

FRAGILIZACIÓN POR IRRADIACIÓN DE LOS ACEROS DE VASIJAS DE REACTORES

J. BROS

Partiendo del hecho histórico que supuso la decisión de cerrar la central de Yankee Rowe, motivada por las incertidumbres sobre el estado de fragilización de la vasija del reactor, el presente artículo revisa las bases técnico-científicas del mencionado fenómeno degradatorio y, de forma generalista (incluido el caso de España), refiere la evolución que ha experimentado el seguimiento / vigilancia de dicha fragilización neutrónica en vasijas de reactores.

INTRODUCCIÓN

La decisión de Yankee Atomic Co de cerrar la central de Yankee Rowe, motivada por las incertidumbres sobre el estado de fragilización de la vasija del reactor, significó, para muchos, tomar conciencia de un mecanismo de degradación – la fragilización por irradiación neutrónica – que se demostraba tan contundente como para obligar a parar la operación de un reactor de forma definitiva.

Procede, cuanto antes, retroceder hasta los últimos años de la década de los 60's con ya un buen número de reactores nucleares en operación. Es entonces cuando se constata, por primera vez, la importancia de las impurezas y de los elementos residuales, cobre y fósforo, en el aumento de la sensibilidad a la fragilización por irradiación neutrónica de los aceros de vasija.

La constatación de este hecho marcó un antes y después en la tecnología de las vasijas de reactores y supuso el punto de partida de los primeros programas de vigilancia de la fragilización que caminaron/caminan de la mano de un cada día mayor conocimiento de cuáles son los mecanismos que traducen el impacto de la neutrones en la estructura cristalina del acero, en pérdida de tenacidad y, por tanto, en una mayor limitación de las condiciones, presión-temperatura, bajo las que el reactor puede ser operado.

EFFECTOS MACROSCÓPICOS DE LA IRRADIACIÓN

A la temperatura de operación normal, el acero de la vasija es un mate-

rial muy dúctil, es decir, requiere niveles muy altos de energía para romperse. Su comportamiento sólo es frágil a muy bajas temperaturas.

No obstante lo anterior, bajo condiciones de irradiación neutrónica, estos mismos aceros, en particular si contienen niveles considerables de cobre, níquel y fósforo, pierden esa condición de dúctiles y pueden comportarse como frágiles a mayores temperaturas de las que se requerían antes de ser irradiados.

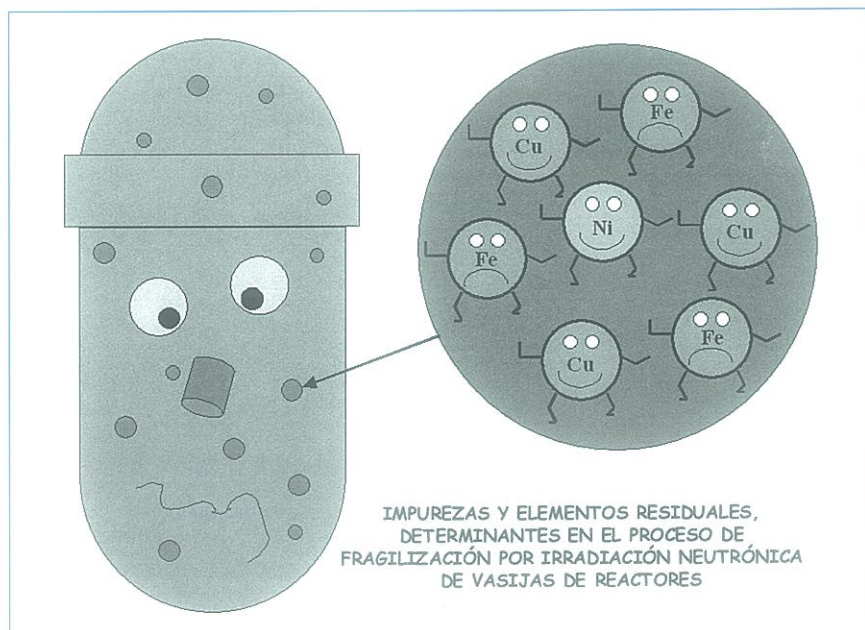
La vasija de la central de Yankee Rowe contenía, en demasía, niveles altos de los elementos residuales indicados.

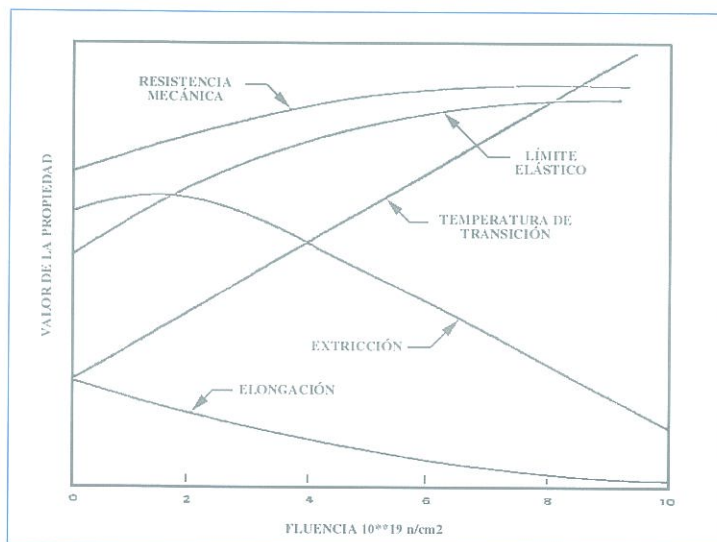
Una forma habitual de medir ese comportamiento lo constituye el ensayo de resiliencia, en el que es medida

la energía absorbida, en la rotura, por una probeta Charpy estándar al ser golpeada por una masa conocida situada en el extremo de un péndulo.

La temperatura a la que la energía rompe una probeta Charpy es de 40 julios y es frecuentemente tomada como punto de referencia para monitorizar ese cambio de propiedades. En estas condiciones, el rango de temperaturas para el que la energía precisa para romper las probetas aumenta; se conoce como la zona de transición. En ella la rotura muestra una combinación de dúctil y frágil. La región, a mayores temperaturas en la que el nivel de energía es considerablemente alto y prácticamente constante, se identifica como el nivel superior de energía.

El daño por irradiación neutrónica





Variación de las prioridades mecánicas de los aceros de vasija por irradiación neutrónica.

produce un desplazamiento, hacia mayores temperaturas, de la zona de transición (caracterizada mediante la temperatura correspondiente a los 40 julios) y produce un descenso en el nivel superior de energía.

En esa degradación de las propiedades del acero de la vasija al que incide directamente en la operación del reactor, concretándose, ese impacto, es el establecimiento de las curvas límite, presión-temperatura, de operación tanto para condiciones de prueba como de operación normal del reactor.

Aunque se ha expuesto el impacto de la fragilización por irradiación neutrónica en términos de ese desplazamiento de la zona de transición y descenso del nivel superior de energía,

material de la vasija se obtiene a partir de correlaciones, suficientemente aceptadas, que parten de esa temperatura de referencia reseñada.

No obstante lo anterior, apuntar los recientes desarrollos que solventan esa imposibilidad de la medida de la tenacidad haciendo uso de probetas tan pequeñas como, por ejemplo, las probetas Charpy preagrietadas de tamaño estándar.

EFFECTOS MICROSCÓPICOS

Los efectos macroscópicos anteriores, en última instancia los definitorios del estado de fragilización de la vasija,

debe apuntarse aquí, y antes de proseguir, que la referencia al ensayo de resiliencia se hace ante la imposibilidad práctica, por el tamaño de las probetas requeridas, de medir directamente la tenacidad. Propiedad ésta que realmente proporciona la resistencia a la rotura de un componente agrietado. Ante esa imposibilidad, el valor de la tenacidad del

encuentran su justificación en los cambios microestructurales que se producen en el acero al recibir el impacto de los neutrones.

El primero de los cambios microestructurales a mencionar es la formación de precipitados ricos en cobre. El segundo, la conformación de pequeñas agrupaciones de defectos puntuales, probablemente asociados con impurezas intersticiales como oxígeno, carbono y nitrógeno.

Ambos, los precipitados ricos en cobre y la agrupación de defectos, actúan como obstáculos al movimiento de dislocaciones. Las dislocaciones son las que permiten las deformaciones plásticas (comportamiento dúctil), e impedir su movimiento supone el endurecimiento y fragilización del material que continuará hasta que todo el cobre presente en el acero precipite.

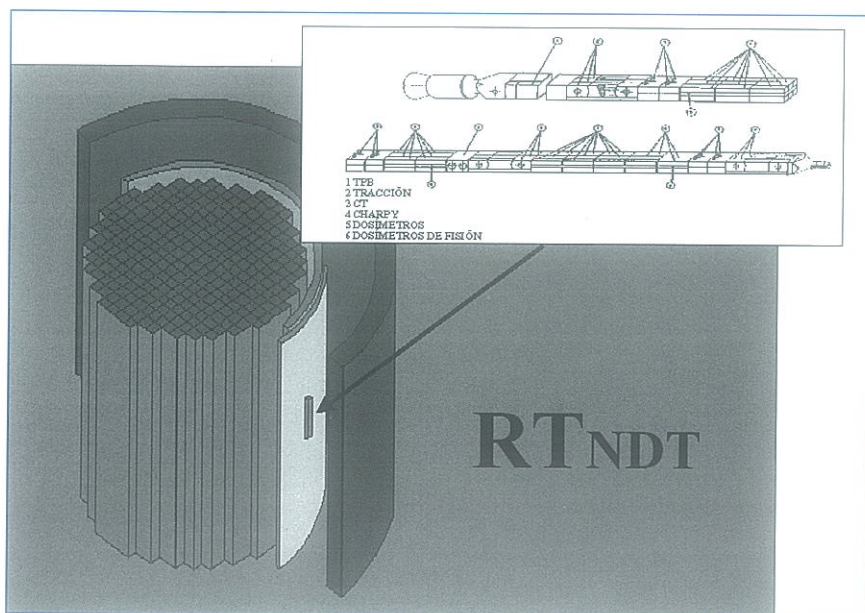
PREDICCIÓN Y VIGILANCIA DE LA FRAGILIZACIÓN

Los primeros intentos de regular las predicciones del impacto de la irradiación neutrónica en los aceros de vasijas, y más concretamente de las predicciones del incremento de la temperatura de referencia y del descenso del nivel superior de energía reseñados con anterioridad, se producen en 1977 al editarse la USNRC Regulatory Guide 1.99 Rev. 1. En la guía regulada se proponen correlaciones empíricas que contemplan el contenido en cobre y fósforo del acero así como el flujo neutrónico (neutrones con energía superiores al MeV) acumulado durante un tiempo dado.

Posteriormente, en 1988 se edita la Rev. 2 de esta misma guía reguladora. Su edición fruto del mayor número de datos reales disponibles supone la incorporación del níquel y la desaparición del fósforo como elementos a tener en cuenta. Así mismo, se distingue entre material de soldadura y material base.

El rediseño/reespecificación de las vasijas de reactores como resultado de la constatación de la importancia de la presencia en el acero de elementos residuales como cobre y fósforo conllevó, en paralelo, la regulación/exigencia de dotar a los nuevos reactores (considerados como tales los puestos en operación a partir de mediada la década de los 70's) de un programa de vigilancia de la fragilización por irradiación neutrónica.

La fuente de información fundamental del programa de vigilancia la constituyen las cápsulas de vigilancia



Ubicación y composición de cápsulas de vigilancia.

introducidas en el reactor al inicio de la operación.

Estas cápsulas contienen muestras, en forma de probetas para su ensayo, de los materiales utilizados en la construcción de la vasija, incluyendo aquellos más limitativos correspondientes a las soldaduras, zonas afectadas por el calor de soldadura y material base de la zona de la vasija directamente enfrentada al núcleo del reactor. Las cápsulas, que adicionalmente contienen dosímetros neutrónicos, se ubican tan cerca como es posible de la vasija para minimizar los efectos de las tasas de irradiación, pero, en cualquier caso, para adelantarse y monitorizar el daño sufrido por la vasija al ser extraídas del reactor, con la frecuencia especificada, para su ensayo y análisis.

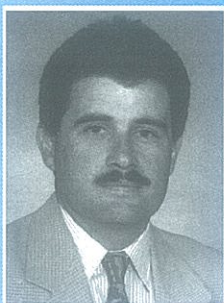
En España, y cuando iban a ponerse en marcha los reactores de la segunda generación de nuestras centrales nucleares, Tecnatom, con el apoyo decidido de C.N. Almaraz y C.N. Ascó, propuso a la entonces Junta de Energía Nuclear, el desarrollo conjunto de me-

todologías de cálculo neutrónico y de procedimientos de ensayo de las probetas contenidas en las cápsulas de vigilancia. Adicionalmente se pusieron a punto instalaciones (J.E.N.) y metodologías de integración de resultados e impacto en la operación del reactor (Tecnatom).

Fruto de esa colaboración, la primera cápsula de vigilancia de C.N.

Almaraz I, extraída al final del primer ciclo de operación, pasó a convertirse en la primera analizada íntegramente en España.

Desde entonces otras muchas han sido las cápsulas extraídas y analizadas, y cabe vanagloriarse de que prácticamente el 70 % de las curvas límite de operación de los reactores nucleares españoles lo sean made in Spain.



Juan Bros, es licenciado en física por la Universidad de Barcelona. Ingresó en Tecnatom en 1982 siendo, en la actualidad, responsable de Ingeniería de Inspección. Son cometidos de esta organización, entre otros, la elaboración de los programas de inspección y pruebas en servicio y la prestación de asistencia técnica en todo lo relacionado con la normativa y práctica aplicable a la inspección y pruebas en servicio, así como la realización de análisis de integridad y de vigilancia de componentes.

(Viene de la página 18)

de las predicciones de la GR 1.99 rev. 2 para el material de la chapa y por debajo para el material de soldadura.

Se ensayaron los hilos dosimétricos para determinar el flujo neutrónico en el punto de la vasija donde estaba colocada la cápsula. La máxima fluencia neutrónica acumulada a los 32 EFPY fue de $4,43 \times 10^{18}$ n/cm².

Cápsula 1: flujo = $4,70 \times 10^9$ n/cm²·s
fluencia = $8,40 \times 10^{17}$ n/cm²

Las probetas Charpy-V se ensayaron a temperaturas seleccionadas para definir la transición de las curvas de fractura del material de la chapa, la soldadura y de la zona afectada térmicamente. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 5.

Tal y como ocurría en el caso de C.N. Garoña, con los resultados obtenidos de la primera cápsula se puede concluir que la fragilización por irradiación neutrónica tampoco es un problema para la vasija de C.N. Cofrentes.

El desarrollo actual del Programa de Vigilancia de C.N. Cofrentes responde a la siguiente situación. En la posición que ocupaba originalmente la cápsula 1 (3°), durante la 7ª Recarga en Abril de 1993, se instaló otra cápsula con 24 nuevas probetas Charpy-V, 6 probetas

miniatura de Tracción, la mitad de metal base y el resto de material de soldadura, e hilos dosimétricos que se reconstruyeron con el material sobrante de las probetas Charpy ensayadas.

Esta nueva cápsula conservará el proceso de irradiación de la vasija y estará disponible para la vigilancia más allá de los 32 EFPY. Los resultados obtenidos con las nuevas probetas Charpy se utilizarán para establecer la variación de la fragilización a la temperatura de referencia de la vasija RT_{NDT}.

La cápsulas 2 y 3 originales todavía permanecen en su posición inicial, 177° y 183°, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Se desea expresar el agradecimiento por la colaboración prestada para la realización de este artículo a I. Gorrochategui y J. Martín (C.N. Garoña), a M. Casar y A. Sala (C.N. Cofrentes) y a J. Bros y A. Ballesteros (Tecnatom), así como a todos aquellos de las Centrales PWR y BWR que han aportado datos para enriquecer este trabajo.



Lorenzo Francia, es Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid (1983) y diplomado en Negocio Energético por ICADE (1994). Durante seis años trabajó en la Cátedra de Tecnología Nuclear de la E.T.S. Ingenieros Industriales en proyectos relacionados con los APS y la evaluación de almacenamientos de residuos radiactivos. En 1990 se incorpora a la Dirección Nuclear de UNESA en el área de Gestión de Residuos Radiactivos, desarrollando en ella su actividad durante tres años. Desde entonces ha estado ligado al área de Operaciones (mantenimiento, repuestos, calificación de equipos, etc.), y, actualmente, es Coordinador del área de Tecnología, siendo responsable de temas como gestión de vida, materiales, proyectos I+D del convenio CSN-Sector, códigos de cálculo y otros desarrollos tecnológicos. Perteneció y participa en varios grupos de trabajo y comités internacionales del OIEA, CSNI de la NEA-OECD y WANO.