBUS-CSD.

En MELCOR se ha implementado un modelo simple que permita simular la disolución del UO₂ y ZrO₂ por zircaloy, precisando coeficientes que deben ser especificados por el usuario.

En SCDAP, la necesidad de introducir las modificaciones se ha debido a las siguientes características específicas de las experiencias PHEBUS-CSD:

- Las fases de calentamiento y refrigeración incluyen H₂ o He como refrigerantes, que no considera SCDAP.
- El combustible es fresco, es decir, sin irradiación previa.
- En las experiencias de baja presión se evita un hinchamiento excesivo de las vainas, utilizando un sello térmico que funde a una temperatura determinada.

Las modificaciones introducidas afectan a diferentes modelos. Las más importantes son:

- Se han incorporado el H₂ y He como refrigerantes a través de dos subcódigos. El refrigerante utilizado y el espectro de absorción radiactiva correspondiente los selecciona el usuario por medio de una etiqueta en la entrada de datos. En caso de seleccionar estos gases como refrigerantes, se desacopla el modelo de oxidación.
- Se ha introducido la posibilidad de considerar combustible fresco, desacoplando la iniciación de PARAGRASS (modelo de liberación de productos de fisión) y teniendo en cuenta el huelgo claramente definido en el medio de conducción de calor.
- Se ha considerado la influencia del sello térmico, dando como opción la rotura de la vaina en una corta y a una temperatura determinada. Además, el modelo de deformación me-

cánica ha sido desacoplado para temperaturas mayores de 1.900 K, cualquiera que sea la evolución posterior de la potencia.

- Se ha incluido el criterio de fallo de las barras de control a baja presión, a 1.473 K (el código sólo consideraba la rotura a 1.700 K, correspondiente a secuencias de alta presión). Además, se ha modificado el cálculo de los factores de forma en la fase de recolocación del material de la barra, ya que no era posible continuar el cálculo partiendo de un "restart".
- Se han introducido diversas modificaciones de tipo informático, que mejoran el comportamiento general del código.

CONCLUSIONES

La constitución del consorcio PHEBUS-ESPAÑA para la participación española en el Proyecto PHEBUS-CSD del CEA ha permitido la formación de un núcleo de especialistas y de las herramientas necesarias para evaluar analíticamente el comportamiento del combustible nuclear en situaciones de núcleo degradado.

Los códigos utilizados son, aunque coincidentes en sus objetivos de cálculo, diferentes en otros aspectos más concretos:

- ICARE: Específico de análisis de núcleos degradados. Su desarrollo ha sido un objetivo importante del programa francés, está bastante ajustado a la configuración francesa.
- SCDAP: Código americano que es, respecto a la instalación PBF, similar a la de ICARE respecto a PHEBUS, y también específico para análisis de núcleos degradados, aunque de aplicación más directa a planta. Se utilizó para analizar las experiencias PHEBUS gracias a las importantes modificaciones introducidas en él por técnicas del consorcio.
- MELCOR: Más orientado a la planta que los dos anteriores y de alcance diferente (cálculo del término fuente), pero en estado de validación más preliminar. Será aplicado al experimento B9+, en el marco del ISP28, con el objeto de obtener información sobre su comportamiento global y, en particular, sobre sus modelos de núcleo.
- SCDAP/RELAP5: Código de aplicación directa a planta, desarrollado

por INEL, cuya estructura es una combinación de los códigos RELAP5, SCDAP y TRAPMELT. Es una herramienta de detalle, siendo, posiblemente, la más completa en lo que al análisis del RCS se refiere. Retrasos administrativos no han permitido su obtención hasta una etapa tardía del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

- CHATELLARD, P.; GONZALEZ, R.; JACQUES, F., y PORRACHIA, A.: "*ICARE, a Computer Code for Severe Fuel Damage Analysis. General Description of the second Version, ICARE2*". Note Technique SEMAR/SEACS 89/47 (julio 1989).
- ALLISON, C. M.; BERNARD, G. A., y SIEFKEN, L. J.: "*SCDAP/MOD1 Theory and Models*". Idaho National Engineering Laboratories (enero 1985).
- ALLISON, C. M.; JOHNSON, E. C., et al.: "*SCDAP/RELAP5/MOD1 Code Manual*". Idaho National Engineering Laboratories (febrero 1985).
- COOL, R. K.; SUMMERS, R. M.; BOUCHERON, A., et al.: "*MELCOR 1.8.0. User's Manual and User's Guide*". Sandia National Laboratories (febrero 1989).