

Resultados del trabajo en las celdas calientes del Laboratorio de Ensayos de Materiales Irradiados de Areva del proyecto Carina para la ampliación de la base de datos de características mecánicas de las fracturas en materiales de RPV alemanas irradiados

J. Barthelmes, H. Schnabel, H. Hein, E. Keim y C. Eiselt

En el marco de los proyectos de investigación ya concluidos, Carina y su predecesor, Carisma, se creó una base de datos de los aceros de vasija de presión del reactor (RPV) originales previamente irradiados de los reactores de agua a presión alemanes que permitieron examinar las consecuencias cuando se aplica el método de la curva maestra (T_0) en lugar del concepto RT_{NDT} a la hora de evaluar la seguridad de la vasija. Asimismo, se investigaron las distintas condiciones de irradiación de Carina con respecto a las fluencias neutrónicas y a los parámetros de impacto específicos. Además de una breve introducción sobre el proyecto CARINA y de un resumen de los principales resultados, se incluye una descripción general de los requisitos del trabajo en un laboratorio radiactivo en lo que se refiere a la fabricación de muestras y a los ensayos con materiales, así como ejemplos de realización.

In the frame of the already completed research projects CARINA and its predecessor CARISMA a data base was created for pre-irradiated original RPV steels of German PWRs which allowed to examine the consequences if the Master Curve (T_0) approach instead of the RT_{NDT} concept is applied to the RPV safety assessment. Furthermore in CARINA different irradiation conditions with respect to the accumulated neutron fluences and specific impact parameters were investigated. Besides a brief introduction of the CARINA project and an overview of the main results an overview on the requirements of the hot laboratory work in terms of specimen manufacturing and material testing is given and examples for realization are shown.

INTRODUCCIÓN

La prueba de un margen de seguridad suficiente contra la fractura por fragilidad de la vasija de presión de reactor (RPV) es fundamental para la seguridad de la central nuclear. En Alemania, normalmente se ha aplicado el concepto RT_{NDT} para evaluar la seguridad del RPV con arreglo a las estipulaciones en vigor de las normas de seguridad alemanas KTA. En este concepto se ajusta un límite inferior de resistencia a la fractura—curva de temperatura, que se ha determinado por datos medidos para el material en cuestión mediante la temperatura de referencia específica ajustada a ductilidad nula RT_{NDT} de la transición de fractura por fragilidad.

A parte del método de RT_{NDT} la normativa alemana acepta el uso de valores medidos de resistencia a la fractura y la referencia de temperatura RT_{T0} para establecer la curva tena-

cidad-temperatura. El planteamiento de RT_{T0} (curva maestra) permite una determinación directa de la temperatura de referencia mediante ensayos de mecánica de la fractura y una transferencia más realista de los resultados del ensayo al comportamiento del componente.

Con el fin de comparar la evaluación de la seguridad mediante el concepto RT_{NDT} y el concepto de curva maestra, se creó una base de datos experimental de ensayos de tracción, de impacto Charpy-V, de resistencia a la fractura y de detención de grietas en el proyecto Carisma "Determination of Fracture Mechanics Values on Irradiated Specimens of German PWR Plants" (Determinación de valores de mecánica de la fractura y muestras irradiadas de las centrales nucleares alemanas) [1] que terminó en 2008 y se amplió mediante el proyecto complementario Carina "Characteristics of Irradiated German RPV Materials" [2] (Caracte-

JULIA BARTHELMES

es miembro del Grupo de Comportamiento bajo Radiación de Materiales Ferríticos para Vasijas de Reactores.

HILMAR SCHNABEL

es director del Laboratorio de Celdas Calientes y director del laboratorio certificado para ensayos "Heiße Zellen" (Celdas Calientes, en alemán).

HIERONYMUS HEIN

es director del Grupo de Comportamiento bajo Radiación de Materiales Ferríticos para Vasijas de Reactores.

ELISABETH KEIM

es directora del Departamento de Mecánica de Fracturas, ensayo y comportamiento de materiales bajo irradiación y participante por AREVA en el grupo Mecánica Estructural, Daño y Propiedades y Utilización de Materiales.

CHARLES EISELT

es miembro del Grupo de Comportamiento bajo Radiación de Materiales Ferríticos para Vasijas de Reactores.

rísticas de los materiales irradiados de RPV alemanas) que finalizó en 2012. Esta base de datos se creó a partir de trece materiales previamente irradiados que eran representativos de las cuatro líneas de construcción de centrales nucleares alemanas. Los materiales han sido irradiados a temperaturas que van de 283 °C a 303 °C, con fluencias neutrónicas rápidas de $5,44 \times 10^{18}$ a $7,67 \times 10^{19}$ n/cm² ($E > 1$ MeV) y con flujos neutrónicos de $2,64 \times 10^{10}$ a $2,55 \times 10^{12}$ cm⁻² ($E > 1$ MeV). Los ensayos de Carisma y Carina se efectuaron en las células calientes del laboratorio radioquímico de Areva GmbH, en Erlangen.

DESCRIPCIÓN GENERAL DE CARINA

El proyecto de investigación Carina "Extension of the Data Base for Fracture Mechanical Characteristics of Irradiated German RPV Materials—Application of the Master Curve Approach for Neutron

Fluences in the Upper Bound" [2] (Ampliación de la base de datos de características mecánicas de la fractura de materiales de RPV alemanas irradiados-Aplicación del método de curva maestra para las fluencias neutrónica en el límite superior) tuvo una duración de cuatro años. El proyecto fue financiado por VGB (Asociación de utilities alemanas), el Ministerio de Economía y Tecnología alemán (número de patrocinador 1501357), NPP Gösgen (Suiza) y NPP Ringhals/Vattenfall (Suecia).

Los objetivos principales fueron:

- Ampliación de la base de datos Carisma con materiales suplementarios irradiados a fluencias neutrónica más altas, con diferentes condiciones de irradiación (más de 5×10^{19} n/cm², $E > 1$ MeV).
- Estudio de posibles efectos de irradiación específicos como fases de fluorescencia tardía y flujo neutrónico mediante especímenes irradiados en cápsulas de gradientes.
- Aplicación del método de curva maestra a los RPV con tiempos de funcionamiento largos y después de la vida útil, respectivamente.

También se aportan algunos de los materiales de muestra de los exámenes microestructurales suplementarios para obtener una visión completa del comportamiento ante la irradiación de los materiales en cuestión.

En la Tabla 1 se especifican los materiales utilizados en el ensayo. Las muestras se irradiaron en el reactor experimental VAK y en un PWR, respectivamente.

LABORATORIO DE CELDAS CALIENTES DE AREVA GMBH

El laboratorio radioquímico de Areva GmbH se compone de la zona de celdas calientes, con dos celdas sólidamente blindadas con hormigón para el desarrollo de actividades hasta peta-Bq y ocho celdas blindadas con plomo, y de la zona química y radioquímica, para efectuar exámenes físicos y químicos. Las actividades del laboratorio radioquímico incluyen el examen y análisis de muestras para la vigilancia de la irradiación de la RPV, los exámenes tras la irradiación de análisis de fallos de muestras altamente radiactivas y componentes del grupo de elementos combustibles de centrales nucleares, los servicios de análisis radioquímicos competentes de materiales con bajos y altos niveles de radioactividad procedentes de plantas nucleares, y proyectos y servicios de clausura de otras instalaciones nucleares. Los labora-

Material	Code	Type	Cu [%]	p [%]	Ni [%]
22NiMoCr3-7 JSW (3rd generation, Pre Convoy)	P150	BM	0.05	0.008	0.83
22NiMoCr3-7 JSW (3rd generation, Pre Convoy)	P150	HAZ	0.05	0.008	0.83
22NiMoCr3-7 Klöckner (1 st and 2 nd generation)	P151	BM	0.09	0.007	0.97
22NiMoCr3-7 Klöckner (1 st and 2 nd generation)	P151	HAZ	0.09	0.007	0.97
Molytherme Electrode Suizer (1st generation)	P152	WM	0.03	0.015	0.08
20MnNi5-5 JSW (4 th generation)	P142	BM	0.06	0.009	0.8
S3NiMo1/OP41TT GHG (4 th generation)	P142	WM	0.06	0.012	0.9
S3NiMo3/OP41TT Udcomb (3 rd generation)	P16	WM	0.08	0.012	1.69

Tabla 1. Materiales utilizados en el proyecto Carina.

torios citados cuentan con una acreditación válida conforme a la norma ISO 17025. El laboratorio dispone de cofres tipo A y licencia para el transporte.

Las principales actividades del laboratorio de ensayo acreditado "Heiße Zellen" (celdas calientes, en la figura a) pueden resumirse del siguiente modo:

- Exámenes de materiales utilizados en los programas de vigilancia de la vasija de presión de reactor (RPV), de conformidad con KTA 3203, por ejemplo.
- Ensayo de muestras de mecánica de la fractura de varias formas y tamaños en el marco de los programas de vigilancia de RPV con arreglo a conceptos de mecánica de fractura específicos.
- Examen de materiales y ensayo de distintos materiales y componentes de la fabricación.

- Ensayos de resistencia a la radiación de juntas de plástico y adhesivas, así como de materiales de aislamiento y recubrimiento de cables.
- Fabricación de muestras de tensión y mecánicas de la fractura para ensayos Charpy utilizando equipo de mecanizado moderno (por ejemplo, máquina de descargas de electrones).
- Fabricación de muestras reconstituidas utilizando la técnica de soldadura con haz de electrones.
- Fabricación de piezas de ensayo de muestras ya ensayadas, piezas de materiales y partes de piezas defectuosas.
- Análisis de fallos de distintos sistemas, por ejemplo, tubos SG, muelles, tornillos y pasadores de anillo central.
- Exámenes de la microestructura de materiales metálicos y combustible nuclear, mediante el uso de microscopía óptica, haz iónico focalizado



Figura 1: Celda de ensayo de materiales en el laboratorio de celdas calientes.

(FIB) y microscopía electrónica de barrido y transmisión (MEB, MET).

- Desarrollo de materiales en colaboración con nuestros clientes, por ejemplo, material para rejillas espaciadoras, con examen de la capa de óxido, la distribución y el contenido de hidrógeno y el cambio geométrico de los componentes.

LABORATORIO CON CELDAS CALIENTES DEL PROYECTO CARINA

Desmontaje de cápsulas y análisis radioquímicos

Para crear muestras, tras su recepción se abrieron los monitores de temperatura y detectores de neutrones disponibles para realizar el ensayo, para practicar la inspección visual y para efectuar análisis radioquímicos, respectivamente, las cápsulas de VAK y las cápsulas de vigilancia en el laboratorio de celdas calientes de Areva GmbH, en Erlangen (Figura 2).

Cuando fue necesario, se determinó después la actividad de los detectores de fluencia neutrónica mediante el análisis radioquímico.

Fabricación y ensayo de las muestras

Una parte importante del trabajo de las celdas calientes es la preparación y fabricación de muestras, especialmente de muestras de PCCV utilizadas para el ensayo T_0 y de muestras específicas utilizadas para la prueba de detención de grieta.

En los casos necesarios, se fabricaron muestras de PCCV mediante EDM a partir de muestras de WOL o mediante la técnica de reconstitución a partir de mitades de muestras fracturadas. Las grietas por fatiga se crearon mediante una carga de vibración de alta frecuencia utilizando una máquina de ensayo de resonancia.

Para el ensayo de detención de grietas, además de las muestras de detención de grietas compactas (CCA) también se utilizaron las muestras denominadas "Dúplex" [4].

Todas las soldaduras se realizaron con el sistema de soldadura con haz de electrones (EBW).

Los ensayos de materiales del proyecto Carina se han ajustado a las normas que se especifican a continuación:

- Ensayos de tracción de conformidad con la norma DIN EN ISO 6892-1 y -2 (Método B).
- Ensayos instrumentados Charpy-V de conformidad con las normas DIN EN ISO 148-1 y 14556.
- Ensayos de PCCV de resistencia a la fractura (inicio de grietas) de conformidad con la norma ASTM E 1921 (Figura 3).

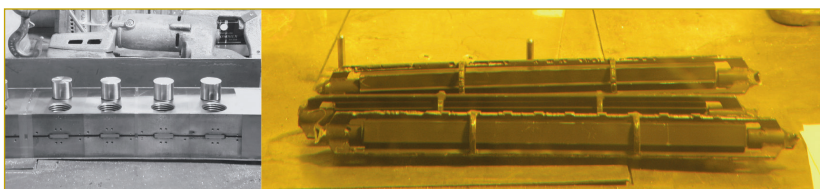


Figura 2: Cápsula de VAK y cápsulas de vigilancia desmontadas mostrando su estado en el momento de la entrega.

- Ensayos de muestras CCA y Dúplex de detención de grietas de conformidad con la norma ASTM E 1221.

Exámenes analíticos

Debido a la baja fragilización por irradiación de los materiales de P15X a $1,2 \times 10^{19}$ n/cm² ($E > 1$ MeV) algunos exámenes analíticos se han efectuado con el objetivo de excluir algunas causas posibles de este comportamiento.

- Mediciones de actividad (Co-60 en P150 BM) cuyo resultado indica que la actividad es acorde con la fluencia neutrónica acumulada en las muestras.
- Análisis químicos mediante espectroscopia de emisión de chispas cuyo resultado indica que no existen divisiones significativas en las muestras de composiciones químicas.

Exámenes metalográficos

Se han efectuado algunos exámenes metalográficos de las superficies fracturadas de materiales de muestra P150 BM y P151 BM no irradiados

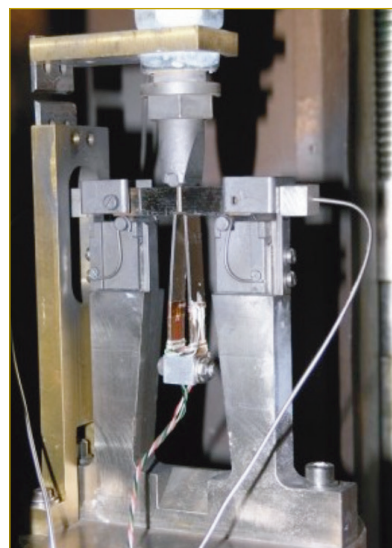


Figura 3: Ensayos de muestras de PCCV.

compuestos de acero 22NiMoCr3-7. En la Figura 4 se muestra que el material P151 BM (fabricación Klöckner) tiene un granulado más grueso que el material P150 BM (fabricación JSW),

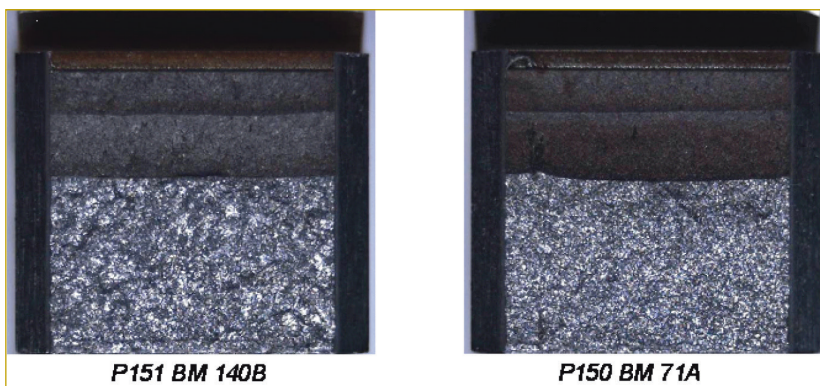


Figure 4: Superficie fracturada de materiales de muestra P150 BM y P151 BM no irradiados ensayados.

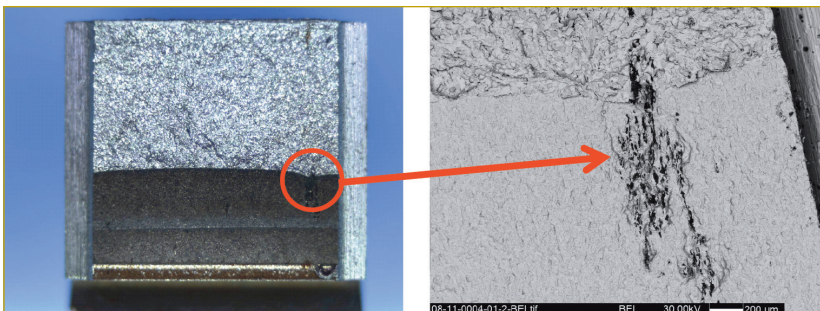


Figure 5: Superficie fracturada de materiales de muestra P150 BM no irradiados ensayados.

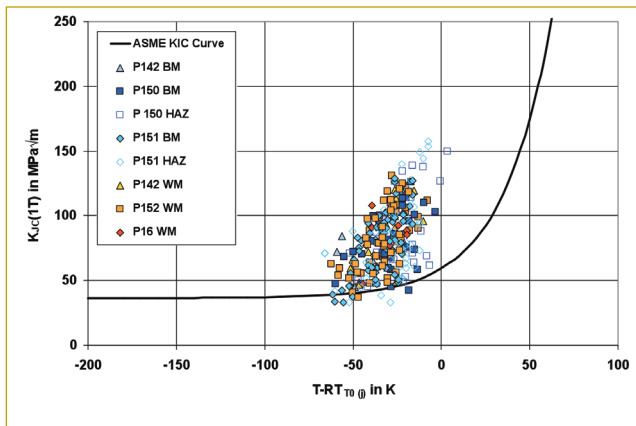


Figura 6: Valores $K_{IC(T)}$ normalizados para $T-RT_{T0(j)}$ en los materiales de Carina, procedentes de [3].

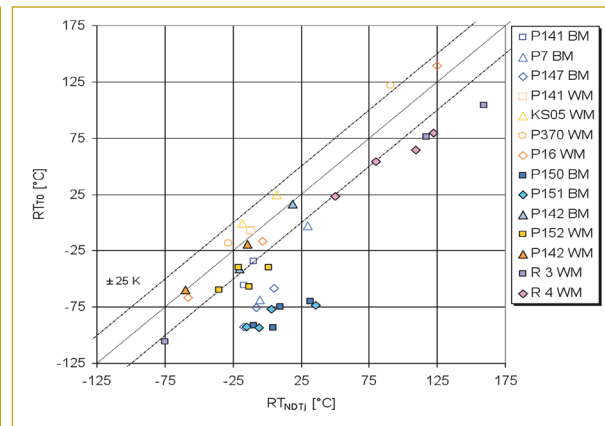


Figura 7: RT_{T0} medida frente a los valores de $RT_{NDT(j)}$ ajustados por fluencia en los materiales de Carina y Carisma, procedentes de [3].

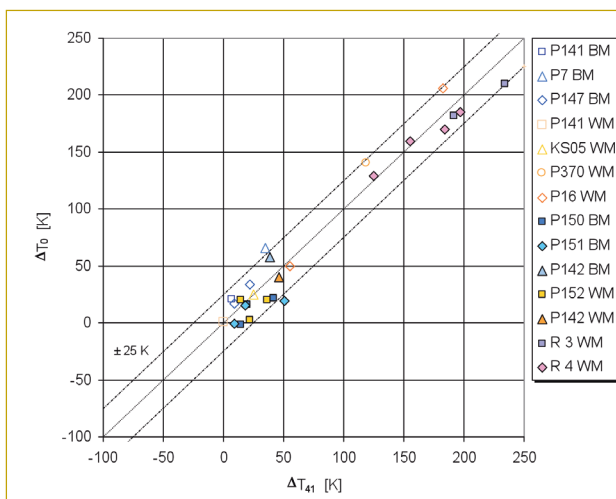


Figura 8: Valores de ΔT_0 medida frente ΔT_{41} ajustados por fluencia de los materiales de Carina y Carisma, procedentes de [3].

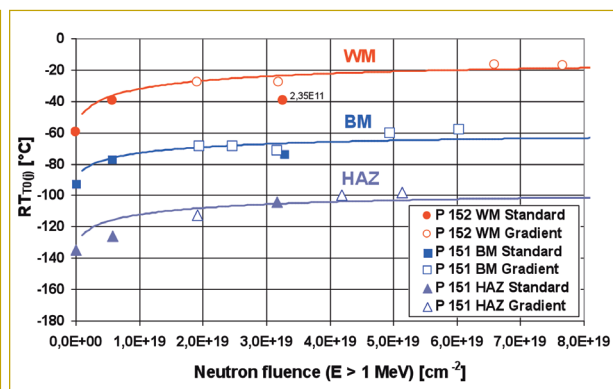


Figura 9: Temperaturas de referencia $RT_{T0(j)}$ medidas de los materiales de CARINA irradiados con distintos flujos de neutrones (cifras de flujos de neutrones en $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $E > 1 \text{ MeV}$), procedentes de [3].

que resalta el impacto del proceso de fabricación en la microestructura.

Además, se estudió en muestras reconstituidas el impacto de inclusiones no metálicas, apreciado en las superficies de las muestras de P150 BM PCCV fracturado no irradiado (Figura 5), sobre los datos de resistencia a la fractura. Sin embargo, no se descubrió un impacto significativo en la resistencia a la fractura.

RESULTADOS DE CARINA

En [2] y [3] puede encontrarse una descripción detallada de resultados del proyecto Carina. Aquí sólo subrayaremos algunos resultados seleccionados.

Un punto de interés relativo a los exámenes de iniciación de grietas fue determinar si los datos de resistencia a la fractura $K_{IC(T)}$ están delimitados por la curva del límite inferior ASME K_{IC} [5], que es importante para las evaluaciones de seguridad.

Como se muestra en la Figura 6, la mayor parte de los datos de resistencia a la fractura de iniciación estática normalizada con $RT_{T0(j)}$ medidos están delimitados por la curva del límite inferior ASME K_{IC} , de manera que la aplicabilidad de la curva queda confirmada por los datos experimentales. Los pocos datos no delimitados se comprobaron a temperaturas muy bajas y también corresponden a materiales con baja T_0 . Como esta región de temperaturas no se alcanza durante el funcionamiento de la planta, estos valores no son importantes para las aplicaciones de evaluación de la seguridad. Asimismo, los puntos de datos relacionados con $K_{IC(T)}$ inferiores 50 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ no están comprendidos en el rango de mediciones relevantes para la seguridad.

Comparando las temperaturas de referencia de los dos conceptos distintos, puede apreciarse una ventaja principal del método de curva maestra / RT_{T0} tal como se presenta en

la Figura 7, en la que se muestra la $RT_{T0(j)}$ media frente a la $RT_{NDT(j)}$ ajustada por la fluencia en los materiales utilizados en los proyectos Carina y Carisma. En los materiales de base, el método RT_{T0} implica unas temperaturas de referencia notablemente inferiores a las del concepto RT_{NDT} , aunque éste no es el caso de los materiales de soldadura, en los que la tendencia general de $RT_{NDT(j)} > RT_{T0(j)}$ es menos pronunciada o no se observa en absoluto. Este comportamiento conservador de RT_{NDT} de los materiales de base está provocado por los “ensayos de aceptación” en el estado inicial, que hacen que el ensayo de impacto por caída de los materiales de base conduzca generalmente a la temperatura NTD. En el ensayo de impacto por caída se aplica un cordón de soldadura al material de base, que provoca un cambio en el material y permite medir efectivamente un valor de detención de grietas, a diferencia de los materiales de soldadura en

los que se miden temperaturas NDT menos conservadoras. Así pues, se subraya especialmente el alto conservadurismo del concepto RT_{NDT} en el caso de los materiales de base.

Otro punto de interés fue la correlación entre los cambios de las temperaturas de referencia obtenidas de los ensayos de mecánica de la fractura (ΔT_0) y de los ensayos Charpy-V (ΔT_{41}). En la Figura 8 se muestra una buena correlación 1:1 entre los cambios de ΔT_0 y ΔT_{41} , así los cambios de los dos conceptos distintos ΔT_0 y ΔT_{41} pueden utilizarse de forma equivalente para la determinación de la temperatura de referencia.

Por último, otra cuestión que subrayaron las investigaciones fue la posible existencia del denominado "efecto flujo", que es la dependencia de las propiedades de los materiales del flujo de neutrones en presencia de una fluencia neutrónica determinada. También se dispuso de muestras con fluencias similares y flujos neutrónicos diferentes de las cápsulas de vigilancia ordinarias y de gradientes irradiadas en RPV PWR comerciales. Como puede verse en Figura 9, no se ha podido confirmar el "efecto flujo".

RESUMEN

En el proyecto de investigación Carina, se amplió la base de datos experimental del proyecto Carisma de los conceptos de seguridad RT_{NDT} y curva maestra con materiales representativos suplementarios irradiados en distintas condiciones y con respecto a fluencias neutrónica acumuladas de "límite inferior" y parámetros espe-

cíficos (flujo neutrónico, composición química y efectos de fabricación). El trabajo del laboratorio de células calientes constituyó un aspecto clave del proyecto, especialmente la apertura de las cápsulas, el análisis radioquímico, la fabricación de muestras, los ensayos de material, y los exámenes analíticos, metalográficos y microestructurales.

Mediante los datos de resistencia a la fractura, pudo confirmarse la curva de "límite inferior" ASME K_{Ic} para la iniciación de grietas (fallo de fragilidad). Debido a ello, puede conseguirse un considerable avance en la utilización de curvas de resistencia a la fractura para la evaluación de la integridad de la RPV.

El concepto RT_{T0} dio lugar a temperaturas de referencia más bajas de los materiales de base que el concepto RT_{NDT} . En el caso de los materiales soldados, la tendencia general $RT_{NDT} > RT_{T0}$ es menos pronunciada o no se observa en absoluto. Asimismo se apreció que ΔT_0 and ΔT_{41} muestran una correlación cercana a 1:1. por lo que los conceptos ΔT_0 y ΔT_{41} pueden utilizarse de forma equivalente para la determinación de la temperatura de referencia.

En los materiales de RPV investigados no pudo confirmarse el efecto de flujo neutrónico.

REFERENCIAS

- [1] H. Hein, E. Keim, H. Schnabel, T. Seibert, A. Gundermann, "Final results from the CARISMA project on fracture mechanical assessments of pre-irradiated RPV

steels used in German PWR", 24th ASTM Symposium on Effects of Radiation on Nuclear Materials and the Nuclear Fuel Cycle, June 24-26, 2008, Denver, Colorado

- [2] H. Hein, E. Keim, H. Schnabel, J. Barthelmes, Ch. Eiselt, F. Obermeier, J. Ganswind, M. Widera. "Final Results from the CARINA Project on Crack Initiation and Arrest of Irradiated German RPV Steels for Neutron Fluences in the Upper Bound", 26th ASTM Symposium on the Effects of Radiation on Nuclear Materials, Indianapolis, USA, 12-13 Junio 2013
- [3] H. Hein, E. Keim, E. Bechler, P. Efsing, J. Ganswind, R. Knobel, G. König, P. Barreiro, M. Widera, A. de Jong. "CARINA – A programme for experimental investigation of the irradiation behaviour of German reactor pressure vessel materials", International Journal for Electricity and Heat Generation, VGB PowerTech, Número 5, 2013, p.43-49
- [4] A. Gundermann, E. Keim, F. Obermeier. "Further Development of Duplex Specimens for Measuring Plane Strain Crack Arrest Fracture Toughness", 18th European Conference on Fracture, 30 de agosto – 3 de septiembre 2010, Dresden, Alemania
- [5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2011A Edition, Section XI, Division 1, Appendix A. Article A-4000: Material Properties. ■