

Determinación del quemado de los elementos combustibles del reactor nuclear RP-10 mediante el método de espectrometría gamma

Mariano Vela^{1,*}, Alberto Gallardo¹, José Castro¹, Luis Terremoto²

¹ Cálculo Análisis y Seguridad, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima, Perú

² Centro de Ingeniería Nuclear (CEN) del Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP- Brasil)

Resumen

Se presenta los valores de quemado para los elementos combustibles NN001, NN002, NN003 y NN004 del reactor RP-10, determinado mediante el método de espectrometría gamma utilizando como monitor de quemado el ¹³⁷Cs. Se describe el equipo y procedimiento experimental para la calibración y el barrido de los elementos combustibles. Los resultados muestran valores de quemado inferiores a los valores encontrados mediante el método de cálculo neutrónico, manteniendo una correlación entre los valores máximo y mínimo.

Abstract

We present the values of burn-up corresponding to the fuel elements: NN001, NN002, NN003 and NN004 of the RP-10 nuclear reactor determined by gamma spectrometry method. It was used the ¹³⁷Cs as a monitor of burn-up. It describes the equipment and experimental procedure for calibration and sweeping fuel elements. The results show that the values are lower than those founded by calculation method and maintaining a correlation between the maximum and minimum values.

1. Introducción

El quemado de combustible nuclear es el proceso por el cual material fértil (²³⁵U, ²³⁹Pu) y material fértil (²³⁸U) disminuye cuando es sometido a irradiación con neutrones en un reactor. El reporte de quemado se hace en diferentes unidades: Energía liberada por tonelada de combustible [MWd/Ton], masa consumida [g], porcentaje consumido [%].

Existen diferentes métodos para determinar el quemado de combustible nuclear: métodos de cálculo (usando códigos de cálculo) y métodos experimentales como: espectrometría gamma de los productos de fisión, análisis radioquímico de los productos de fisión, mediciones de variaciones de reactividad, etc.

La evaluación del quemado de los elementos combustible es importante desde el punto de vista de la seguridad del reactor con la finalidad de no superar los límites establecidos en el diseño; y además permite efectuar configuraciones nucleares para alcanzar mayores niveles de flujo de neutrones en zonas específicas y mejorar la distribución de densidad de potencia en el reactor.

2. Elementos combustible del reactor RP-10

El combustible del reactor nuclear RP-10 es un óxido de uranio, U₃O₈, enriquecido al 19.75 % en ²³⁵U y disperso en una matriz de aluminio. Esta mezcla (material fértil y dispersante) se denomina MEAT, cuyas medidas son: largo 615 mm, ancho 62.75 mm y espesor 1 mm.

El "meat" se encuentra en el interior de una placa de aluminio-magnesio haciendo en conjunto un espesor de 1.76 mm con un contenido aproximado de 17.5 gramos de ²³⁵U cada una y se denomina placa combustible.

Un elemento combustible normal, con denominación NN, consta de 16 placas combustible y hacen un total de 280gramos de ²³⁵U por elemento (Fig. 1) y un elemento combustible de control, denominado NC, consta de 12 placas combustibles, haciendo un total de 210 gramos de ²³⁵U.

* Correspondencia autor: mvela@ipen.gob.pe



Figura 1: Vista de un elemento combustible normal.

En la Figura 2a se observa el ancho del meat de 62.75 mm y las dos placas de aluminio-magnesio que la cubren, en un elemento combustible de 16 placas.

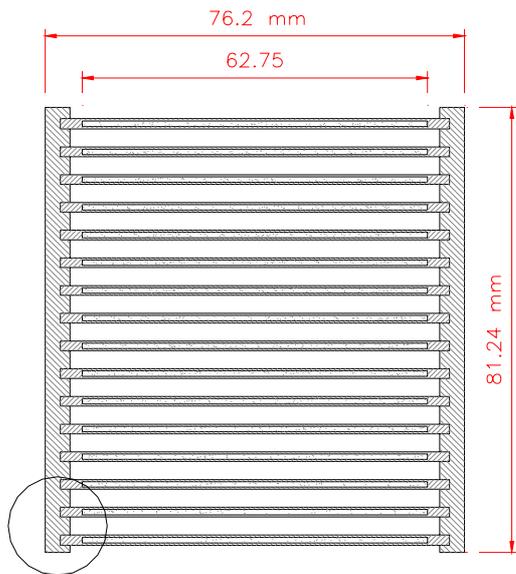


Figura 2a: Sección transversal de un elemento combustible normal.

En la Figura 2b se observa el detalle del espesor de placa de 1.76 mm y el espesor del meat de 1.0 mm, el canal de 3.3 mm es el espacio que hay entre placa y placa.

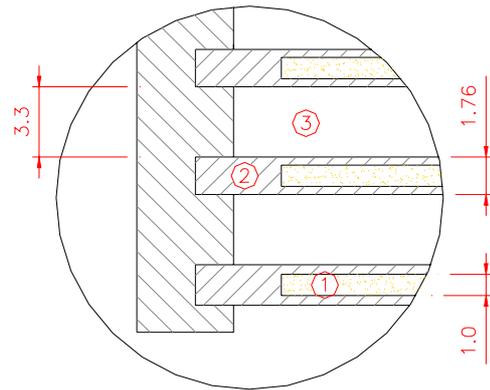


Figura 2b: Detalle: 1) MEAT, 2) Placa combustible, 3) canal de refrigeración.

3. Método de espectrometría gamma

El método de espectrometría gamma es una técnica no destructiva, basado en la medición de la actividad radiactiva proveniente del decaimiento de ciertos productos de fisión (monitores de quemado) cuya formación ha tenido lugar durante la irradiación de los elementos combustibles. Un monitor de quemado debe cumplir ciertas propiedades nucleares que permitan obtener buenos resultados, tales como: porcentaje significativo de formación del monitor, período de semi-desintegración largo comparado con el historial de irradiación, muy baja sección eficaz de absorción a neutrones para evitar quemado del mismo monitor, bajo poder de emigración a lo largo del elemento combustible.

3.1 Fundamento Teórico

La actividad de un elemento combustible normal, con respecto al monitor de quemado, es la contribución de las 16 placas combustibles que conforman dicho elemento [1]; esto es

$$D = 16lws\bar{\rho} \quad \dots\dots\dots (1)$$

donde

l, w, s: representan el largo, ancho y espesor del MEAT respectivamente.

$\bar{\rho}$: es el valor medio de la actividad específica gamma del MEAT.

El número de cuentas promedio registrado en el detector y la actividad gamma del elemento combustible esta dado por:

$$\bar{Q} = \bar{\rho}sy \sum_{j=1}^{16} A_j \varepsilon_j k_1 k_3 k_2^{16-j} \quad \dots\dots\dots (2)$$

donde

\bar{Q} : es el número de cuentas netas promedio debido a las 16 placas que conforman el elemento combustible normal

y : fracción de emisión gamma del ^{137}Cs

$A_j \varepsilon_j$: es la eficiencia absoluta para la geometría fuente-colimador-detector. Tiene dimensiones de área debido a que el detector “ve” a través del colimador cierta región de las placas y evidentemente depende también de la abertura del colimador y de la posición relativa colimador placa combustible.

k_1 : factor de auto-atenuación lineal del MEAT

k_2 : factor que tiene en cuenta la atenuación lineal del conjunto: MEAT, placas de aluminio y espesor de la capa de agua de refrigeración del elemento combustible.

k_3 : factor de atenuación lineal de la capa de agua que separa el elemento combustible y el colimado inferior.

Igualando las expresiones (1) y (2) obtenemos la relación entre la actividad, D , y el número de cuentas netas promedio, \bar{Q} , obtenido en el proceso de barrido del elemento combustible.

$$D = \frac{16lw\bar{Q}}{y \sum_{j=1}^{16} A_j \varepsilon_j k_1 k_3 k_2^{16-j}} \quad (3)$$

El quemado de combustible se determina por

$$\Delta U = \frac{16lw\bar{Q}m_0f}{Y N_U^0 \lambda y k_1 k_3 \sum_{j=1}^{16} A_j \varepsilon_j k_2^{16-j}} e^{\lambda t_e} \quad (4)$$

donde

ΔU : masa de uranio quemado

Y : rendimiento del ^{137}Cs en la fisión del ^{235}U

N_U^0 : número de átomos iniciales de ^{235}U

m_0 : masa inicial del ^{235}U

λ : constante de decaimiento del ^{137}Cs

f : factor de corrección por decaimiento del ^{137}Cs durante los períodos de irradiación del elemento combustible [2].

$$f = \frac{\lambda \sum_{j=1}^n w_j t_j}{\sum w_j e^{-\lambda \tau_j} (1 - e^{-\lambda t_j})} \quad (5)$$

donde

w_j : potencia promedio relativa a la cual fue sometido el elemento combustible

n : número de periodos de irradiación

t_j : tiempo de duración del periodo j

t_j : intervalo de tiempo transcurrido entre el final del período j y el inicio del período $j+1$.

3.2 Técnica experimental

La técnica consiste en guiar la radiación gamma desde el elemento combustible ubicado en la pileta auxiliar (1.8 metros por debajo del nivel libre de agua) hasta un detector de GeHP (ubicado en el borde de la pileta) [3,4].

El mecanismo de barrido consta de dos plataformas con movimientos transversales y un tubo guía vertical de aluminio ($\phi = 32$ mm, $L = 3.4$ m) con colimadores de plomo de 6 mm de diámetro interno en ambos extremos [5].

Haciendo un barrido longitudinal y transversal sobre la parte activa del combustible se obtiene perfiles de actividad del monitor de quemado, los cuales están relacionados directamente con el grado de quemado del ^{235}U .

3.3 Procedimiento de medición

El procedimiento experimental se realizó en dos secuencias: la primera consistió en la calibración para hallar la eficiencia absoluta del sistema de medición y la segunda consistió en el barrido longitudinal del elemento combustible para obtener los perfiles de actividad del ^{137}Cs .

En la calibración se usó una fuente patrón de ^{137}Cs de 14.08 mCi y diámetro activo 6 mm colocado por debajo del colimador inferior y en una placa de acrílico con cavidad central para alojar a la fuente. El tiempo de conteo se fijó en 30 minutos y se tomo tres lecturas para hallar una eficiencia promedio.

El elemento combustible se colocó sobre la plataforma fija, quedando las caras de las placas combustibles, horizontalmente y perpendicular al eje del tubo guía, con una separación aproximada de 0.3 cm entre la placa superior del elemento combustible y el colimador inferior.

El barrido se realizó a lo largo de la parte activa de las placas combustible siguiendo tres líneas paralelas en un rango de 61.5 cm y separadas 2.5 cm una de la otra.

En la Figura 3 se muestra la disposición experimental del mecanismo de barrido: en el fondo se ubica el elemento combustible, desde donde se dirige el tubo guía hasta el detector de GeHP en el borde de la piletta. En la Tabla N° 1 se presenta un resumen del historial de irradiación y las fechas en que fueron medidos para determinar su quemado. Todos los elementos ingresaron al núcleo del RP-10 en noviembre de 1988.

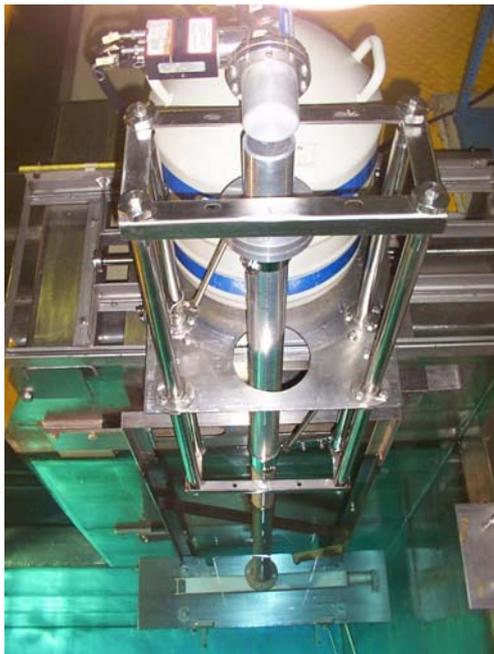


Figura 3: Disposición experimental del mecanismo de barrido.

El perfil de actividad para el ^{137}Cs , se obtiene para cada elemento combustible haciendo un barrido longitudinal a todo lo largo del meat (61.5 cm), tal como se muestra en la fig. 4, en donde se observa 2 picos a los extremos debido a la reflexión de neutrones por el moderador y un punto máximo en la curva como indicador del mayor quemado en el combustible.

Tabla 1: Datos de los elementos combustibles a los cuales se ha medido su quemado.

Elemento Combustible	Fecha de salida (d/m/a)	Fecha de barrido (d/m/a)	Tiempo de decaimiento (d)
NN 001	15/03/2006	16/11/2006	246
		09/03/2007	359
		14/03/2007	364
		21/06/2007	463
		09/08/2007	512
		22/11/2007	617
NN 002	12/06/2003	15/11/2006	1252
		16/03/2007	1373
		21/06/2007	1470
		10/08/2007	1520
		28/11/2007	1630
NN 003	12/06/2003	09/11/2006	1246
		17/03/2007	1374
		05/07/2007	1484
NN 004	12/06/2003	17/08/2007	1527
		28/10/2006	1234
		09/03/2007	1366
		05/07/2007	1484
		23/08/2007	1533

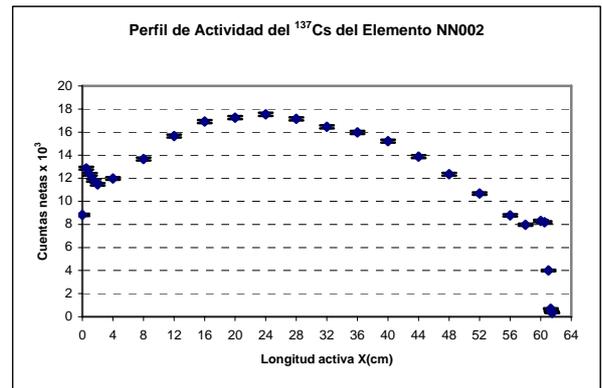


Figura 4: Perfil de actividad del ^{137}Cs para el Elemento Combustible NN002. El barrido se inició desde la boquilla del elemento combustible.

4. Tratamiento de Datos y Resultados

Se determinó la actividad promedio \bar{Q} para los perfiles de actividad y mediante la ecuación N° 4 se determinó la cantidad de ^{235}U fisionado. Para determinar el factor f, se trabajó en hoja de cálculo excel, en donde se considera el historial de irradiación del elemento combustible, esto es: día y hora en que el reactor llega crítico, potencia, tiempo de operación, así como las fluctuaciones de potencia durante la operación.

Tabla 2: Valores de quemado determinado experimentalmente y por cálculo neutrónico.

Elemento Combustible	Quemado promedio	
	Experimental (%)	Cálculo *
NN001	46.00 ± 1.2	46.62
NN002	43.06 ± 1.19	44.67
NN003	43.56 ± 1.52	44.94
NN004	47.77 ± 1.53	46.76

* Ref. [6 y 7]

5. Conclusiones

A partir de los resultados parciales obtenido en las fechas de barrido para cada elemento combustible (tabla N° 1), se observa que los valores presentan una buena correlación estadística dentro de los límites de precisión del método.

Los promedios finales están en buena correlación con los resultados obtenidos por cálculo neutrónico.

En conclusión estos resultados nos muestran que la aplicación del método de espectrometría gamma, utilizando como monitor de quemado el ^{137}Cs , es confiable, y servirán para validar los resultados obtenidos mediante el cálculo neutrónico.

6. Agradecimientos

Al Grupo de Operación del RP-10 por su participación en los turnos prolongados para la realización de las experiencias de barrido de los elementos combustibles.

7. Bibliografía

[1] Kestelman A, Riveiro G. Determinación del quemado de combustible tipo MTR mediante espectrometría gamma con cristal de NaI(Tl). Informe Técnico CNEA-CAB, San Carlos de Bariloche, Octubre de 1990.

[2] Bivichev B, Majorov Y, *et al.* The problem of determining fuel burnup from the Cs-134/Cs-137 activity ratio. En: International Atomic Energy Agency. Proceeding of a Symposium on Nuclear Safeguards Technology. Vol. I; 1978 october 2-6; Vienna: Austria; 1979.

[3] Hanna GL. Safeguards verification of spent material testing reactor (MTR) fuels using gamma-ray spectrometry. Australia, IAEA-SM-231/132.

[4] Herbert S. Determination of uranium and plutonium in nuclear fuels. Verlag Chemie, Kernchemie in Einzeldarstellungen, Vol. 5.

[5] Tsujimura S. Applicability of non-destructive assay techniques to spent fuels from boiling water reactors. En: International Atomic Energy Agency. Proceeding of a Symposium on Nuclear Safeguards Technology. Vol. I; 1978 october 2-6; Vienna: Austria; 1979. p. 305.

[6] Gallardo Padilla A. Cálculo de consumo y quemado del ^{235}U de los elementos combustibles del RP-10. Informe Interno IPEN, 09-01-2008.

[7] Gallardo Padilla A. Cálculo con WIMNSD4 para el RP-10 del consumo y quemado el ^{235}U y de la relación captura/fisión (α), Informe Interno IPEN.