

FUSIÓN

EVALUACIÓN DE EXPERIMENTOS DE BLINDAJE CON NEUTRONES DE FUSIÓN REALIZADOS EN FRASCATI

IRENE CANALS
SEA, SCIENCE ENGINEERING ASSOCIATES, S.L.
PEDRO ORTEGO
SEA, SCIENCE ENGINEERING ASSOCIATES, S.L.

Una serie de medidas sobre una primera maqueta, luego modificada para representar el sistema de blindaje de ITER, se realizaron para validar los datos de secciones eficaces en el Generador de Neutrones de Frascati (FNG). Actualmente, la Agencia de Energía Nuclear (NEA) trabaja en elevar la calidad de la base de datos que recopila información de todos los experimentos de blindaje *benchmark* (i.e. SINBAD), llevados a cabo en la década de los 90. La presente tarea se centra en un experimento del área de fusión: medidas con cámaras de fisión y láminas de activación sobre un bloque de acero. Se recopila y evalúa la información de la configuración experimental y a la vez se crean modelos numéricos mediante MCNP que reproduzcan las medidas.

INTRODUCCIÓN

La fiabilidad de los códigos de cálculo y de las librerías de secciones eficaces es de crucial interés para el diseño de componentes del primer reactor experimental de fusión (ITER). Para garantizar que las simulaciones se ajustan a la realidad, es necesaria la validación de los códigos y librerías mediante la comparación con experimentos (*benchmark*).

En los últimos 20 años se ha realizado en el Generador de Neutrones de Frascati (Roma) una serie de experimentos para caracterizar los materiales usados en ITER que no han sido evaluados de forma independiente y la información detallada (configuración experimental y resultados) corre el riesgo de perderse. Por este motivo, SEA realiza para la NEA (Nuclear Energy Agency), en el marco de SINBAD (Shielding Integral Benchmark Archive and Database), la recopilación de las configuraciones experimentales y de las medidas realizadas con el fin de evaluar los experimentos de forma independiente.

SINBAD recoge datos de experimentos de blindaje de reactores de fisión, fuentes de neutrones de fusión y aceleradores de partículas. Dentro del grupo de experimentos de fuentes de neutrones de fusión, se encuentran los experimentos realizados en el Generador de Neutrones de Frascati (FNG) y entre esos se trata, en este trabajo, el experimento del bloque de acero, que precede a los experimentos *Bulk shield*.

El propósito de este experimento *benchmark* fue reducir las incertidumbres en los cálculos con materiales estructurales, obteniendo datos experimentales precisos y realizando un

análisis exhaustivo de los resultados. Para ello se eligió un bloque de acero con una configuración determinada para poder realizar medidas de flujo neutrónico y tasas de reacción mediante cámaras de fisión y láminas de activación a diferentes profundidades dentro del bloque.

CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

A continuación se recoge la información recopilada de la configuración experimental con el propósito de una modelización lo más precisa posible del experimento.

Fuente

El experimento sobre un bloque de acero se realizó en el FNG, una instalación construida para albergar experimentos de investigación en el marco de fusión nuclear. Los experimentos tienen como objetivo verificar que los datos disponibles de secciones eficaces son precisos y que, por lo tanto, el uso de códigos de transporte es fiable. Estos son conocidos como experimentos *benchmark*.

El FNG es un acelerador de tipo Cockroft-Walton con un haz de deuterones que impactan sobre un blanco de tritio (i.e. tritio absorbido en una lámina de 4.4 μm de espesor) que produce una fuente casi isotrópica de neutrones de 14 MeV mediante la reacción de fusión $^3\text{H}(^2\text{H},n)\alpha$.

Maqueta

Las medidas de tasas de reacción se realizaron sobre un bloque de acero AISI 316, de densidad 7.89 g cm^{-3} , logrado con chapas de $100 \times 100 \text{ cm}^2$ de 5 cm de espesor cada

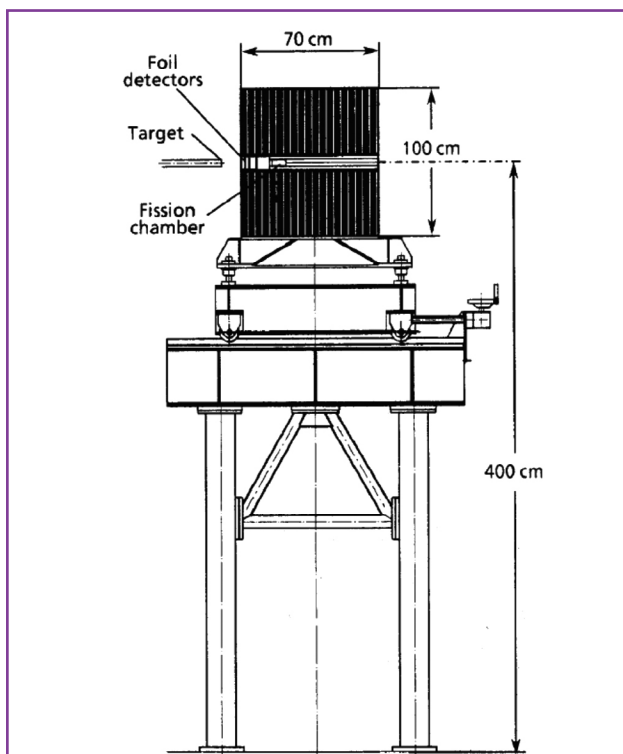


Figura 1. Esquema de la disposición de la maqueta frente a la fuente de neutrones.

una, hasta un espesor total del bloque de 70 cm. Este se coloca enfrente de la fuente, a 5.3 cm del blanco de tritio. El bloque está provisto de un canal central de 30 mm de diámetro donde se colocan los diferentes detectores con ayuda de barras de acero inoxidable. Este canal está alineado con la dirección de propagación del haz. En la Figura 1 se muestra una ilustración del bloque frente a la fuente.

Medidas con cámaras de fisión

Las cámaras cilíndricas de fisión de ^{235}U , ^{238}U y ^{237}Np de 8 mm de diámetro y 2 cm de longitud, se movieron a lo largo del canal central del bloque para medir las tasas de reacción. Las medidas se realizan cada 5 cm, desde 0 hasta 65 cm de profundidad. Las características de las cámaras de fisión se presentan en la Tabla 1.

Isótopo principal	Masa efectiva del isótopo principal (mg)	Composición isotópica (% átomos)
^{235}U	$0.811 \pm 2 \%$	^{235}U : 97.63 ^{238}U : 2.37
^{238}U	$4.09 \pm 2 \%$	^{235}U : 0.01755 ^{238}U : 99.9823
^{237}Np	$2.79 \pm 5 \%$	^{237}Np : 100

Tabla 1. Características de las cámaras de fisión.

Reacción	Periodo semi-desintegración	Abundancia isotópica (%)	Rango de respuesta (MeV)
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	15.02 h	100	10-14
$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	2.579 h	91.72	10-14
$^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$	1.503 días	68.26	14
$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	70.92 días	68.26	2.9-14
$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$	4.486 h	95.7	0.8-14
$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$	2.579 h	100	0.00017-0.06
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	2.694 días	100	0.00015-0.3

Tabla 2. Reacciones estudiadas con las láminas de activación.

Medidas con láminas de activación

Las reacciones de activación se recogen en la Tabla 2.

Las tasas de reacción de activación se miden también a varias profundidades dentro del bloque. Las láminas, de 18 mm de diámetro, se colocaron a siete profundidades, de 4.95 a 60.9 cm (exceptuando las de aluminio, cuya posición más profunda fue 55.9 cm). Las láminas de oro tienen un espesor de 0.05 mm y las de manganeso de 0.2 mm; mientras que el resto de láminas tienen un espesor de 1 mm para profundidades inferiores a 30 cm y de 2 mm para profundidades mayores a 30 cm.

Después de la irradiación, las actividades inducidas de rayos γ se midieron con dos detectores, previamente calibrados, de germanio de alta pureza (HPGe).

MODELO

En el modelo que pretende evaluar los experimentos se incluye toda la información acerca de las dimensiones, materiales y posiciones de los detectores para reproducir de una forma más realista las medidas.

A pesar de eso, la falta de información registrada acerca de los experimentos que conciernen a la configuración experimental dificulta mucho la labor de evaluar estas experiencias y llevan a realizar unas hipótesis para la construcción del modelo.

Cámaras de fisión

La información que se desconoce de este experimento es la disposición del depósito fisil dentro de las cámaras de fisión, de modo que se han supuesto dos casos extremos,

Cámara de fisión	Profundidad (cm)	C/E referencia	Error C/E referencia (%)	C/E Caso 1	C/E Caso 2
^{235}U	0	1.09	0.03	1.03	1.21
	5	1.09	0.03	0.98	0.95
	10	1.00	0.03	0.99	0.91
	15	1.01	0.05	-	-
	20	1.01	0.03	0.90	0.94
	25	1.04	0.05	-	-
	30	0.99	0.03	0.99	0.97
	35	1.00	0.03	0.93	0.97
	40	1.02	0.03	0.90	1.01
	45	1.00	0.03	0.98	1.00
	50	1.02	0.03	1.09	1.02
^{238}U	55	1.01	0.06	-	-
	60	0.96	0.03	1.20	1.21
	0	1.24	0.04	1.19	1.53
	5	0.95	0.04	1.10	0.94
	10	0.95	0.04	1.43	0.96
	20	0.95	0.04	1.30	1.02
	30	0.94	0.05	1.13	1.00
^{237}Np	35	0.95	0.06	1.19	1.04
	40	0.94	0.08	1.48	1.14
	0	1.06	0.06	0.98	1.19
	5	1.11	0.06	1.04	0.95
	10	0.99	0.05	1.21	0.97
	15	1.00	0.05	-	-
	20	0.95	0.05	1.17	1.01
	30	0.95	0.05	1.14	1.06
	40	0.88	0.05	1.12	1.04
	50	0.77	0.04	1.12	1.01
	60	0.71	0.04	1.27	1.11

Tabla 3. Comparación de las medidas de referencia con las calculadas.

teniendo en cuenta que se conoce la cantidad de depósito físil de cada cámara de fisión. El primero consiste en que el depósito físil se encuentra en forma de cilindro de 2 cm de longitud y 53 μm , 120 μm y 93 μm de diámetro en la cámara de fisión de ^{235}U , ^{238}U y ^{237}Np , respectivamente. El segundo caso consiste en un depósito físil, también en forma de cilindro pero de 8 mm de diámetro y de espesor de 0.9 μm , 4.3 μm y 2.7 μm para la cámara de fisión de ^{235}U , ^{238}U y ^{237}Np , respectivamente.

La comparación de las medidas experimentales junto a las calculadas mediante el modelo generado mediante MCNP se muestra en la Tabla 3.

Láminas de activación

Las diferentes reacciones de activación de distintos materiales se estudian mediante irradiaciones independientes de sus correspondientes láminas a diferentes profundidades, por lo tanto se genera un modelo para cada una de las reacciones.

La comparación de las medidas experimentales junto a las calculadas mediante el modelo generado mediante MCNP se muestra en la Tabla 4.

Reacción	Profundidad (cm)	C/E referencia	Error C/E referencia (%)	C/E
$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	4.95	0.96	0.06	0.91
	10.05	0.92	0.06	0.92
	20.15	0.87	0.06	0.91
	30.3	0.91	0.06	0.98
	40.5	0.93	0.06	0.93
	50.7	0.89	0.06	0.92
$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$	55.9	0.97	0.1	1.10
	4.95	1.06	0.06	1.01
	10.05	1.01	0.06	1.01
	20.15	0.93	0.07	0.95
	30.3	1.01	0.07	1.04
	40.5	0.95	0.07	1.00
$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$	50.7	0.90	0.07	1.01
	60.9	0.74	0.12	0.79
	4.95	0.98	0.04	0.89
	10.05	0.93	0.04	0.98
	20.25	0.89	0.04	1.04
	30.3	0.88	0.04	1.07
	40.5	0.79	0.04	1.10
	50.7	0.81	0.04	1.13
	60.9	0.69	0.04	1.26

Tabla 4. Comparación de las medidas de referencia con las calculadas.

CONCLUSIONES

La comparación de los ratios C/E de los dos supuestos de configuración del depósito físil con el ratio C/E reportado por los autores del experimento muestra en general una buena modelización del experimento, en el caso de la cámara de fisión de Np-237 se obtienen un mejor ajuste a la realidad que la obtenida por los autores.

La sobreestimación a profundidad 0 cm se debe a que la cámara de fisión sobresale del bloque con el fin de hacer coincidir el centro del depósito físil con la superficie de 0 cm del bloque. En esta posición, la simulación exacta del experimento es una tarea difícil pues la parte de la cámara de

fisión que sobresale del bloque tiene una estructura complicada y se desconoce. La causa de la sobreestimación en la posición más profunda de la cámara de fisión de U-235 se desconoce. La sobreestimación en la posición más profunda de la cámara de fisión de U-238 se puede atribuir al aumento de la tasa de reacción del U-235 que también contiene esta cámara.

El desconocimiento de la configuración del depósito físil es determinante para un buen ajuste entre el modelo y las medidas experimentales. Sin embargo, el depósito físil debe tener una disposición englobada entre los dos casos que se han supuesto. Sin tener en cuenta la primera y última posición, la disposición de depósito físil de la hipótesis 2 es la que más se ajusta a los resultados obtenidos por los autores del experimento.

La comparación de los ratios C/E de la irradiación de láminas de activación, muestra en general un mejor ajuste que el de los autores probablemente porque el modelo incluye librerías de secciones más actualizadas que las que pudieran usar hace más de 20 años atrás. Los resultados numéricos de las reacciones de activación de Ni, Mn y Au no se han incluido pues se han obtenido discrepancias de varios órdenes de magnitud al comparar los resultados con la primera referencia, no obstante los resultados gráficos reportados en la segunda referencia se ajustan de forma casi impecable. Esto indica que parece que ha habido una modificación en la obtención de datos experimentales, o bien se han realizado otras irradiaciones que no constan. Por razones obvias, se concluye que la información disponible sobre el experimento de las láminas de activación no permite evaluar el experimento, pues se requieren datos numéricos para una correcta comparación.

Debido a la antigüedad de los experimentos, la recopilación de información acerca de los detalles de la configuración experimental se trata de una tarea muy laboriosa. El contacto con los técnicos y científicos implicados en los experimentos es de vital importancia para obtener los detalles que no recogen los informes. Por otro lado se debe tener en consideración que en el momento de los experimentos no se proyectaba la existencia de una base de datos como SINBAD.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la NEA la facilitación de documentación, en especial a M. Angelone por su asistencia.

REFERENCIAS

- Paola B, Maurizio A, et al.. The Benchmark experiment on stainless Steel bulk shielding at the Frascati Neutron Generator. 1994. ENEA RT/ERG/FUS/94/15.
- Paola B, Maurizio A, et al.. The bulk shielding benchmark experiment at the Frascati Neutron Generator (FNG). 1995. Fusion Engineering and Design 28(1-4):504-514.
- P. Bertrand et al.. Résultat des mesures effectuées dans le bloc d'acier a Frascati par chambres a fission et détecteurs thermoluminescents dans le cadre de l'expérience européenne de protection. 1993. Nota técnica CEA.(EFF-DOC-260) ■