

Investigación sobre fenómenos difusivos en combustible

L. E. Herranz, M.T. del Barrio, F. Feria y I. Vallejo

La difusión de gases tiene una importancia sustancial en el comportamiento de combustible. Existen fenómenos íntimamente relacionados con la seguridad del combustible nuclear, como la liberación de gases de fisión, su transporte axial o la oxidación durante almacenamiento en seco, donde el gradiente de concentración es el potencial inductor directo o indirecto de los procesos. CIEMAT, a través de acuerdos de colaboración con CSN y ENRESA, está investigando sobre todos ellos con distinto propósito: optimizar las capacidades de los códigos de análisis de comportamiento de combustible actuales y evaluar la base de datos sobre la que se sustenta la normativa americana relativa al almacenamiento en seco del combustible.

Este artículo analiza el papel de la difusión en la liberación de gases de fisión durante la operación estacionaria del reactor, la distribución axial de gases durante rampas de potencia y, finalmente, la oxidación del combustible durante su almacenamiento en seco. A través del texto se describe la investigación actualmente en curso en el CIEMAT y se ilustran algunos de los resultados obtenidos. Finalmente, se perfilan las actividades previstas a corto y medio plazo.

Diffusion governs to some extent nuclear fuel behavior. There are phenomena closely related to safety, such as fission gas release, axial gas transport or fuel oxidation during dry storage, which driving force stems from a gas concentration gradient. CIEMAT is presently investigation these phenomena in collaboration with CSN and ENRESA. Their purpose is two-fold: on one side, to enable current fuel rod codes farther than their present capabilities; on the other, to assess the scientific database that supports the US NRC guidelines concerning dry storage.

This paper analyzes the role of diffusion during the fission gas release under steady state, the axial in-rod transport of gases after a power ramp and, finally, the oxidation of fuel during dry storage. Through this manuscript a brief description of the ongoing research at CIEMAT is presented and the main activities in the short- and mid-term are outlined.

INTRODUCCIÓN

El papel del combustible nuclear como origen de la energía térmica y de la radiactividad producidas en el reactor, le ha hecho acreedor de un merecido interés. La necesidad de satisfacer exigentes especificaciones técnicas de funcionamiento sin afectar negativamente a la operación y/o a la seguridad de la instalación, ha conducido a la realización de ambiciosos programas de investigación desde el inicio de la generación núcleo-eléctrica. Fruto de ellos ha habido variaciones sustanciales en el diseño y en las condiciones de operación y, aún más importante, su fiabilidad ha aumentado de forma notable (la tasa promedio de fallos en reactores PWR y BWR se situó en $4 \cdot 10^{-5}$ y $2 \cdot 10^{-5}$, respectivamente, en el período 2004-2005 – Rusch, 2007).

La seguridad del combustible ha sido uno de los aspectos más profusamente investigados. La tendencia hacia mayores grados de quemado o el almacena-

miento en seco, han dado lugar a nuevos escenarios y, con ellos, a estudios dirigidos a conocer la respuesta en ellos del combustible. La variedad de condiciones posible (estacionarios y transitorios) durante la operación y el almacenamiento propicia multitud de fenómenos complejos, cuya naturaleza involucra elementos de disciplinas diversas, como la mecánica de materiales, la transmisión de calor, la cinética química y otras. Sin embargo, en muchas ocasiones un análisis detallado de los procesos permite identificar mecanismos fundamentales comunes, como es el caso de los fenómenos difusivos.

La difusión tiene su origen en el movimiento aleatorio de moléculas y, como mecanismo de transporte de masa, su efecto fundamental es la homogeneización del medio donde tiene lugar. Habitualmente, su descripción se realiza mediante la primera y segunda leyes de Fick (Beek et al., 1999), cuya formulación introduce el llamado coeficiente de difusión. No obstante, también puede

LUIS E. HERRANZ. Licenciado en CC. Químicas en la UAM, 1986. Es Diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios de la Energía (1987) y Doctor por la UPM desde 1996. En la actualidad es responsable de la Unidad de Investigación sobre Seguridad Nuclear del CIEMAT.



Mª TERESA DEL BARRIO. Licenciada en CC. Químicas por la UAM (1993). Actualmente, colabora en el proyecto CSN-CIEMAT MASCAQ en el área del comportamiento termomecánico de combustible de alto quemado del CIEMAT.



FRANCISCO FERIA. Licenciado en CC. Físicas por la Univ. de Córdoba (2000) y Doctor por la Univ. de Cádiz (2006). En 2006 se incorporó a la Unidad de Investigación sobre Seguridad Nuclear del CIEMAT. Investiga el comportamiento del combustible nuclear durante el almacenamiento temporal en seco, en el marco del proyecto ICAT con ENRESA.



ISABEL VALLEJO. Licenciada en CC. Físicas, por la UAM. Desde 1999 trabaja en el área de combustible de la Unidad de Seguridad Nuclear del CIEMAT, investigando con códigos de simulación de barra combustible, en el acuerdo de colaboración CSN-CIEMAT "Comportamiento Termomecánico del Combustible de Alto Quemado".

expresarse en función de un coeficiente de transporte de masa (Bird et al., 1960). En el área de combustible, los modelos utilizados para describir diversos fenómenos suelen utilizar la primera aproximación (Olander, 1976).

En este artículo se analiza el papel de la difusión en tres fenómenos íntimamente relacionados con la seguridad del comportamiento del combustible nuclear en entornos diversos: la liberación de gases de fisión durante la operación estacionaria del reactor, la distribución axial de gases durante rampas de potencia y, finalmente, la oxidación del combustible durante su almacenamiento en seco. A través del texto se perfila sucintamente la investigación actualmente en curso en el CIEMAT. Esta se enmarca en los acuerdos de colaboración establecidos con CSN (TERMOCAQ) y ENRESA (ICAT).

LIBERACIÓN DE GASES DE FISIÓN

La liberación de gases de fisión juega un papel fundamental en el comportamiento del combustible nuclear en condiciones estacionarias, transitorias y accidentales. Variables tales como la presión interna de la barra o las conductividades de combustible y huelgo, se ven directamente afectadas por ella. Su influencia se acrecienta aún más en condiciones de alto quemado, donde la fragmentación del grano de combustible en la periferia de las pastillas podría afectar de modo notable a la liberación en condiciones transitorias y/o accidentales (Spino et al., 2004).

En general, los códigos de combustible simulan la liberación de gases de fisión mediante la resolución de la segunda ley de difusión

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} = \frac{D(t)}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial C(r,t)}{\partial r} \right) + \beta(t) \quad (1)$$

donde C es la concentración de átomos de gas de fisión, D el coeficiente de difusión y β la tasa de producción de átomos. Generalmente, los códigos suponen condiciones umbrales de concentración en el borde de grano y la posibilidad de reincorporación de los gases de fisión desde la frontera del grano a su interior (redisolución).

Modelo de difusión en FRAPCON-3

El modelo de difusión implementado en el código FRAPCON-3 se basa en una adaptación del modelo original de Forsberg & Massih (1985a, 1985b). Éste define tres coeficientes de difusión según la temperatura:

$$\begin{aligned} D_{\text{high}} &= 1.09 \cdot 10^{-17} \exp(-6614/T) \quad T > 1650 \text{ K} \quad (2) \\ D_{\text{mid}} &= 2.14 \cdot 10^{-13} \exp(-22884/T) \quad 1381 \text{ K} < T < 1650 \text{ K} \quad (3) \\ D_{\text{low}} &= 1.51 \cdot 10^{-17} \exp(-9508/T) \quad T < 1381 \text{ K} \quad (4) \end{aligned}$$

El código FRAPCON-3, sin embargo, incluye un único coeficiente, D_F , en todo el rango de temperatura

$$D_F = f(\text{Bu}) \cdot \left[2.14 \cdot 10^{-13} \exp\left(\frac{-22884 \cdot E}{T}\right) \right] \quad (5)$$

Este coeficiente, similar a D_{mid} , introduce dos parámetros adicionales: un pre-factor que es función del quemado ($f(\text{Bu})$) y un factor multiplicativo de la energía de activación (E). En caso de que el valor del coeficiente de difusión sea inferior al que se obtendría usando D_{low} , se adopta éste. La figura 1 compara las ecuaciones (2)-(5) e ilustra la importancia de la irradiación del combustible en el coeficiente de difusión.

El gas que alcanza el borde de grano puede disolverse de nuevo en la matriz. FRAPCON-3 contempla esta posibilidad y la integra en las propias condiciones de contorno de la ecuación de difusión de acuerdo con Forsberg et al. (1994). Sin embargo, el código considera que esta reincorporación al seno del grano no afecta al potencial de difusión existente y asume que se liberaría al alcanzar condiciones de saturación en la frontera de grano.

Tanto los coeficientes de difusión como la tasa de redisolución se han variado respecto a los valores originales a fin de lograr una mejor respuesta del modelo frente a los datos experimentales disponibles. Con este mismo propósito, el código FRAPCON-3 incorpora componentes adicionales a la liberación. Por un lado, en caso de no llegar a la concentración umbral de liberación en el borde de grano o predecir liberaciones muy pequeñas, se impone un valor más elevado (Rausch et al., 1979). Por otro, se incorpora una nueva contribución que

aumenta la liberación en combustibles de alto quemado con liberaciones de gases inferiores al 5%.

El modelo de FRAPCON-3 así descrito será denotado como CR.

Modificaciones propuestas

El modelo de liberación de FRAPCON-3 tiene numerosos parámetros de ajuste extrínsecos a la formulación original y, a menudo, exentos de significación física. Su eliminación da lugar a lo que se ha llamado caso base (CB).

La fracción de gas que ingresa en el grano de combustible vía redisolución se añade a la concentración de gas intragranular y, por tanto, estimula la difusión. Este hecho, así como su desaparición del inventario a liberar en caso de alcanzar la condición de saturación (tal cual lo supone FRAPCON-3 originalmente), influye en la cantidad total de gases liberados.

El tamaño del grano, a , varía en función de la temperatura y la irradiación. Este hecho, ignorado inicialmente en FRAPCON-3, se ha incorporado según las correlaciones derivadas por Ainscough et al. (1973/74), donde se tiene en cuenta la influencia de la irradiación (Bu_f):

$$\frac{da}{dt} = \frac{k}{4} \left[\frac{1}{a} - \frac{(1 + 0.002\text{Bu}_f)}{a_{\text{max}}} \right] \quad (6)$$

El coeficiente k se ha obtenido mediante ajuste frente a datos experimentales entre 1573 y 2713 K; a es el tamaño máximo de grano.

En el presente artículo los resultados derivados de estas modificaciones se denotan como CA.

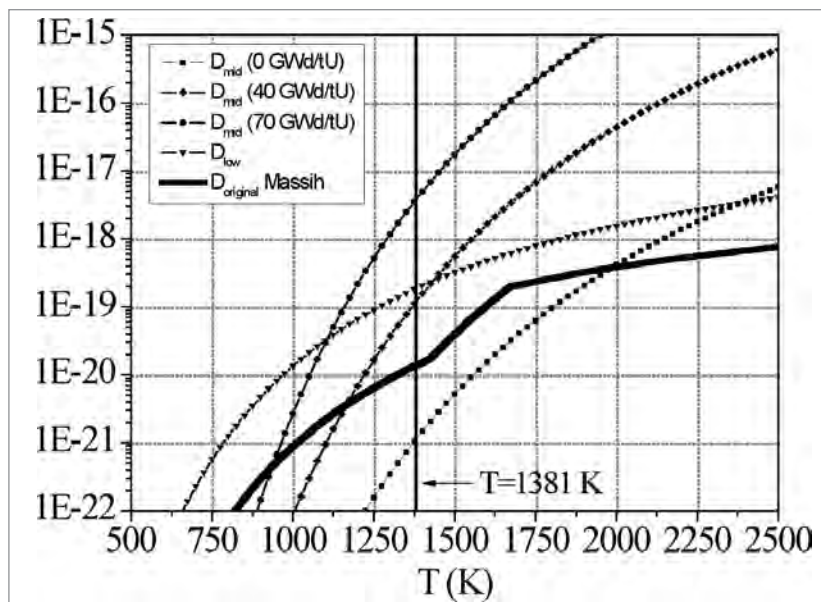


Figura 1: Coeficiente de difusión original de Massih y de FRAPCON-3.

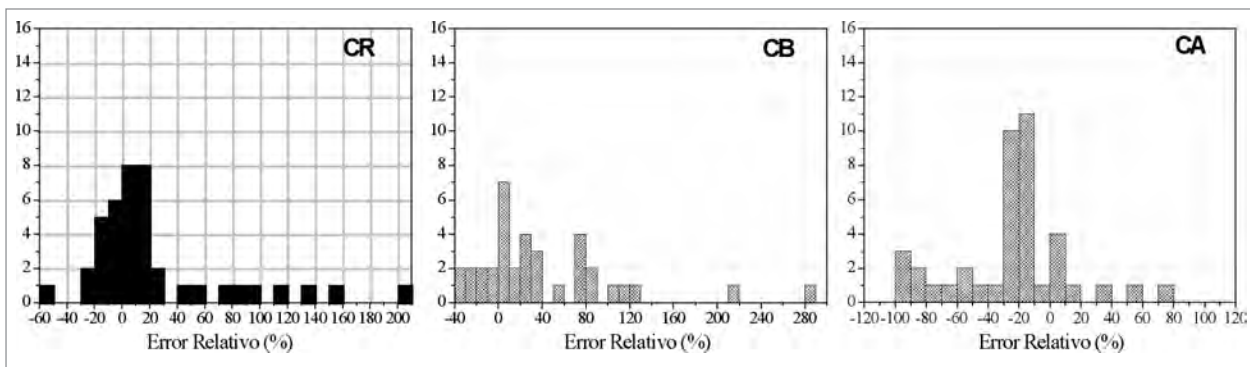


Figura 2: Distribución de errores relativos.

Validación de FRAPCON-3 (CB) y la formulación alternativa (CA)

Con objeto de valorar las modificaciones propuestas, los resultados de la formulación alternativa (CB, CA) y del modelo original (CR) se han comparado con una base de datos extendida respecto a la considerada por los creadores de FRAPCON-3. Para ello se han incluido 18 nuevos casos, la mayoría procedentes de la base de datos IFPE (Internacional Fuel Performance Experiments) de la NEA (<http://www.nea.fr/html/science/fuel/ifpelst.html>). Los resultados se recogen en la figura 2.

La desviación promedio de FRAPCON-3 (CR) es de un 33%, aproximadamente. La mayor parte de los casos manifiestan un error relativo inferior al 30%, estando el mayor error asociado a quemados elevados (50-60 GWd/tU) con liberaciones bajas (<10%). Al eliminar los parámetros y correlaciones de ajuste introducidos "ad-hoc" para considerar el efecto del quemado en la difusión (CB), resulta una dispersión de la distribución de error, con un sustancial incremento del error positivo (i.e., gran sobrestimación de la liberación). Finalmente, al incluir el crecimiento de grano

y una redefinición de la redisolución en FRAPCON-3 se observa una redistribución de errores tendente hacia mayores subestimaciones de la liberación a altos quemados; no obstante, el error promedio es similar (34.9%) al inicialmente exhibido por FRAPCON-3.

En resumen, estos resultados reflejan que el modelo de difusión de FRAPCON-3 es muy dependiente de parámetros y correlaciones ligados a la base de datos usada para su validación. La precisión actual del código podría mantenerse prescindiendo de tales factores de ajuste, introduciendo una nueva gestión del inventario de gases redisoluto y considerando el crecimiento del grano durante la irradiación.

TRANSPORTE AXIAL DE GASES DE FISIÓN

La liberación de gases de fisión conduce inexorablemente al empeoramiento de las condiciones de transferencia de calor a través del huelgo (las conductividades térmicas del Xe y Kr son aproximadamente 20 veces menores que la del helio). Esta degradación provoca el aumento de temperatura del combustible, lo cual favorece la liberación. Esta realimentación tiene particular importancia

en el caso de rampas, donde los tiempos de liberación de gases y los de homogeneización de la composición del huelgo pueden ser sustancialmente distintos.

La naturaleza radial de las ecuaciones en la mayoría de los códigos actuales de barra impide la consideración realista de la situación planteada y obliga a adoptar la hipótesis de mezcla instantánea. En determinadas circunstancias, se ha estimado que esta aproximación podría conducir a subestimaciones de hasta

2000C en la temperatura del combustible y, por ende, a predicciones no conservadoras de la liberación local de gases de fisión. No obstante, la influencia disminuye con el aumento del quemado dado que la contaminación relativa del huelgo, así como la importancia de éste en la resistencia térmica a la transferencia, serán menores según avanza la irradiación.

Dependencia temporal

La homogeneización del huelgo tras una liberación local es consecuencia del transporte axial de gases, fundamentalmente difusión y convección. La rapidez del proceso global está condicionada por variables tales como la presión de llenado de la barra, la presión pre-liberación, la cantidad de gases liberados, la región de liberación y la longitud de la barra. Experimentos realizados (Killeen et al., 1986; Vitanza et al., 1983) demostraron que la mezcla de gases en el huelgo no es instantánea. Por el contrario, la dilución de los gases liberados está sujeta a una cinética que, finalmente, determina un transitorio térmico en el combustible. En la Figura 3 aparece el comportamiento térmico real comprendido entre dos situaciones asintóticas: acumulación local del gas liberado y mezcla instantánea.

Modelo de transporte

El transporte axial de gases en el interior de barras combustibles exige la consideración de los fenómenos inductores, tanto difusivos como convectivos. No obstante, existen algunos modelos (Kinoshita, 1982; Wallin et al., 1994) que sólo contemplan los gradientes de concentración (i.e., difusión) como fuerza motriz. Frente a ellos, los modelos difuso-convectivos (Nakamura et al., 1984; Nakajima, 1985), más completos en su concepción, añaden una complejidad adicional: el tratamiento conjunto de difusión y convección. En cualquier caso, todos los modelos tratan exclusivamente condiciones de huelgo abierto y suponen difusión gaseosa binaria (i.e., Xe-He y Kr-He).

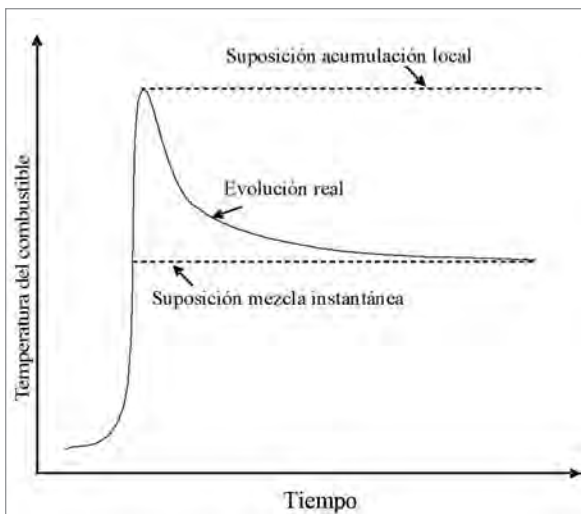


Figura 3: Transitorio térmico en el combustible tras una liberación local de gases de fisión

El modelo propuesto por Nakajima (1985) combina dos cualidades que le convierten en el más interesante para su inclusión en códigos de barra: contemplar todos los mecanismos inductores del movimiento axial y desacoplar los procesos difusivos y convectivos. Esto último requiere asumir que, tras la liberación, se produce un equilibrio instantáneo de presiones y, por ende, una redistribución de gases. A partir de ella, se simula la difusión mediante la primera ley de Fick, en su expresión de gasto molar (G) de la especie de gas x (He, Xe o Kr),

$$G_x(j \rightarrow j+1) = F_{j+1} \left[(C_{x,j} - C_{x,j+1}) - (\bar{C}_{x,j} - \bar{C}_{x,j+1}) \right] \quad (7)$$

donde F es un valor promediado entre dos nodos adyacentes del producto del coeficiente de difusión y el área de flujo. El primer término de la derecha de la ecuación corresponde a la primera ley de Fick, y el segundo término es la corrección por la diferencia de temperaturas entre los nodos axiales j y $j+1$ (i.e., la concentración del gas $C_{x,j} \neq C_{x,j+1}$).

El modelo de Nakajima, se integró en el código FEMAXI-IV y se validó contra los ensayos REBEKA, comprobando su respuesta frente a variaciones en la presión y la longitud de la barra.

La figura 4 ilustra la aplicación del modelo de Nakajima a un escenario supuesto en el que se libera una cantidad importante de Xe y Kr ($5 \cdot 10^{-4}$ moles) en la zona central (nodo 2 de un total de 3) de una barra inicialmente presurizada con $1,9 \cdot 10^{-2}$ moles de He. A pesar de tratarse de una formulación provisional del modelo (aún en evaluación), la figura permite observar que la homogeneización de la composición en el huelgo supondría períodos prolongados de tiempo, del orden de varios días. Ello señala la posibilidad de realimentaciones térmicas de la liberación de gases, con el consiguiente re-

fuerzo de los gradientes de concentración entre zonas distintas de la barra.

OXIDACIÓN de UO_2 EN ALMACENAMIENTO TEMPORAL EN SECO

La importancia de la difusión durante el almacenamiento en seco del combustible, reside en su vinculación al proceso de oxidación del UO_2 . La conversión de UO_2 a U_3O_8 supone un incremento de volumen de aproximadamente un 33%. El incremento resultante de la tensión sobre la vaina se reconoce como un potencial mecanismo de propagación de fallo en barras de combustible con pequeños defectos (U.S. NRC, 2006).

La difusión es responsable del acceso del agente oxidante al combustible. La difusión hasta la superficie del UO_2 propicia la denominada oxidación superficial, mientras que su difusión en el interior de la matriz de combustible origina la llamada oxidación volumétrica.

Tipos de oxidación

La oxidación del combustible sucede en etapas de acuerdo con el esquema,



donde el compuesto intermedio (U_xO_y) depende de la irradiación del combustible (i.e., U_3O_7 para $Bu \leq 8$ GWd/tU; U_4O_9 para 20 GWd/tU $\leq Bu \leq 50$ GWd/tU).

En la oxidación superficial el agente oxidante ataca al UO_2 en la interfase gas-sólido, de modo que el proceso global consta de dos etapas: difusión en fase homogénea gaseosa y reacción química. Este tipo de oxidación, típico de la primera etapa de oxidación (U_3O_7) de pastillas no irradiadas, manifiesta una cinética lineal. Algunos investigadores (Taylor et al., 1980; Tempest, 1988) atribuyen este

comportamiento a la formación de micro-grietas en superficie como resultado de la propia oxidación. A través de ellas, el oxígeno seguiría teniendo acceso directo a superficies de UO_2 , sin necesitar difundirse en estado sólido.

En la oxidación volumétrica, además de la reacción química en la interfase gas-sólido, se produce reacción en el seno de la matriz de combustible, en la interfase sólido-sólido entre el UO_2 original y una capa superficial más oxidada. Como resultado se añade una etapa más al proceso: difusión en estado sólido. En este caso, la cinética de oxidación se transforma en parabólica.

La oxidación de combustibles irradiados se caracteriza por cinéticas parabólicas cuya primera etapa (U_4O_9) es rápida. Esta celeridad se atribuye al fácil acceso que el agente oxidante tiene al seno de la pastilla, gracias a las burbujas gaseosas situadas en los bordes de grano (Thomas et al., 1989) y a la formación vías intergranulares promovida por la fragilización del combustible (Thomas et al., 1991).

La figura 5 muestra las curvas t - T asociadas a oxidación superficial y volumétrica de combustible fresco (Tucker, 1987; McEachern et al., 1998). De acuerdo con lo esperado, la oxidación volumétrica completa requiere tiempos más largos que la superficial.

Propagación de fallo

La propagación del fallo de barras con pequeños defectos ocurre después de un cierto período de tiempo desde el inicio de la oxidación del combustible. Este intervalo temporal se denomina tiempo de incubación. Tres son los factores más importantes que lo determinan:

- La difusión en estado sólido del agente oxidante (oxidación volumétrica).
- La cinética de la reacción
- La ductilidad de vaina

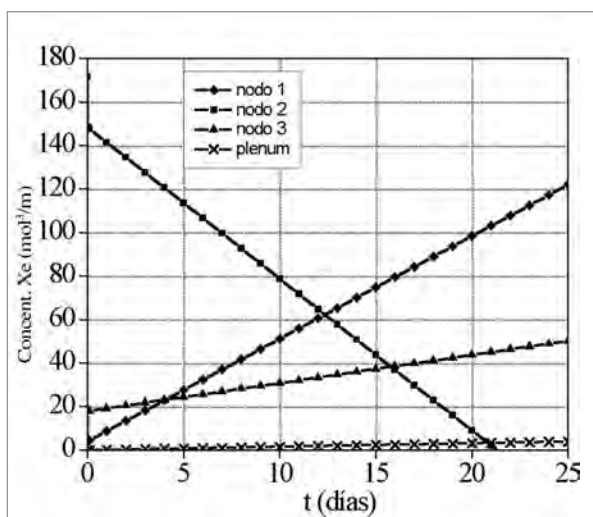


Figura 4: Evolución de la concentración de Xe en una barra combustible tras una liberación súbita postulada.

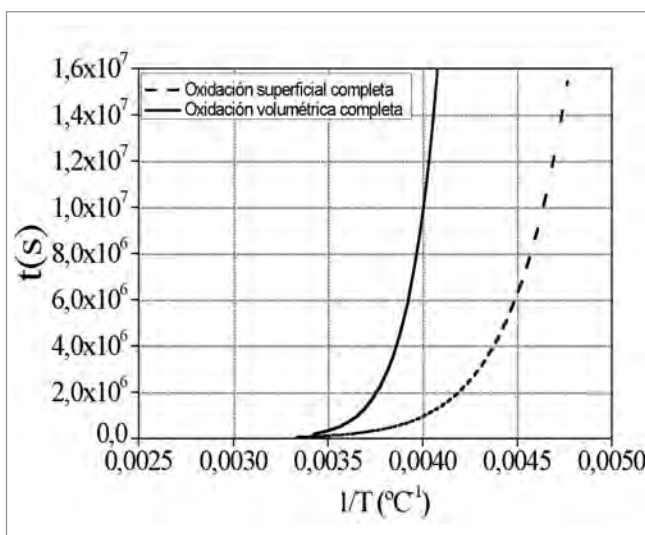


Figura 5: Curvas t - T según el tipo de oxidación.

Todos ellos dependen, a su vez, de la temperatura (Poulesquen et al., 2007; Lee et al., 2001). La figura 6 muestra, en particular, la dependencia del coeficiente de difusión del O_2 (DO_2) en U_4O_9 con la temperatura:

$$D_{O_2} = 10^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-6871,9}{T}\right) R_2=0,78 \quad (7)$$

Por tanto, el tiempo de incubación será función de la temperatura y es así como suele representarse en la literatura. La Figura 7 presenta perfiles t-T para combustibles PWR en distintas condiciones de quemado y tamaños/formas de defectos iniciales de barra (Einziger y Strain, 1986). De todas estas variables la temperatura es la de mayor influencia y, como se dijo anteriormente, refleja en cierta medida el efecto de la temperatura en la difusión del O_2 . Además, la influencia de la difusión podría encontrar otra manifestación en la inversión de la predominancia entre tamaño y forma del defecto. A temperaturas superiores a 2800C la oxidación progresa rápidamente y el tamaño del defecto, si es suficientemente pequeño, podría limitar el acceso de agente oxidante; por ende, mayores tamaños de defecto (0,76 mm) manifestan menores tiempos hasta el inicio de la propagación. Sin embargo, a 2500C la menor velocidad de oxidación provocaría una menor demanda de O_2 , lo que disminuye la importancia del flujo de O_2 y otorga mayor relevancia a la distribución de tensiones en la periferia del defecto (directamente relacionada con su forma).

CONCLUSIONES y PERSPECTIVAS

La difusión de gases tiene una sustancial importancia en el comportamiento de combustible. Existen fenómenos íntimamente relacionados con la seguridad del combustible nuclear, como la libe-

ración de gases de fisión, su transporte axial o la oxidación durante almacenamiento en seco, donde el gradiente de concentración es el potencial inductor de los procesos. CIEMAT, a través de acuerdos de colaboración con CSN y ENRESA, está investigando sobre todos ellos con distinto propósito:

- Dotar los códigos de análisis de comportamiento de combustible, en particular a FRAPCON-3, de nuevas capacidades a través de la mejora de modelos existentes (liberación de gases de fisión) y la inclusión de otros nuevos (transporte axial de gases de fisión durante rampas de potencia).

- Analizar la base de datos existente sobre la potencialidad de propagación de fallo en barras con pequeños defectos debido a la oxidación del combustible durante el almacenamiento en seco.

En relación a la liberación de gases de fisión, además de los trabajos referidos en el presente artículo, se está llevando a cabo un análisis de incertidumbres de los modelos con el fin de estimar la precisión esperable de la actual formulación. Además, se están estudiando posibles modificaciones adicionales relacionadas con la estructura rim del combustible de alto quemado.

En cuanto al transporte axial de gases, se está realizando una programación independiente del modelo de Nakajima que habrá de ser verificada y validada frente a los datos experimentales disponibles. A continuación, se procederá a su implementación en FRAPCON-3.

Respecto a la oxidación del combustible en almacenamiento en seco, se ha analizado la base de datos existente y se están identificando las debilidades existentes, entre las que destaca la ausencia de información a alto quemado. No obstante, la pertinencia de emprender actuaciones concretas en el ámbito de investigación depende de su potencial

como mecanismo de degradación de barras durante el almacenamiento en seco. Este parece ser despreciable frente a otros, tanto por las capacidades de distinguir combustible con defectos y pequeños fallos de los sistemas de inspección como por los avanzados sistemas de vacío, altamente eficientes en el mantenimiento de atmósferas inertes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CSN y ENRESA su apoyo técnico y económico para la ejecución de los proyectos TER-MOCAQ e ICAT.

REFERENCIAS

- Ainscough, J. B., Oldfield, B. W., Ware J.O, "Isothermal Grain Growth Kinetics in Sintered UO_2 Pellets", Journal of Nuclear Materials, 49, 117-128, 1973/74.
- Beek, W.J., Muttzall, K.M.K., van Heuven, J.W., "Transport Phenomena", Ch. IV, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1999.
- Bird, R.B., Steward, W.E., Lightfoot, E.D., "Transport Phenomena", Ch. 21, Wiley-Interscience, New York, 1960.
- Einziger, R.E., Strain, R.V., "Behavior of Breached Pressurized Water Reactor Spent-Fuel Rods in an Air Atmosphere Between 250 and 360°C", Nuclear Technology 75, 82-95, 1986.
- Forsberg K., Massih A.R., "Diffusion Theory of Fission Gas Migration in Irradiated Nuclear Fuel UO_2 ", Journal of Nuclear Materials 135, 140-148, 1985a.
- Forsberg K., Massih A.R., "Fission Gas Release under Time-varying Conditions", Journal of Nuclear Materials 127, 141-145, 1985b.

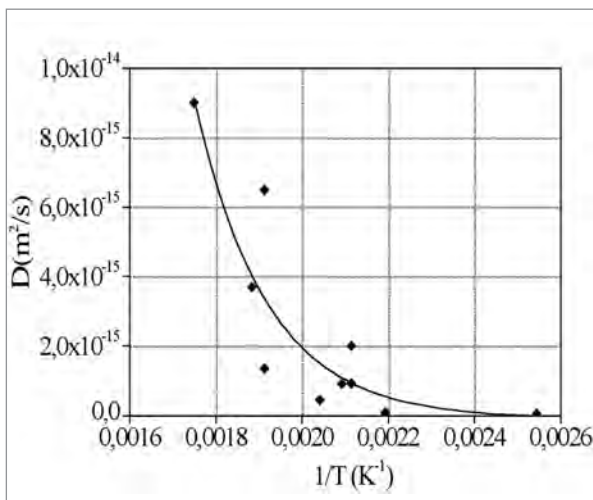


Figura 6: Coeficiente de difusión del O_2 en U_4O_9 .

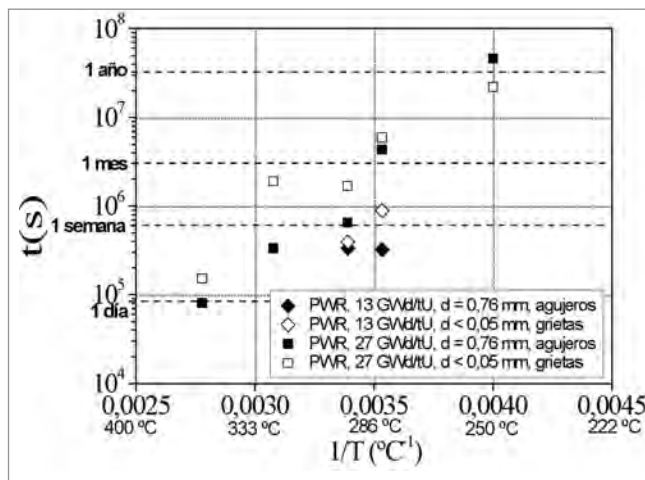


Figura 7: Curvas t-T para tiempo de inicio de propagación de fallo en barras PWR. (d: diámetro o longitud característica del defecto).

- Forsberg, K., Lindstrom F., Massih A.R., "Modelling of Some High Burnup Phenomena in Nuclear Fuel", IAEA Technical Committee Meeting on Water Reactor Fuel Element Modelling at High Burnup and its Experimental Support, Windermere, England, 1994.
- Killeen, J.C., Haaland, A., "Mixing of Argon and Helium in the Interior of a Fuel Rod", HWR-186. OCDE Halden Reactor Project, 1986.
- Kinoshita, M., "Axial Transport of Fission Gas in LWR Fuel Rods", IAEA Specialist Meeting on Fuel Element Performance Computer Modelling. Preston, England, 1982.
- Lee, K. W., Kim, S. K., Kim, K. T., Hong, S.I., "Ductility and strain rate sensitivity of Zircaloy-4 nuclear fuel claddings", Journal of Nuclear Materials, 295(1), 21-26, 2001.
- McEachern, R.J., Taylor, P., "A review of the oxidation of uranium dioxide at temperatures below 400°C", Journal of Nuclear Materials 254, 87-121, 1998.
- Nakajima, T., "FEMAXI-IV: A Computer Code for the Analysis of Fuel Rod Behaviour Under Transient Conditions", Nuclear Engineering and Design 88, 69-84, 1985.
- Nakamura, M., Hiramoto, K., Maru, A., "Evaluation of LWR Fuel Rod Behaviour under Operational Transient Conditions", Nuclear Engineering and Design 80, 49-63, 1984.
- Olander, D.R., "Fundamental Aspects of Nuclear Reactors Fuel Elements", US. DOE, Natl. Technical Information Serv., ISBN 0-87079-031-5 (v.1), 1976.
- Poulesquen, A., Desgranges, L., Ferry, C., "An improved model to evaluate the oxidation kinetics of uranium dioxide during dry storage", Journal of Nuclear Materials 362, 402-410, 2007.
- Rausch, W.N., Panisko, F.E., "ANS54: A Computer Subroutine for Predicting Fission Gas Release", NUREG/CR-1213, PNL-3077, Pacific Northwest Laboratory. Richland, Washington, 1979.
- Rusch, C.A., Kennard, M.W., Frankl I., "Nuclear fuel performance: Trends, remedies and challenges", in press in Journal of Nuclear Materials, 2007.
- Spino, J., Papaioannou, D., Glatz, J. P., "Comments on the Threshold Porosity for Fission Gas Release in High Burn-up Fuels", Journal of Nuclear Materials, 328, 67-70, 2004.
- Taylor, P., Burgess, E.A., Owen, D.G., "An X-ray Diffraction Study of the Formation of $\square$ -UO_{2.33} on UO₂ Pellet Surfaces in Air at 229 to 275°C", Journal of Nuclear Materials, 88, 153-160, 1980.
- Tempest, P.A., Tucker, P.M., Tyler, J.W., "Oxidation of UO₂ Fuel Pellets in Air at 503 and 543 K Studied Using X-ray Photoelectron Spectroscopy and X-ray Diffraction", Journal of Nuclear Materials, 151, 251-268, 1988.
- Thomas, L.E., Einziger, R.E., Wooldley, R.E., "Microstructural Examination of Oxidized Spent PWR Fuel by Transmission Electron Microscopy", Journal of Nuclear Materials, 166, 243-251, 1989.
- Thomas, L.E., Slagle, O.D., Einziger, R.E., "Nonuniform Oxidation of LWR Spent Fuel", Journal of Nuclear Materials, 184, 117-126, 1991.
- Tucker, P.M., "The effect of oxygen partial pressure on the kinetics of unirradiated UO₂ oxidation", Proceedings of a workshop held at Berkeley Nuclear Laboratories, 7-9 April. 1, 49-84, 1987.
- U.S.NRC, "Potential rod splitting due to exposure to an oxidizing atmosphere during short-term cask loading operations in LWR or other uranium oxide based fuel", Interim Staff Guidance – 22, May 2006.
- Vitanza, C., Johnsen, T., Aasgaard, J.M., "Interdiffusion of Noble Gases. Results of an Experiment to Simulate Dilution of Fission Gases in a Fuel Rod", HPR-295, OECD Halden Reactor Project, 1983.
- Wallin, H., Serna, J.J., "Mixing of Fill Gas and Fission Gases in Fuel Rods", HWR-360. OECD Halden Reactor Project, 1994. ■

LAS CENTRALES NUCLEARES EN Experiencias y perspectivas

2007

NUCLEAR POWER PLANTS

Experiences and Prospects

27 de febrero de 2008
February 27th, 2008

Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Industriales
Salón de Actos

