

CNEA 453
Informe

AR 9100007

Técnicas de Medición de la Distribución de Fisiones en Elementos Combustibles Tipo Alucha con Detectores de Estado Sólido

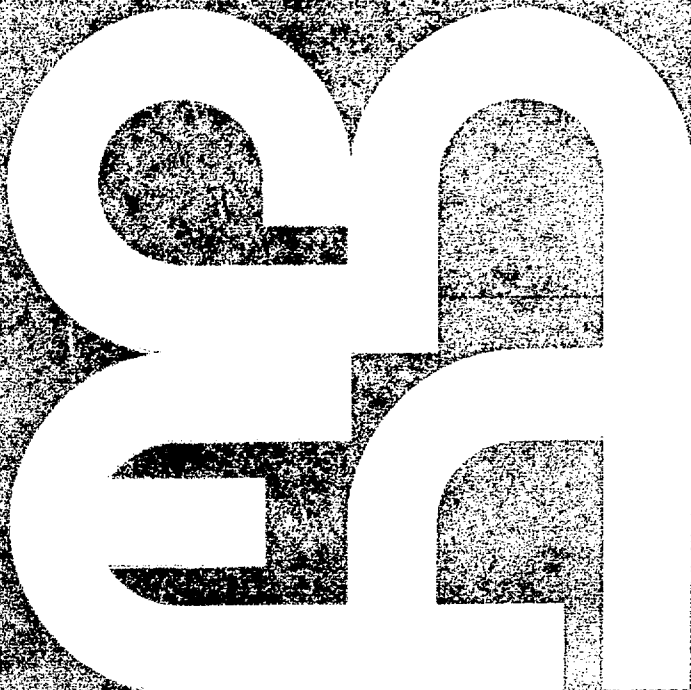
M. D. Soledad
de Nothmann

Dina Weisman

Comisión
Nacional
de Energía
Atómica

República Argentina

Buenos Aires, 1979



CNEA 453
Informe

Técnica de Medición de la Distribución de Fisiones en Elementos Combustibles Tipo Atucha con Detectores de Estado Sólido

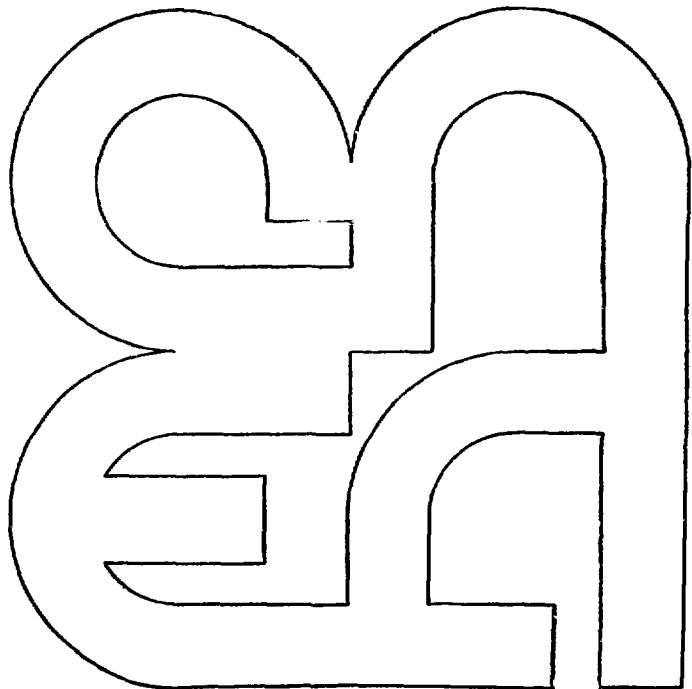
M. D. Bovisio
de Ricabarra

Dina Waisman

**Comisión
Nacional
de Energía
Atómica**

República Argentina

Buenos Aires, 1979



INIS CLASSIFICATION AND KEYWORDS

E21

E23

**FUEL PELLETS
ATUCHA REACTOR
FUEL ELEMENTS
RODS
URANIUM DIOXIDE
DIELECTRIC TRACK DETECTORS
MUSCOVITE
ETCHING
FISSION FRAGMENTS
NATURAL URANIUM
DISTRIBUTION
FISSION RATIO
NUMERICAL DATA
REACTOR PHYSICS**

**COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
PRESIDENCIA DE LA NACION**

**TECNICA DE MEDICION DE LA DISTRIBUCION DE FISIONES
EN ELEMENTOS COMBUSTIBLES TIPO ATUCHA
CON DETECTORES DE ESTADO SOLIDO**

Bovisio de Ricabarra M. D. y Dina Waismac

RESUMEN

Se ha puesto a punto la técnica de medición de la distribución de fisiones en elementos combustibles de reactores con detectores de estado sólido. Se ha comprobado la ventaja de la mica respecto a otros materiales en la detección de fragmentos de fisión, en particular en presencia de neutrones rápidos o partículas alfa. Se verificó la linealidad de la sensibilidad en el rango de 50.000 a 360.000 trazas de fisión por cm^2 . Resultados obtenidos con mica y resina policarbonato (Makrofol-N) concuerdan dentro del 0,5%.

Se demuestra la ventaja de este método para medidas de microdistribuciones en barras delgadas, debido a su alta resolución espacial.

Las medidas se realizaron en una "microbarra" de pastillas de dióxido de uranio natural, tipo Atucha. El flujo medio en la "microbarra" normalizado al punto central, se midió con una precisión del 0,8%. Se recomienda este método para determinar la energía liberada por fisión en barras de combustible de reactores.

ABSTRACT

Fission Distribution Measurements of Atucha's Fuel Pellets with Solid State Track Detectors

Distribution of fissions in a UO_2 rod has been measured by means of solid state detectors.

Mica-muscovite and Makrofol-N detectors were used in the experiment. The merits of mica muscovite relative to the Makrofol-N for the detection of fission fragments have been verified. However both fission track detectors closely agree (0,5%) in the final fission distribution of the UO_2 rod.

Sensitivity of the detectors shows to be linear in the range between 50.000 and 360.000 fission tracks per square centimeter. Due to the high spatial resolution this method is better than any other technique. Determinations were made in UO_2 pellets similar to the fuel element of the Atucha reactor. The average fission rate in the rod has been measured within 0,8% error, and provides an accurate determination for the distribution of fissions in the rod which is needed for the determination of energy liberated per fission in the natural uranium rod.

INTRODUCCION

Un problema importante y difícil de resolver en física de reactores es la medición de fisiones en forma directa. Existen numerosos trabajos perfeccionando la técnica de medición con cámaras de fisión, pero debido a su volumen, estos detectores no pueden usarse en el interior de elementos combustibles. En el pasado este inconveniente se ha resuelto por un método complicado que consiste en medir en los elementos combustibles con técnicas de activación, usando sondas de material fisionable e intercalando estos detectores con cámaras de fisión (1), (2).

Actualmente los detectores de estado sólido ofrecen una solución muy útil y precisa para medir directamente fragmentos de fisión en elementos combustibles de reactores. El daño causado por el paso de partículas ionizantes en dieléctricos produce rastros que permiten determinar el número de eventos de ionización primaria producidos en el material (3). Si el dieléctrico se somete a un tratamiento químico, estos rastros de daño por radiación sufren un ataque más intenso que el resto del material, formando trazas visibles con un microscopio óptico (4), (5).

Distintos materiales como mica, vidrios especiales, nitrocelulosa, policarbonatos, han sido usados con éxito en la detección de neutrones, partículas alfa y productos de fisión (6), (7), (8). Sus aplicaciones son numerosas en dosimetría de neutrones, determinación de la edad de fósiles, geología, análisis por activación, autoradiografía, identificación de rayos cósmicos y física de reactores (9), (10), (11).

Otra aplicación importante de este método en física de reactores es la medida de relaciones de fisión con gran precisión. En la técnica de activación se mide la actividad de un fragmento de fisión y el resultado depende del conocimiento del rendimiento de fisión de este elemento en función del espectro neutrónico, para los isótopos cuya relación de fisión desea medirse. Los detectores de estado sólido miden directamente los fragmentos de fisión eliminando la incertidumbre introducida por los datos de rendimiento de fisiones.

El propósito de este trabajo es la puesta a punto de un método para medir la distribución de fisiones térmicas en elementos combustibles de reactores, con detectores de estado sólido de mica.

La mica presenta la ventaja de conseguirse fácilmente en el país, su fácil manipulación, el tratamiento químico no es muy crítico a variaciones de tiempo o temperatura, no es sensible a neutrones rápidos o partículas alfa y puede usarse a altas temperaturas que dañarían a los materiales plásticos (11).

METODO

Para determinar la densidad de fisiones se irradia el material fisiónable en íntimo contacto con la mica. Después de irradiada la mica se somete a un tratamiento químico ("etching") y se cuentan con un microscopio óptico las trazas producidas por los impactos de los productos de fisión.

Se estudió la distribución radial y axial de fisiones en una "microbarra" de pastillas de dióxido de uranio natural y se comparó con los resultados obtenidos con técnicas de activación.

Para establecer el grado de confiabilidad y reproducibilidad de las medidas, se realizaron experiencias para distintos niveles de fluencia (neutrones/cm²) y se comprobó la proporcionalidad del número de trazas por unidad de superficie en función de la fluencia neutrónica.

FACILIDAD DE IRRADIACION Y FLUJO NEUTRONICO

Estas experiencias se realizaron en una "microbarra" de pastillas de dióxido de uranio natural tipo Atucha, irradiada en la columna térmica del reactor RA1.

El lugar de irradiación es el "stringer" de grafito ubicado en el eje horizontal de la columna térmica. El "stringer" de grafito tiene 4 x 10 cm de sección y 80 cm de largo, llegando su extremo interno a 50 cm del núcleo del reactor (fig. 1). Un orificio pasante vertical a 2,5 cm del extremo interno del "stringer", permite alojar la "microbarra". Esta consiste en una cápsula de grafito de 18 mm de diámetro externo, 10,7 mm de diámetro interno y 39 mm de altura, con cuatro pastillas de combustible. Se usaron pastillas de dióxido de uranio natural * (densidad=10,4 g/cm³, altura=6,9 mm, diámetro=10,4 mm). Una de las caras presenta una concavidad de 20 mm³. Para determinar la componente epitérmica del espectro neutrónico se construyó otra cápsula con una cubierta interior de cadmio de 0,8 mm de espesor (fig. 1b).

Se eligió la columna térmica como lugar de irradiación porque permite reproducibilidad de la geometría y niveles bajos de flujo (10⁶ a 10⁷ neutrones/cm²/seg), dentro del rango de potencia que permite la instrumentación normal del reactor.

La fig. 2 muestra la variación de flujo en el reflector central y la distribución horizontal de flujo en el "stringer" de la columna térmica.**

El flujo se determinó usando sondas de manganeso con dos técnicas de medición: conteo 4π-beta en un contador proporcional y conteo gama contra una fuente calibrada de Mn⁵⁴ en un espectrómetro de Ge-Li. Estas técnicas ya se han descrito en trabajos anteriores (12),(13).

La relación de flujo entre el reflector central y el lugar de irradiación, entre la segunda y tercera pastilla de uranio (y=19,8 mm, fig. 1b), es igual a 19,4 ± 2.

Irradiando hojas de manganeso del mismo diámetro que las pastillas de uranio, en las cápsulas con y sin interior de cadmio, se determinó la relación de cadmio $R_{Cd} = 280 \pm 3$, que representa un índice espectral $r = 0,003$.

Para tener una medida simultánea del flujo en cada irradiación se usaron monitores de indio calibrados, como se describe en los detalles experimentales.

* Pastillas para experiencias en MZFR, elaborados por el Laboratorio de Núcleos Cerrámicos, Departamento de Elementos Combustibles.

** Los datos de flujo y calibración corresponden al período en que se realizaron las medidas (1-6-75 a 1-6-76).

DETALLES EXPERIMENTALES

Preparación de los detectores de mica.

Se utilizó mica muscovita comercial de 50 a 100 micrones de espesor y con una matriz se cortaron discos de 10,4 mm de diámetro.

Estas hojas se exfolian fácilmente y después de una inspección al microscopio se descartaron las que presentaban daños superficiales, que pudieran interferir con el recuento de trazas. Se seleccionaron hojas de 30 micrones de espesor. Este método es muy satisfactorio y permite obtener hojas claras, de corte neto y muy pocos defectos.

Para eliminar defectos y trazas fósiles (14) se realizó un tratamiento térmico ("annealing") a 580°C, durante 24 horas. Para revelar la presencia de trazas fósiles se hizo un tratamiento químico prolongado ("pre-etching") con HF al 49% durante 7 horas (15), (16). Las trazas fósiles presentan un aspecto característico y el "pre-etching" tiene por objeto obtener un crecimiento mucho mayor que el de las trazas a contar, para distinguir las fácilmente, fig. 3. Si la densidad de trazas a contar es muy baja, es necesario contar antes de la irradiación el fondo de fósiles.

Irradiación de los detectores.

Debido a limitaciones en el sistema óptico de contaje y a la forma cóncava de una de las caras de las pastillas de combustible, se expuso una sola cara del detector de mica a los productos de fisión para tener una geometría 2π .

Un conjunto formado por la mica, un monitor de flujo y una hoja de aluminio ("catcher") se ubica entre las pastillas de UO_2 . El detector de mica se coloca en contacto con la cara plana del combustible y el "catcher" de aluminio protege al monitor de contaminación con productos de fisión. El conjunto tiene un espesor aproximado de 100 micrones.

La "microbarra" con los detectores se irradió a flujos de 10^6 a 10^7 n/($cm^2 \cdot seg$) de 20 a 30 minutos. El tiempo de irradiación fue siempre superior a 20 minutos para evitar correcciones por subida de flujo.

Calibración de monitores de flujo

Como monitores de flujo se usaron hojas de indio de 10,4 mm de diámetro y 50 micrones de espesor, calibrados previamente.

Para calibrar los monitores de indio se irradiaron conjuntamente con hojas de Mn en la "microbarra" de UO₂. Se midió la actividad del fotopico de 415 Kev del In116m de 54 minutos y se calculó la actividad específica absoluta a saturación, A_∞:

$$A_{\infty} = A / (\epsilon \cdot (1 - e^{-\lambda t_i}))$$

A = actividad específica del fotopico de 415 Kev, extrapolada a fin de irradiación.

λ = Constante de desintegración del In 116m.

t_i = tiempo de irradiación.

ϵ = eficiencia del detector a 415 Kev

La eficiencia se determinó con fuentes calibradas de Sn¹¹³ (393 Kev) y Na²² (511 Kev), interpolando con una función doble logarítmica.

De la medida de la actividad absoluta del Mn⁵⁶ y la relación de cadmio se obtuvo el flujo absoluto y se determinó una constante: $F = A / \Phi$, siendo Φ el flujo térmico. El resultado de tres experiencias y su desviación standard es: $F = (1,755 \pm 0,006) \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{mg}$. El error sistemático introducido por las constantes que intervienen en el cálculo de flujo es del 5% (12).

Medición de los monitores de flujo.

La actividad gama del monitor de In se midió durante dos horas comenzando media hora después del fin de irradiación. Antes y después de la medida se controló la constancia de la eficiencia con fuentes calibradas de Sn¹¹³ y Na²².

La integración de la actividad del fotopico de 415 Kev, substracción de fondo, extrapolación, reducción a saturación, determinación de actividad específica, promedio de las medidas y desviación standard se realizó en forma automática con un sistema analizador multicanal Hewlett-Packard 5416B, conectado "on-line" con la línea de detección gama (17), usando el programa "Serie" de reducción de fotopicos (18).

Tratamiento químico y recuento de trazas.

Después de la irradiación las hojas se atacaron con HF al 49%, agitando suavemente cada 15 minutos. De acuerdo a la temperatura ambiente el ataque se prolongó de una a tres horas, finalmente se lavó con agua desmineralizada, terminando el lavado con alcohol. Las hojas de la misma experiencia se trataron simultáneamente en el mismo baño de fluorhídrico, usando un dispositivo de separadores plásticos para impedir la superposición de las hojas.

Después del "etching" las trazas presentan al microscopio formas prismáticas como puede verse en la fig. 4. Los productos de fisión que llegan al detector con energía muy degradada producen trazas superficiales de forma de diamante y poco contrastadas, cuyo tamaño se extiende hasta cero. La fracción de trazas en forma de diamante, depende del espesor de la fuente de fisión y para fuentes asintóticamente gruesas, como en nuestro caso, puede llegar del 30 al 50 % del total de trazas registradas. Las formas de diamante son difíciles de contar y su registro depende fuertemente del "bias" del observador, siendo la mayor causa de discrepancias entre distintos observadores (16). Por lo tanto limitan la eficiencia, definida como la relación entre las trazas observadas y las fisiones producidas en la fuente (15), (16). Como no disponemos de un microscopio de luz transmitida que es lo adecuado para estas medidas, hemos adaptado uno de luz reflejada lo que nos pone por debajo del nivel de visibilidad óptima y podemos suponer que la reducción de eficiencia es aún mayor.

Para mediciones relativas el problema se simplifica, siendo necesario tener una eficiencia constante y suficientemente alta. Comparando nuestros resultados con los de Gold et al. (15) estimamos nuestra eficiencia óptica en 76 %, que es un valor razonable. Para asegurar eficiencia constante los detectores de cada distribución se atacaron simultáneamente, obteniéndose un valor promedio de 5 a 8 micrones en el tamaño de las trazas.

Para el recuento se usó un microscopio de luz reflejada Olympus MF, adaptado para luz transmitida colocando un espejo de reflexión debajo de la muestra. Se utilizaron oculares x10 y x15, con un disco micrométrico de 4 x 4 cuadros y objetivos x10 y x40. El campo de observación se calibró con un micrómetro objeto, obteniéndose una superficie de $1,93 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ para 600 aumentos.

El recuento se hizo barriendo diámetros de la muestra y contando las trazas contenidas dentro del retículo. Para no contar dos veces las trazas que cortan los bordes se adoptó la convención de contar las que cruzan los bordes superior e izquierdo.

Para desplazar el campo de observación se usó como referencia una traza o falla que cortara un borde del retículo normal al sentido de desplazamiento. El error cometido se estima en ≈ 2 micrones por paso.

Se contaron diámetros normales entre sí, girando la muestra para contar otro par de diámetros. Un diámetro se recorre en 74 pasos con un error de \pm medio paso. Con un paso de $1,389 \times 10^{-2}$ cm tenemos una longitud de $1,03 \pm 0,01$ cm por diámetro.

Se compararon los resultados obtenidos por distintos observadores, comprobándose una dispersión menor que el 1% para un mismo diámetro.

Aceptando que la dispersión de un observador sigue una distribución de Poisson (15), se calculó la desviación standard del promedio de varios diámetros y se comparó con la que podía esperarse de la estadística acumulada, obteniéndose siempre resultados coherentes (Tabla I).

Comparación con detectores de resina-policarbonato

Se compararon los resultados obtenidos con mica y un policarbonato ($C_{16}H_{18}O_3$). El policarbonato usado es Makrofol-N de Bayer A.G., RFA. Los detalles experimentales, proceso de "etching" y recuento, así como sensibilidad a partículas alfa y neutrones rápidos se describen en otro informe (19).

Se colocaron dos detectores, uno de mica y otro de Makrofol entre dos pastillas de UO_2 , enfrentando las caras planas de los mismos. Entre los dos detectores se colocó un monitor de In.

Los resultados obtenidos muestran muy buen acuerdo. En el policarbonato fue necesario descontar las trazas inducidas por exposición prolongada a las partículas alfa del uranio natural, por lo que el error asignado incluye la dispersión del fondo alfa. Se midieron $39,2 \pm 0,7$ trazas/campo en el detector de Makrofol contra $39,0 \pm 0,3$ en la mica (Nº5, Tabla I).

Experiencias realizadas en el reflector central del RA1 muestran en los policarbonatos una superficie granulada que dificulta mucho el recuento. Este efecto se debe a las reacciones (n, α) inducidas por neutrones rápidos en el carbono y oxígeno del policarbonato.

RESULTADOS

La densidad de trazas en función de la fluencia neutrónica se representa en la fig. 5. Se puede observar que dentro del rango de medición, el comportamiento es lineal e independiente del "etching" (Tabla I).

En la Tabla II se resumen los resultados de seis experiencias, expresados en trazas por neutrón, T/F , donde T es el número de trazas por cm^2 y F la fluencia de neutrones por cm^2 . El valor medio obtenido es:

$$T/F = (2,49 \pm 0,04) 10^{-5} \text{ trazas/neutrón}$$

este valor nos permite calcular la sensibilidad del detector. Para una fuente de fisión asintótica, es decir de espesor mucho mayor que el rango de los fragmentos de fisión, tenemos que la sensibilidad infinita o asintótica, S_{∞} , es:

$$S_{\infty} = n \bar{R}/2 \quad (1)$$

donde n es la eficiencia óptica y \bar{R} el rango medio de los fragmentos de fisión en el material fisionable (15).

La sensibilidad se define como la masa efectiva por unidad de superficie cuyos eventos de fisión son observados por el detector, incluyendo la eficiencia óptica y la autoabsorción en la fuente (15):

$$S_{\infty} = T / (F \cdot f)$$

siendo f el número de eventos de fisión por unidad de espesor (g/cm^2):

$$f = (\bar{R}/2) N g \sigma_f$$

$\sigma_f = 582.2 \pm 0,2$ barn, es la sección eficaz de fisión del U_{235} (20); $N = 1,606 \cdot 10^{19}$ átomos U_{235} / gramo de UO_2 (0,72% U_{235} en U natural); $g = 0,9755$ es el factor no- $1/v$ (21) y $\bar{R}/2$ tiene en cuenta el espectro maxwelliano. Con estos datos podemos calcular:

$$S_{\infty} = (3,08 \pm 0,05) 10^{-3} \text{ g de } UO_2 / \text{cm}^2$$

Gold et al. (15) han determinado $S_{\infty} = (4,34 \pm 0,04) 10^{-3} \text{ g } U_{238} / \text{cm}^2$, que reducido a óxido es $S_{\infty} = (3,82 \pm 0,04) 10^{-3} \text{ g } UO_2 / \text{cm}^2$ y teniendo en cuenta $n = 0,948$ medido por estos autores, podemos estimar la eficiencia óptica, $n = 0,76$, usando la expresión (1).

Si calculamos el rango aparente R_0 , siguiendo el criterio de De Coster y Langela (22), obtenemos para la densidad de pastillas usadas $\rho = 10,4 \text{ g/cm}^3$, $R_0 = 5,25 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$ que es 5% menor que el valor $R_0 = 5,51 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$ citado por dichos autores.

Otra forma de expresar la sensibilidad es en trazas por neutrón y por barn, tenemos $1,4 \cdot 10^{-5}$ trazas/(neutrón.barn), 14% menor que el valor de $1,6 \cdot 10^{-5}$ obtenido por Rago et al.(11).

La distribución radial de fisiones térmicas se determinó en seis experiencias (Nº 1,2,5,6,7, 8 en Tabla I).

Se dividió cada diámetro en 7 zonas de 10 campos (0,139 cm) y se despreciaron 2 campos (0,027 cm) en los bordes. Como los bordes presentan exfoliación, el contaje no es tan preciso y se prefirió eliminarlos del recuento. Como el error acumulado en el recuento de cada diámetro es de $\pm \frac{1}{2}$ campo, aproximadamente 10 micrones, se puede asignar una incertidumbre de 5 micrones a la posición de cada punto.

La distribución radial se midió en el plano medio de la "microbarra", a 1,98 cm de la cara superior, fig. 1.

En la fig. 2 se puede apreciar que hay una variación exponencial del flujo a lo largo del "stringer" de grafito. En 1 cm esta variación es menor que el 5%, por lo que se puede considerar lineal en el diámetro del detector de mica y eliminarse simetrizando la distribución.

En cada experiencia se midieron de 4 a 10 diámetros, los puntos medidos se normalizaron al valor medio y se simetrizaron, antes de promediar todos los diámetros medidos para obtener la distribución radial en cada experiencia.

En la fig. 6 se representa la distribución promedio de seis experiencias normalizadas al punto central.

En la Tabla III se comparan los valores experimentales y los ajustados con una función I_0 de Bessel (23). Los errores asignados representan la desviación standard del promedio de seis experiencias. Con la curva ajustada se estimó, que la zona del borde despreciada en el recuento incrementa en 0,28% el valor del flujo medio. Esto da una relación del valor medio de la distribución al punto central de $1,035 \pm 0,008$, el error incluye la dispersión del 0,4 % en la medida del punto central.

La distribución vertical se midió con detectores de mica en cuatro posiciones, sobre la cara plana de cada pastilla. Se midieron de 2 a 4 diámetros por detector. El promedio de los resultados de dos experiencias (Nº 3 y 4, Tabla I) se resume en la Tabla IV.

Se realizaron dos experiencias para determinar la distribución vertical con técnicas de activación, usando hojas de Mn del mismo diámetro que las pastillas de uranio. En la Tabla IV se comparan los resultados de activación con los de detectores de mica. La dispersión en cada punto es de aproximadamente el 1,5%.

CONCLUSIONES

La reproducibilidad y confiabilidad de los resultados es excelente e independiente del tratamiento químico, como queda demostrado por la constancia de sensibilidad en un rango muy amplio de densidad de trazas, hasta 360.000 trazas/cm² (Tabla II y fig. 5). La constancia de sensibilidad y la eficiencia óptica elevada (76%) permiten asegurar la exactitud de las medidas realizadas con detectores de trazas de mica.

Como se ha discutido en la descripción del método de recuento, trabajando con fuentes gruesas se puede esperar que la eficiencia óptica sea menor que la unidad hasta en un 50% (15), (16), dependiendo de la visibilidad de las formas de diamante inducidas por los fragmentos de fisión de energía muy degradada. El acuerdo con los valores obtenidos por De Coster y Langela (22) y Rago et al. (11) indica que las pérdidas en eficiencia debidas al sistema óptico usado son del 5 al 15%. Hay que señalar que hemos comprobado mucho mejor contraste y nitidez en sistemas de luz transmitida. Esto aumenta la visibilidad de las trazas en diamante y por lo tanto la eficiencia y hace menos fatigoso el recuento reduciendo errores personales.

Se puede apreciar del resultado de la distribución radial que la resolución espacial del método es muy alta y precisa. Por eso en distribuciones microscópicas este método reemplaza con ventaja a la técnica de activación, que resulta muy delicada y laboriosa (2).

La sensibilidad del método permite medir fluencias muy bajas donde no es posible usar técnicas de activación. Con el sistema de medición actual podemos medir en UO₂ natural, fluencias de 2×10^8 neutrones/cm² que para una hora de irradiación corresponde a flujos de 5×10^4 neutrones/(cm². seg).

La comparación con policarbonatos (19) nos ha demostrado que la mica es superior para medir productos de fisión en experiencias de reactores, debido a su insensibilidad a neutrones rápidos. Hemos irradiado en el espectro de un reactor y comprobado que las trazas producidas por reacciones (n, α) en el policarbonato son muy numerosas. Si bien se pueden distinguir por su forma y tamaño, producen un efecto granulado en la superficie que dificulta mucho la visibilidad. Por otro lado las formas prismáticas de las trazas en la mica tienen contornos muy netos y la orientación de los ejes permite distinguir fácilmente trazas muy próximas. En policarbonatos para poder hacer un buen recuento, es necesario aumentar el tamaño de las trazas con un "etching" prolongado, lo que produce formas redondeadas que limitan la densidad medible.

Otro efecto a considerar es que en fuentes asintóticas, como las barras combustibles, los fragmentos de fisión pierden energía y llegan al detector con un espectro muy amplio de energía y por lo tanto de tamaño de trazas. Cuando se trabaja con policarbonatos no es posible distinguir entre las trazas muy pequeñas producidas por fragmentos que llegan con muy baja energía y las inducidas por reacciones (n, α) (15), (16).

Además el proceso de "etching" remueve material de la superficie de la resina-policarbonato y pueden perderse trazas superficiales, lo que hace que el resultado sea muy sensible a la duración del tratamiento químico. En la mica no existe ese problema pues no se produce "etching" en la dirección normal al clivaje (15).

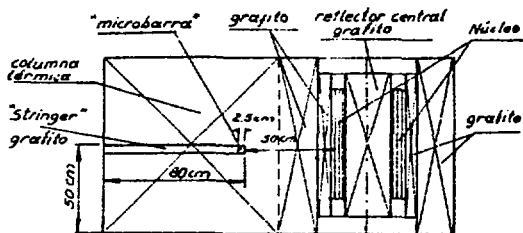
El mayor inconveniente del método es lo largo y laborioso del recuento óptico "manual" y el éxito de la medida depende críticamente del observador. Es indispensable que el recuento sea realizado por más de un observador para controlar la bondad de las medidas. Existen métodos de contaje automático (24), pero son sofisticados y costosos y deben ser cuidadosamente calibrados y controlados periódicamente. Se probó con método fotográfico, pero a menos de disponer de un sistema de "scanning" automático, no reduce sensiblemente el trabajo; es más costoso y menos preciso. Por otro lado se ha demostrado (15), (16), que para medidas absolutas el contaje óptico "manual" con detectores de mica, es más preciso y de máxima eficiencia.

Cuando es necesario medir gran número de muestras conviene, siempre que el problema lo permita, recurrir a técnicas de activación, pues disponemos de métodos automáticos de medidas de muestras y reducción "on-line" de los datos, además no requieren ninguna preparación previa de las muestras.

Resumiendo, para la medición de fisiones y flujos se recomienda el uso de detectores de trazas de mica en los siguientes casos:

- a) Medidas precisas de la energía liberada por fisión en barras combustibles, porque este método mide directamente las fisiones y no es necesario el conocimiento del espectro de neutrones. Si el número necesario de medidas es muy grande, se puede combinar con técnicas de activación.
- b) Medidas muy exactas de relaciones de fisión en experiencias de reticulados.
- c) Medición de distribuciones finas en combustibles donde sea necesaria muy buena resolución espacial. Para medir utilización térmica, se combinará con la técnica de activación para evitar el uso de material fisiónable en el moderador.
- d) Cuando se necesita máxima sensibilidad (potencia muy baja); comparando con cámaras de fisión, si la geometría del lugar a medir lo permite.
- e) Para medidas absolutas muy exactas, combinando con cámaras de fisión (15).

a)



b)

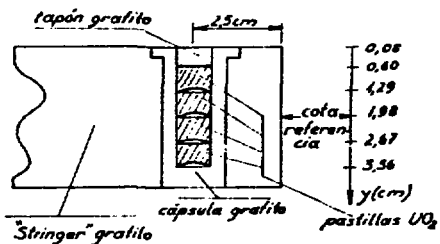


FIGURA 1

a) Corte esquemático RA1

b) "Microbarra" combustible

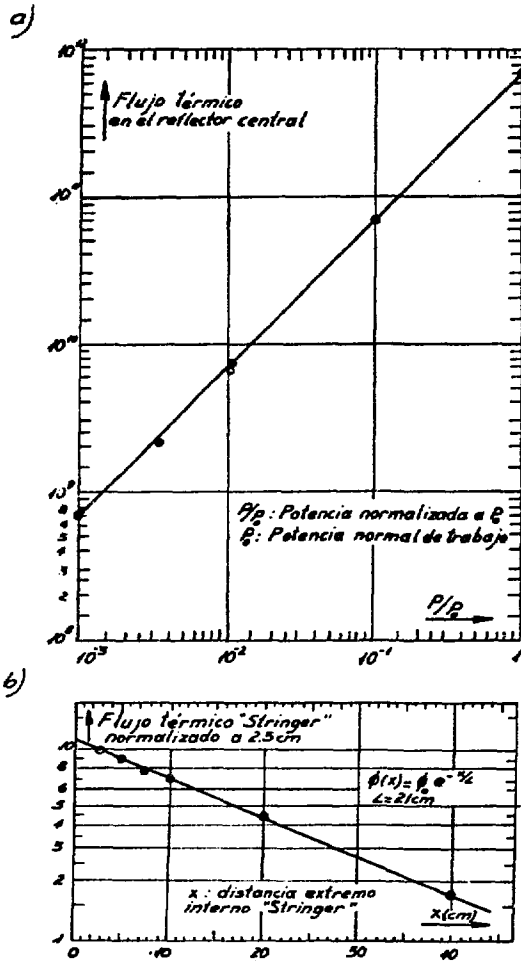


FIGURA 2

- a) Flujo térmico en el reflector central del RA1 en función de la potencia;
b) Distribución horizontal del flujo térmico en el "stringer" de la columna térmica del RA1.

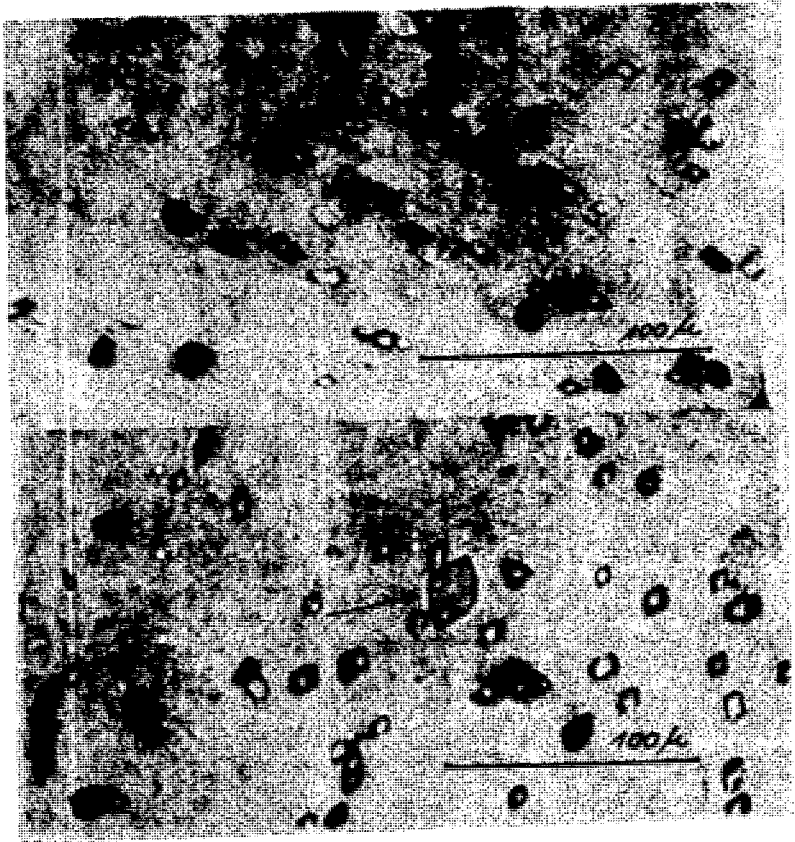


FIGURA 3

Aspecto de trazas fósiles en muestras de mica irradiada

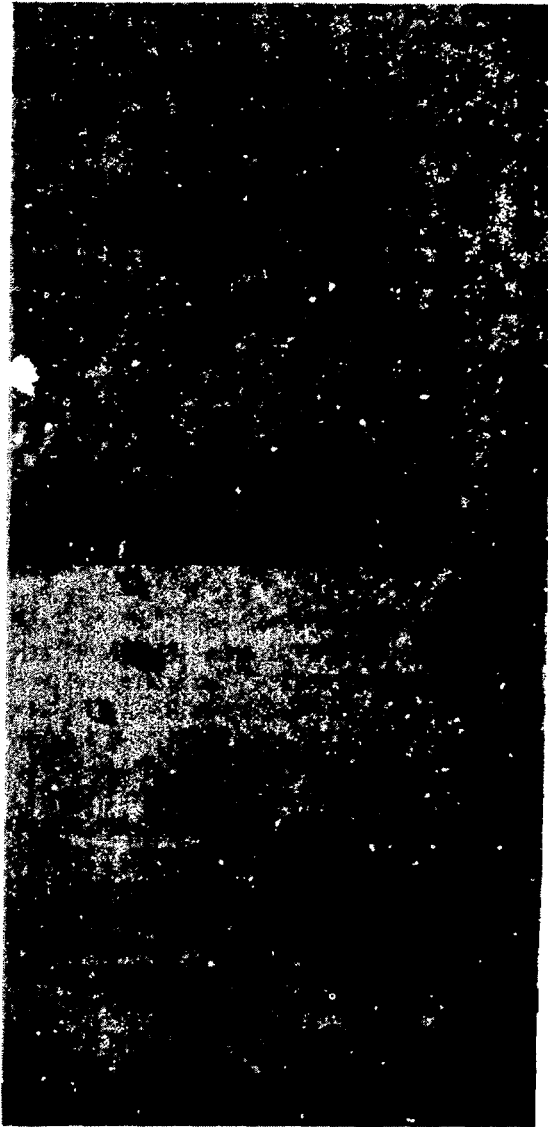


FIGURA 4

Microfotografía mostrando la forma y tamaño de las trazas
producidas por productos de fisión en mica,
después del "etching"

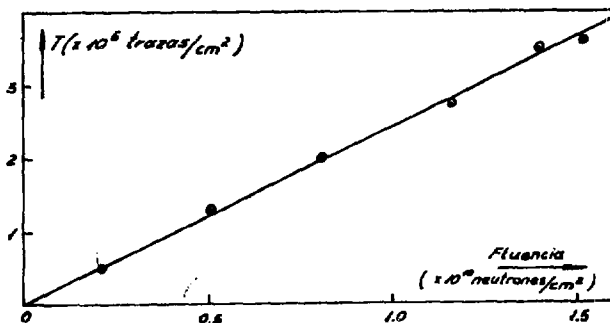


FIGURA 5

Trazas de fisión en función de la fluencia neutrónica

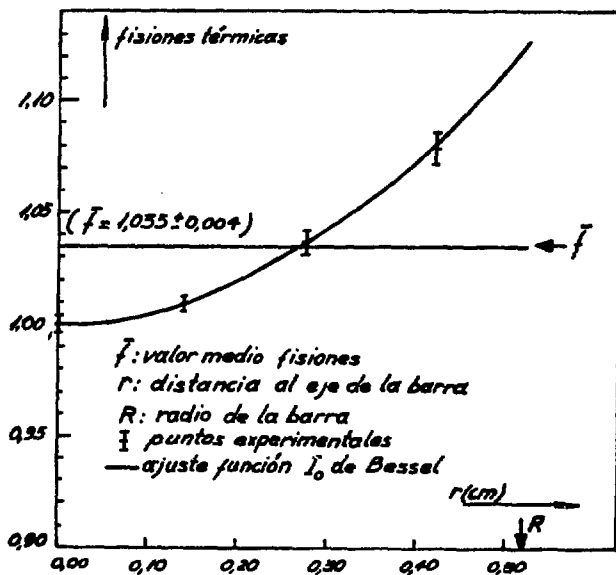


FIGURA 6

Distribución radial de fisiones térmicas

TABLA I

Detalles Experimentales

Nº	ETCHING		A *	FLUJO **	ti	TRAZAS CAMPO	RECUESTO TOTAL
	°C	Horas	seg ⁻¹ mg ⁻¹	neutrón cm ² .seg	seg	error (%)	error (%)
1	17	1,5	-	-	1800	89,4±1,0 (1,1%)	11000 (0,9%)
2	23	2	1,48±0,02	9,456	1800	69,6±0,8 (1,1%)	24500 (0,6%)
3	27	1	1,36±0,03	7,749	1800	67,1±0,5 (0,8%)	9000 (1%)
4	22	1,5	1,69±0,02	9,630	1200	52,9±0,4 (0,8%)	17000 (0,8%)
5	18	2,25	0,782±0,009	4,454	1800	39,0±0,4 (1%)	27000 (0,6%)
6	16	3	-	-	1800	36,0±0,4 (1,1%)	15000 (0,8%)
7	18	2,75	0,484±0,008	2,758	1800	25,3±0,3 (1,2%)	9000 (1%)
8	19	2,83	0,205±0,002	1,168	1800	10,3±0,2 (2%)	3000 (1,8%)

* Factor: ×10³
** Factor: ×10⁶

TABLA II

Variación del Número de Trozas en Función de la Fluencia

Nº	FLUENCIA	T	T/FLUENCIA
	neutrón/cm ²	trozas/cm ²	trozas/neutrón
2	(1,52±0,04)×10 ¹⁰	(3,61±0,04)×10 ⁵	(2,37±0,10)×10 ⁻⁵
3	(1,40±0,05)×10 ¹⁰	(3,48±0,03)×10 ⁵	(2,49±0,12)×10 ⁻⁵
4	(1,16±0,03)×10 ¹⁰	(2,74±0,02)×10 ⁵	(2,37±0,09)×10 ⁻⁵
5	(0,80±0,02)×10 ¹⁰	(2,02±0,02)×10 ⁵	(2,52±0,10)×10 ⁻⁵
7	(0,50±0,01)×10 ¹⁰	(1,31±0,02)×10 ⁵	(2,64±0,14)×10 ⁻⁵
8	(0,210±0,005)×10 ¹⁰	(0,534±0,010)×10 ⁵	(2,54±0,12)×10 ⁻⁵

TABLA III
Distribución Radial de Fisiones Térmicas
en la "Microbarra" de UO₂

R (cm)	FISIONES TERMICAS	
	Experimental	Ajuste
0,000	1,000 ± 0,004	1,000
0,139	1,011 ± 0,003	1,009
0,278	1,037 ± 0,007	1,035
0,417	1,079 ± 0,008	1,080
0,520	---	1,126
valor medio	1,035 ± 0,004 ^a	1,038
a) Corregido en + 0,28 % por borde		

TABLA IV
Distribución Vertical de Fisiones Térmicas
en la "Microbarra" de UO₂

H (cm)	FISIONES TERMICAS	
	Técnica trazos ^a	Técnica activación ^a
0,60	1,076 ± 0,016	1,066 ± 0,017
1,29	1,034 ± 0,016	1,026 ± 0,016
1,98	1,000	1,000
2,67	0,964 ± 0,015	0,995 ± 0,016
a) El error asignado incluye la dispersión del punto de normalización (1,98 cm).		

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer al Ing. D. Vasallo, jefe de la División Técnicas Especiales, quien con su asesoramiento e interés hizo posible el desarrollo de la técnica de recuento y nos facilitó el uso de los equipos del Laboratorio de Metalografía. Agradecemos a Sra. Ligia Recalde la colaboración constante y entusiasta en los problemas de recuento absoluto de trazas y obtención de microfotografías. Nuestro reconocimiento también al resto del personal del Laboratorio de Metalografía, por la asistencia prestada.

Asimismo deseamos agradecer al Sr. Isaac Dymont, Jefe de la Planta Piloto de Núcleos Cerámicos, quien nos proporcionó el combustible usado en este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- 1) GREENWOOD, R.G., HELMER, R.G., ROGERS, J.W., DUDEY, N.D., POPEK, R.J., KELLOG, L.S., ZIMMER, W.H., Nucl. Tech., 25, p 274 (1975).
- 2) RICABARRA, G., RICABARRA, D., "Microscopic parameter Measurement in 3% Uranium Oxide Water Moderated Lattices (0,444 in. diam. rods)", BNL 7-20-62, Memo, (1962).
- 3) SILK, E.C.H., BARNES, R.S., Phil. Mag., 4, p 970 (1959).
- 4) FLEISCHER, R.L., PRICE, P.B., WALKER, R.M., Phys. Rev., 156, 2 (1967).
- 5) PRICE, P.B., WALKER, R.M., J. Appl. Phys., 33, p3407 (1962).
- 6) GARNISH, J.D., "Recent Advances In Radiochemical Methodology", mayo (1974).
- 7) KHAN, H.A., Nucl. Instrum. Methods, 113, 1 (1973).
- 8) CONGEL, F.G., ROBERTS, J.H., "Proc. Int. Conf. on Nuclear Track Registration and Appl.", CLERMONT-FERRAND, France, Vol. 2, pp. 1X, p2-5 (1969).
- 9) BESANT, C.B., IPSON, S.S., "Progress in the Appl. of SSTR to Reactor Physics Experiments", AEEW-M 881 (1969).
- 10) TUYN, J.W.N., Nucl. Appl. 3, 6 (1967).
- 11) RAGO, P.F., GOLDSTEIN, N., TOCHILIN, E., Nucl. Appl. Tech., 8, 3 (1970).
- 12) RICABARRA, D., TURJANSKI, R., RICABARRA, G., Can. J. Phys., 48, 20 (1970).
- 13) RICABARRA, D., TURJANSKI, R., RICABARRA, G., BIGHAM, C.B., Can. J. Phys., 46, 22 (1968).
- 14) BERZINA, I.G., GEGUZIN, Y.E., VARABERA, I.V., Sov. Phys. Dokl., 12, p 814 (1968).
- 15) GOLD, R., ARMANI, R.J., ROBERTS, J.H., Nucl. Sci. Eng., 34, P 13, (1968).

- 16) GRUNDL, J.A., GILLIAM, D.M., DUDEY, N.D., POPEK, R.J., Nucl. Tech. 25, p 237 (1975).
- 17) RICABARRA, G., TURJANSKI, R., RICABARRA, D., "Nuclear Data in Sci. and Tech. "IAEA, Vienna, 1973, IAEA-SM 170/2 (1973).
- 18) RICABARRA, D., "Serie: Programa Reducción de fctopicos en un Sistema Automático de Medición", (1974) (sin publicar).
- 19) WAISMAN, D. , Comunicación Privada.
- 20) MUGHABGHAB, S.F., GARBER, D.I., BNL 325, VI, 3^o Ed. (1973).
- 21) WESTCOT, C.H., AECL-1101 (1962).
- 22) DE COSTER, M., LANGELA, D., Nucl. Appl. Tech., 9, p 229 (1970).
- 23) WATSON, G.N., "A Treatise on the Theory of Bessel Functions", Cambridge University Press, 2^a Ed., p 698 (1952).
- 24) COHN, C.E., ARMANI, J.R., Rev. Sci. Instrum., 46, p 18 (1975).



