

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 2	AÑO 1976

08.76.05

CNEA-NT 12/76

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

GERENCIA DE TECNOLOGIA

COMPORTAMIENTO DE LOS GASES DE FISION EN EL PROTOTIPO CNEA-MZFR Ia

RAUL L. OLEZZA

Departamento Combustibles Nucleares
Buenos Aires-Argentina
1976

- I. INTRODUCCION
- II. INFORMACION PRIMARIA SOBRE LA EXPERIENCIA
 - A. Principales parámetros de diseño de las barras
 - B. Mediciones y ensayos de preirradiación
 - 1. Determinaciones comunes a todas las barras
 - 2. Determinaciones particulares sobre las barras
 - C. Mediciones y ensayos de posirradiación
 - 1. Observación visual
 - 2. Gases de fisión
 - 3. Quemado
 - 4. Estructura
 - D. Historia de irradiación
 - 1. Posición del elemento en el reactor
 - 2. Posición de las barras en el elemento combustible
 - 3. Tiempo de irradiación
- III. ELABORACION DE LA INFORMACION
 - A. Cálculos previos
 - B. Gases de fisión
 - 1. Generales
 - 2. Liberados
 - 3. Retenidos en el material combustible
- IV. APLICACION DEL CODIGO PIZZA
 - A. Resultados
 - B. Discusión
- V. DISCUSION GENERAL Y CONCLUSIONES
- VI. BIBLIOGRAFIA
- VII. APENDICES

I. INTRODUCCION

Efectuada la irradiación del elemento combustible de potencia denominado "Prototipo CNEA -MZFR Ia", con los propósitos detallados en (1), y realizados los ensayos de posirradiación correspondientes, este informe reúne y elabora la información obtenida de la experiencia, en lo que se refiere a los fenómenos relacionados con los gases de fisión. Esto posibilita evaluar el comportamiento del combustible en esta irradiación y permitirá llevar a cabo ajustes y verificaciones en los códigos de cálculo en uso y, además, comparar comportamientos en otras irradiaciones. Se incluyen también resultados provenientes de la aplicación del Código Pizza.

II. INFORMACION PRIMARIA SOBRE LA IRRADIACION

A continuación se consignan datos provenientes de los ensayos de pre y posirradiación, así como de la historia de la irradiación, tomados del Protocolo de Fabricación del prototipo (2), de los informes del Laboratorio de Celdas Calientes de Karlsruhe (3) y de la CNEA (1) referidos a los ensayos de posirradiación, necesarios para procesar la información. Los valores se refieren únicamente a las tres barras del elemento combustible, sobre las cuales se efectuaron análisis de gases.

A. Principales parámetros de diseño de las barras

Vaina: Zry-4 - Sandvick
diámetro: 11,75 mm
espesor: 0,62 mm

Material combustible: Pastilla UO_2 sinterizado (natural)
diámetro pastilla: 10,39 - 10,41 mm
gap pastilla vaina: 0,02 - 0,08 mm

B. Mediciones y ensayos de preirradiación

1. Determinaciones comunes a todas las barras

Densidad: $10,4 \text{ g/cm}^3$ (94,8% D.T.)
Contenido de humedad en la superficie de las pastillas $< 4 \text{ ppm}$
Area específica: $10 \text{ cm}^2/\text{g}$

2. Determinaciones particulares sobre las barras

TABLA 1

Denominación de la barra	2 T	10 T	23 T
Determinación			
masa de UO_2 g	1613,092	1612,694	1595,087
masa de U g	1421,908	1421,558	1406,037
longitud de columna activa mm	1826,81	1826,36	1806,42

C. Mediciones y ensayos de posirradiación

1. Observación visual

La observación visual no detectó deformaciones en las barras.

2. Gases de fisión

Se efectuó el análisis cuali y cuantitativo de los gases de fisión liberados y ocluidos en poros y en la red cristalina, se determinó además, el contenido de ^{85}Kr . Los valores obtenidos fueron corregidos por tiempo al momento correspondiente al final de la residencia del elemento combustible en el reactor.

El análisis del gas libre en la barra dió los siguientes resultados:

TABLA 2

Barra		2 T	10 T	23 T
Isótopo				
Kr	mm ³	9,5	9,3	12,9
Xe	mm ³	63,5	55,3	106,5
Kr + Xe	mm ³	73,0	64,6	119,4
Actividad específica $\mu\text{Ci/mm}^3$		99	97	101

Los valores correspondientes a los gases retenidos en poros son:

TABLA 3

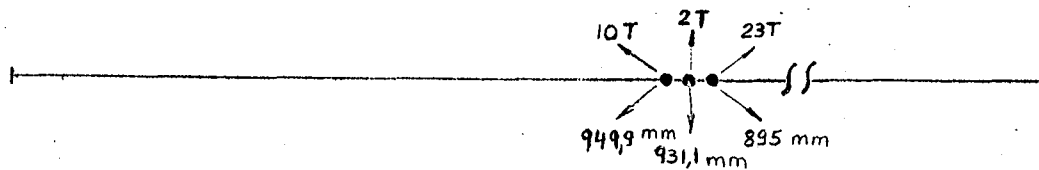
Barra		2 T	10 T	23 T
Kr	mm ³	10,7	16,5	16,2
Xe	mm ³	112	52,5	54,9
Kr + Xe	mm ³	122,7	69,0	71,1
Actividad específica $\mu\text{Ci/mm}^3$		123	112	118
masa de muestra g		7,78	8,54	9,13

En cuanto a los gases ocluidos en la red cristalina:

TABLA 4

Barra	2 T	10 T	23 T
Kr mm ³	74,1	49,6	53,6
Xe mm ³	696	515	516
Kr + Xe mm ³	770,1	564,6	569,6
Actividad específica $\mu\text{Ci/mm}^3$	124	109	142
masa de muestra g	7,03	3,36	6,23

Posición de las muestras de material cerámico con respecto al extremo inferior de la barra combustible.



3. Quemado

Para una de las barras, la 23T, se determinó quemado por vía química en tres puntos perfectamente localizados. Para las restantes barras se efectuó una única determinación, considerándose por consiguiente que el quemado varía con la posición según la misma ley con que lo hace en la 23T, es decir 3,07 MW/tU por mm (1).

En la tabla 5 la ubicación de la muestra se toma respecto al extremo superior de la barra.

TABLA 5

Barra	Posición mm	Quemado MWd/tU	Quemado normalizado MWd/tU
23 T	872	5620	5700
	900	5700	
	1800	8380	
10 T	931	5050	4950
2 T	928	4700	4610

En la última columna de la tabla anterior se da el quemado normalizado a 900 mm del extremo superior.

Según se informa en (1), la contribución al número de fisiones totales producidas por cada isótopo fisionable es la siguiente:

TABLA 6

Isótopo Barra	Contribución %			
	U235	U238	Pu239	Pu241
2 T	60,4	8,2	30,8	0,6
10 T	57,8	8,0	33,4	0,8
23 T	50,6	8,3	39,2	1,9
	57,8	8,2	32,9	1,1
	62,1	8,0	29,6	0,4

4. Estructura

Ceramografías de tres secciones transversales de la barra 23 T pueden observarse en (3), y un análisis de la microestructura del material cerámico irradiado, que no habría superado los 1400°C, se incluye en (1)

D. Historia de irradiación

1. Posición del elemento en el reactor

El elemento ocupó, según se indica en el esquema adjunto del núcleo del reactor MZFR Fig. 1, la posición 8 desde el 4/1/71 al 22/4/71 y desde el 22/4/71 al 31/8/71 la posición 2. La ubicación relativa del prototipo respecto al plano medio y al eje vertical del núcleo del reactor fue la misma en ambos períodos.

2. Posición de las barras en el elemento combustible

El diagrama de la Fig. 2 muestra la disposición de las barras en las cuales se efectuó análisis de gases en el elemento combustible y la orientación respecto al centro del núcleo.

3. Tiempo de irradiación

El elemento prototipo permaneció 109 días en la posición 8 alcanzando un quemado estimado de 2000 MWd/tU y en la 2, 131 días. Esto implica un total de 240 días de irradiación; aunque el tiempo efectivo resultó ser algo menor debido a los ciclos de potencia del reactor producidos en ese lapso.

III. ELABORACION DE LA INFORMACION

Los datos ya consignados deben elaborarse a fin de poderlos interpretar adecuadamente en la evaluación del comportamiento del combustible y aplicarlos en la verificación de códigos de cálculo.

A. Cálculos previos

Se resumen aquí los cálculos de algunos parámetros de irradiación, necesarios para el procesamiento de la información

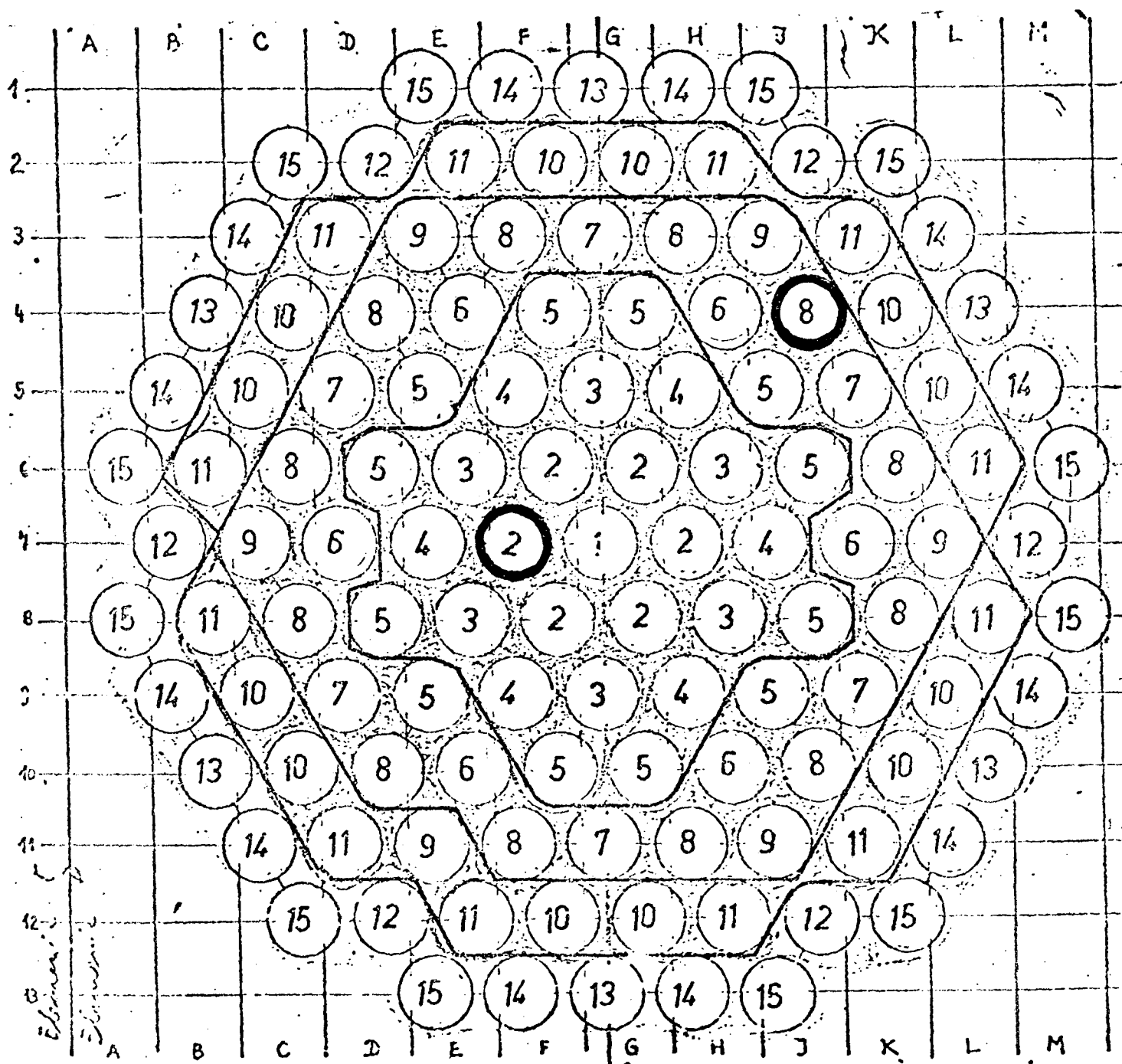
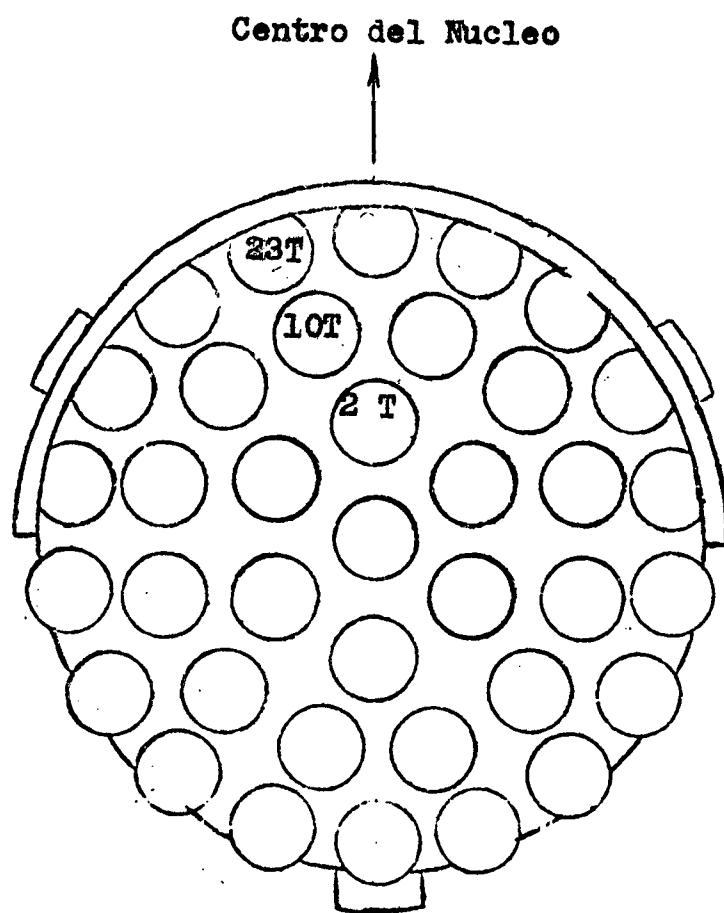


fig. 1



Sección transversal del elemento prototipo CNEA-MZFR-1, visto desde su extremo superior.

fig. 2

TABLA 7

Barra Parámetro	2 T	10 T	23 T
Quemado medio MWd/tU Apéndice 1	4651,15	4990,46	5709,85
Número de fisiones totales	$1637,70 \cdot 10^{19}$	$1748,75 \cdot 10^{19}$	$1977,63 \cdot 10^{19}$
Número de fisiones de U235	$989,1683 \cdot 10^{19}$	$1010,776 \cdot 10^{19}$	$1159,486 \cdot 10^{19}$
Número de fisiones de U238	$134,2911 \cdot 10^{19}$	$139,899 \cdot 10^{19}$	$161,375 \cdot 10^{19}$
Número de fisiones de Pu239	$504,4103 \cdot 10^{19}$	$584,0814 \cdot 10^{19}$	$670,4177 \cdot 10^{19}$
Número de fisiones de Pu241 Apéndice 2	$9,8262 \cdot 10^{19}$	$13,990 \cdot 10^{19}$	$21,7540 \cdot 10^{19}$
Potencia específica W/cm Apéndice 3	150,84	161,85	185,18

El quemado medio se calculó suponiendo una variación lineal del quemado con la distancia al extremo superior de la barra.

B. Gases de fisión

1. Generados

La tabla siguiente contiene el número de átomos de Kr85, Kr y Xe producidos en cada barra y discriminados según el isótopo fisiónable del cual provienen. El cálculo con cierto grado de detalle se incluye en el apéndice 4.

TABLA 8

		Número de átomos		
Barra		2 T	10 T	23 T
isótopo	isótopo fisionable			
Kr85		46,27.10 ¹⁸	48,40.10 ¹⁸	55,67.10 ¹⁸
	U235	28,98.10 ¹⁸	29,62.10 ¹⁸	33,97.10 ¹⁸
	U238	10,74.10 ¹⁸	11,19.10 ¹⁸	12,91.10 ¹⁸
	Pu239	6,41.10 ¹⁸	7,42.10 ¹⁸	8,51.10 ¹⁸
	Pu241	0,12.10 ¹⁸	0,18.10 ¹⁸	0,28.10 ¹⁸
Krtotal		502,39.10 ¹⁸	525,01.10 ¹⁸	604,65.10 ¹⁸
	U235	381,13.10 ¹⁸	389,45.10 ¹⁸	446,45.10 ¹⁸
	U238	36,93.10 ¹⁸	38,47.10 ¹⁸	44,38.10 ¹⁸
	Pu239	82,72.10 ¹⁸	95,79.10 ¹⁸	109,95.10 ¹⁸
	Pu241	1,61.10 ¹⁸	2,29.10 ¹⁸	3,57.10 ¹⁸
Xe		4472,22.10 ¹⁸	4786,33.10 ¹⁸	5510,18.10 ¹⁸
	U235	2657,90.10 ¹⁸	2715,95.10 ¹⁸	3415,54.10 ¹⁸
	U238	327,67.10 ¹⁸	391,36.10 ¹⁸	393,76.10 ¹⁸
	Pu239	1458,25.10 ¹⁸	1688,58.10 ¹⁸	1938,18.10 ¹⁸
	Pu241	28,41.10 ¹⁸	40,44.10 ¹⁸	62,89.10 ¹⁸
Kr+Xe		4974,61.10 ¹⁸	5312,34.10 ¹⁸	6114,84.10 ¹⁸

En la tabla 9 se presenta el número de átomos generados por unidad de masa de combustible.

TABLA 9

Isótopo \ Barra	2 T	10 T	23 T
Kr85	$0,029 \cdot 10^{18}$	$0,030 \cdot 10^{18}$	$0,356 \cdot 10^{18}$
Krtotal	$0,311 \cdot 10^{18}$	$0,324 \cdot 10^{18}$	$0,379 \cdot 10^{18}$
Xetotal	$2,772 \cdot 10^{18}$	$2,970 \cdot 10^{18}$	$3,454 \cdot 10^{18}$
Xe+Kr	$3,081 \cdot 10^{18}$	$3,282 \cdot 10^{18}$	$3,834 \cdot 10^{18}$

2. Liberados

La tabla siguiente contiene el número de átomos de Kr85, Kr total, Xe total y Kr+Xe liberados, de acuerdo al cálculo que se desarrolla en el Apéndice 5.

TABLA 10

Isótopo \ Barra	2 T	10 T	23 T
Kr85 (átomos)	$1,7340 \cdot 10^{16}$	$1,669 \cdot 10^{16}$	$2,410 \cdot 10^{16}$
Kr (átomos)	$25,53 \cdot 10^{16}$	$24,989 \cdot 10^{16}$	$34,662 \cdot 10^{16}$
Xe (átomos)	$170,624 \cdot 10^{16}$	$148,591 \cdot 10^{16}$	$286,166 \cdot 10^{16}$
Xe+Kr (átomos)	$196,151 \cdot 10^{16}$	$173,580 \cdot 10^{16}$	$320,828 \cdot 10^{16}$

La Tabla 11 se conformó tomando los valores de la anterior y relacionándolos con la masa, y con la masa y la potencia específica.

TABLA 11

		2 T	20 T	23 T
<u>Kr85</u> m	<u>átomos</u> g	$0,107 \cdot 10^{14}$	$0,103 \cdot 10^{14}$	$0,15 \cdot 10^{14}$
	<u>mm³</u> g	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,39 \cdot 10^{-3}$	$0,56 \cdot 10^{-3}$
<u>Kr</u> m	<u>átomos</u> g	$1,582 \cdot 10^{14}$	$1,55 \cdot 10^{14}$	$2,17 \cdot 10^{14}$
	<u>mm³</u> g	$5,88 \cdot 10^{-3}$	$5,76 \cdot 10^{-3}$	$8,08 \cdot 10^{-3}$
<u>Xe</u> m	<u>átomos</u> g	$10,58 \cdot 10^{14}$	$9,21 \cdot 10^{14}$	$17,94 \cdot 10^{14}$
	<u>mm³</u> g	$39,35 \cdot 10^{-3}$	$34,28 \cdot 10^{-3}$	$66,76 \cdot 10^{-3}$
<u>Xe+Kr</u> m	<u>átomos</u> g	$12,16 \cdot 10^{14}$	$10,76 \cdot 10^{14}$	$20,11 \cdot 10^{14}$
	<u>mm³</u> g	$45,6 \cdot 10^{-3}$	$40,4 \cdot 10^{-3}$	$75,4 \cdot 10^{-3}$
<u>Kr85</u> m.W	<u>átomos . cm</u> g . watt	$0,07 \cdot 10^{12}$	$0,063 \cdot 10^{12}$	$0,084 \cdot 10^{12}$
<u>Kr</u> m.W	<u>átomos . cm</u> g . watt	$1,04 \cdot 10^{12}$	$0,957 \cdot 10^{12}$	$1,173 \cdot 10^{12}$
<u>Xe</u> m.W	<u>átomos . cm</u> g . watt	$7,02 \cdot 10^{12}$	$5,69 \cdot 10^{12}$	$9,69 \cdot 10^{12}$
<u>Xe+Kr</u> m.W	<u>átomos . cm</u> g . watt	$8,06 \cdot 10^{12}$	$6,65 \cdot 10^{12}$	$10,86 \cdot 10^{12}$

Los porcentajes de liberación son los siguientes, normalizados respecto a la barra 2 T.

TABLA 12

Barra $\frac{\text{at. liberados}}{\text{at. producidos}} \cdot 10^2$	2 T	10 T	23 T
Kr85	0,038 1	0,034 0,895	0,043 1,119
Kr	0,051 1	0,048 0,941	0,057 1,124
Xe	0,038 1	0,031 0,816	0,052 1,368
Xe + Kr	0,043 1	0,033 0,767	0,052 1,220

3. Retenidos en el material combustible

En forma análoga a la utilizada para la elaboración de los datos correspondientes a los gases libres, se calcularon los valores que se presentan en las tablas 13 a 20 a partir de las tablas 1, 3, 4 y 7 tanto para los gases en los poros como en la red.

a. Gases en poros:

Se indica para cada una de las barras el porcentaje en volumen que representa la muestra de UO_2 tomada respecto al volumen de la pastilla y las cantidades de Kr85, Kr, Xe, y Kr+Xe retenidas en los poros, en diferentes formas, convenientes para futuras comparaciones

TABLA 13

Barra	Volumen de muest. de UO_2 cm^3	$\frac{\text{Vol. muest. } \text{UO}_2}{\text{Vol. pastilla}}$ %	Número de átomos de Kr85	Número de átomos de Kr	Número de átomos de Xe	Número de átomos Kr+Xe
2 T	0,7481	73,42	$2,4346 \cdot 10^{16}$	$26,676 \cdot 10^{16}$	$300,94 \cdot 10^{16}$	$327,616 \cdot 10^{16}$
10 T	0,8212	80,58	$3,419 \cdot 10^{16}$	$44,336 \cdot 10^{16}$	$141,068 \cdot 10^{16}$	$185,404 \cdot 10^{16}$
23 T	0,8779	86,15	$3,536 \cdot 10^{16}$	$43,529 \cdot 10^{16}$	$147,516 \cdot 10^{16}$	$191,945 \cdot 10^{16}$

TABLA 14

Barra	$\frac{\text{Vol. Kr85}}{\text{masa}}$ cm^3/g	$\frac{\text{Vol. Kr}}{\text{masa}}$ cm^3/g	$\frac{\text{Vol. Xe}}{\text{masa}}$ cm^3/g	$\frac{\text{Vol. Xe+Kr}}{\text{m}}$ cm^3/g	$\frac{\text{Vol. Kr85}}{\text{masa pot. esp}}$ $\text{cm}^4/\text{g. watt}$	$\frac{\text{Vol. Kr}}{\text{masa p. e.}}$ $\text{cm}^4/\text{g. w}$	$\frac{\text{Vol. Xe}}{\text{masa p. e.}}$ $\text{cm}^4/\text{g. w}$	$\frac{\text{Vol. Kr+Xe}}{\text{masa p. e.}}$ $\text{cm}^4/\text{g. w}$
2 T	$0,0116 \cdot 10^{-2}$	$0,1375 \cdot 10^{-2}$	$1,439 \cdot 10^{-2}$	$1,577 \cdot 10^{-2}$	$0,769 \cdot 10^{-6}$	$9,116 \cdot 10^{-6}$	$95,399 \cdot 10^{-6}$	$104,55 \cdot 10^{-6}$
10 T	$0,0149 \cdot 10^{-2}$	$0,1932 \cdot 10^{-2}$	$0,615 \cdot 10^{-2}$	$0,808 \cdot 10^{-2}$	$0,921 \cdot 10^{-6}$	$11,937 \cdot 10^{-6}$	$37,998 \cdot 10^{-6}$	$49,923 \cdot 10^{-6}$
23 T	$0,0144 \cdot 10^{-2}$	$0,1774 \cdot 10^{-2}$	$0,601 \cdot 10^{-2}$	$0,778 \cdot 10^{-2}$	$0,778 \cdot 10^{-6}$	$9,580 \cdot 10^{-6}$	$32,455 \cdot 10^{-6}$	$42,013 \cdot 10^{-6}$

Los volúmenes están corregidos a condiciones normales.

A continuación se tabulan para Kr85, Kr total, Xe y Xe+Kr, el número de átomos por unidad de masa de muestra y potencia específica.

TABLA 15

Barra	2 T	10 T	23 T
Kr 85 $\frac{\text{at. cm}}{\text{g. watt}}$	$20,74 \cdot 10^{12}$	$24,73 \cdot 10^{12}$	$20,91 \cdot 10^{12}$
Kr $\frac{\text{at. cm}}{\text{g. watt}}$	$244,34 \cdot 10^{12}$	$320,74 \cdot 10^{12}$	$257,46 \cdot 10^{12}$
Xe $\frac{\text{at. cm}}{\text{g. watt}}$	$2564,38 \cdot 10^{12}$	$1020,59 \cdot 10^{12}$	$872,52 \cdot 10^{12}$
Xe+Kr $\frac{\text{at. cm}}{\text{g. watt}}$	$2829,43 \cdot 10^{12}$	$1366,12 \cdot 10^{12}$	$1150,9 \cdot 10^{12}$

b. Gas en red:

Las siguientes tablas son similares a las presentadas para los gases ocluidos en los poros.

TABLA 16

Barra	Vol. de muestr. de UO_2 cm^3	$\frac{\text{Vol. muestr. } \text{UO}_2}{\text{Vol. pastilla}}$ %	Número de átomos de Kr85	Número de átomos de Kr	Número de átomos de Xe	Número de átomos de Kr+Xe
2 T	0,6760	66,33	$16,999 \cdot 10^{16}$	$199,11 \cdot 10^{16}$	$1870,15 \cdot 10^{16}$	$2069,26 \cdot 10^{16}$
10 T	0,3231	31,7	$10,002 \cdot 10^{16}$	$133,28 \cdot 10^{16}$	$1383,81 \cdot 10^{16}$	$1517,09 \cdot 10^{16}$
23 T	0,599	58,78	$14,081 \cdot 10^{16}$	$144,02 \cdot 10^{16}$	$1386,49 \cdot 10^{16}$	$1530,51 \cdot 10^{16}$

TABLA 17

Barra	$\frac{\text{Vol. Kr85}}{\text{masa}}$ cm^3/g	$\frac{\text{Vol. Kr}}{\text{masa}}$ cm^3/g	$\frac{\text{Vol. Xe}}{\text{masa}}$ cm^3/g	$\frac{\text{Vol. Xe+Kr}}{\text{masa}}$ cm^3/g	$\frac{\text{Vol. Kr85}}{\text{masa p.e.}}$ $\text{cm}^4/\text{g.w}$	$\frac{\text{Vol. Kr}}{\text{masa p.e.}}$ $\text{cm}^4/\text{g.w}$	$\frac{\text{Vol. Xe}}{\text{masa p.e.}}$ $\text{cm}^4/\text{g.w}$	$\frac{\text{Vol. Kr+Xe}}{\text{masa p.e.}}$ $\text{cm}^4/\text{g.w}$
2 T	$0,899 \cdot 10^{-3}$	$10,54 \cdot 10^{-3}$	$99,00 \cdot 10^{-3}$	$110,54 \cdot 10^{-3}$	$0,060 \cdot 10^{-4}$	$0,699 \cdot 10^{-4}$	$6,563 \cdot 10^{-4}$	$7,328 \cdot 10^{-4}$
10 T	$1,107 \cdot 10^{-3}$	$14,76 \cdot 10^{-3}$	$153,27 \cdot 10^{-3}$	$169,14 \cdot 10^{-3}$	$0,068 \cdot 10^{-4}$	$0,912 \cdot 10^{-4}$	$9,470 \cdot 10^{-4}$	$10,450 \cdot 10^{-4}$
23 T	$0,841 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$82,83 \cdot 10^{-3}$	$92,27 \cdot 10^{-3}$	$0,045 \cdot 10^{-4}$	$0,464 \cdot 10^{-4}$	$4,473 \cdot 10^{-4}$	$5,021 \cdot 10^{-4}$

Los volúmenes están corregidos a condiciones normales.

TABLA 18

Barra	2 T	10 T	23 T
Kr85 $\frac{\text{at. cm}}{\text{g. watt}}$	$160,3 \cdot 10^{12}$	$183,92 \cdot 10^{12}$	$20,9 \cdot 10^{12}$
Kr $\frac{\text{at. cm}}{\text{g. watt}}$	$1877,7 \cdot 10^{12}$	$2450,7 \cdot 10^{12}$	$1248,39 \cdot 10^{12}$
Xe $\frac{\text{at. cm}}{\text{g. watt}}$	$17635,9 \cdot 10^{12}$	$25446,75 \cdot 10^{12}$	$12018,15 \cdot 10^{12}$
Xe+Kr $\frac{\text{at. cm}}{\text{g. watt}}$	$19513,58 \cdot 10^{12}$	$28081,44 \cdot 10^{12}$	$13388,59 \cdot 10^{12}$

A partir de las tablas 15 y 18 se calculó la relación entre el número de átomos de Kr y Xe, por unidad de masa y potencia específica retenidos en la red con respecto a los ocluidos en poros, los resultados se presentan en la tabla siguiente.

TABLA 19

Barra	2 T	10 T	23 T
$\frac{\text{Kr red}}{\text{Kr poros}}$	7,68	7,64	4,85
$\frac{\text{Xe red}}{\text{Xe poros}}$	6,88	24,93	13,77
$\frac{(\text{Kr+Xe}) \text{ red}}{(\text{Kr+Xe}) \text{ poros}}$	6,90	20,55	11,63

La tabla 20 contiene las relaciones entre las cantidades de gases de fisión en red y en poros con respecto a las generadas, considerándose los valores por unidad de masa y potencia específica.

TABLA 20

Barra	Kr		Xe		Kr+Xe		Kr+Xe poros+red
	Poros	Red	Poros	Red	Poros	Red	
2 T	0,119	0,911	0,140	0,960	0,130	0,897	1,027
10 T	0,162	1,240	0,056	1,387	0,067	1,385	1,452
23 T	0,126	0,61	0,047	0,644	0,056	0,647	0,702

IV. APLICACION DEL CODIGO PIZZA

A. Resultados

A continuación se resumen los principales resultados obtenidos por aplicación del código. La liberación de gases de fisión fue calculada con una subrutina basada en el modelo de Lewis y considerando una distribución de potencia tal que la potencia media integrada en el tiempo y en la barra, es equivalente a 240 días de irradiación con una potencia media de 185,1 W/cm (*), además se tomó 5696 MWd/tU como valor del quemado alcanzado. El tiempo de irradiación total fue descompuesto en dos períodos, el primero de los cuales con una duración de 98 días.

Para la resolución, el código divide la longitud activa de la barra en cinco segmentos, cuya longitud se consigna en la tabla 21, conjuntamente con el porcentaje del largo total que representa cada tramo, la variación axial resultante de la potencia específica, la temperatura central y superficial de la pastilla.

Otros resultados importantes son los siguientes:

(*) El código sólo se aplicó a la barra 23 T.

presión interna = $5,579 \text{ kg/cm}^2$
 potencia media = $205,2 \text{ W/cm}$
 integral de conductividad media = $15,99 \text{ W/cm}$
 integral de conductividad media total = $14,42 \text{ W/cm}$

TABLA 21

longitud de la división axial mm	% de la división axial	Potencia W/cm	Temperatura central pastilla °C	Temperatura superficial pastilla °C
360	19,93	106	602	365
360	19,93	164	792,4	386
360	19,93	221	983,8	395
520	28,79	252	1096	398
206,4	11,43	305	1295	406

Los valores correspondientes a los gases de fisión son los siguientes:

volumen de gases de fisión producidos = $262,7 \text{ cm}^3$
 moles de gases de fisión liberados = $61,62 \cdot 10^{-7}$
 volumen de gases de fisión liberados = $142,6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$
 volumen/temperatura = $422,2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{°K}$
 porcentaje de gases de fisión liberados = $542,9 \cdot 10^{-4} = 0,05429$

B. Discusión

Los valores obtenidos presentan un satisfactorio grado de concordancia con los experimentales, como puede apreciarse en el cuadro siguiente:

TABLA 22

Valores Parámetros	Experimentales	Calculados median- te el código
Quemado MWd/tU	5709,85	5696
Temperatura central máxima °C	1400	1295
Porcentaje de liberación de gas	0,052	0,05429

Debe tenerse presente que el porcentaje de liberación experimental ha sido calculado tomando un tiempo de irradiación de 240 días, al ser el tiempo real algo menor como ya se ha mencionado, el porcentaje real de liberación sería ligeramente superior al indicado en la columna 1 de la tabla anterior.

De la tabla 22 se infiere que la mayor parte del material combustible operó a temperaturas bajas, ya que solo el 40,22% de la columna activa alcanzó una temperatura superior a los 1000°C, si se considera además el perfil de temperaturas en la pastilla, el volumen de UO_2 que habría soportado superiores a 1000°C, según el código es muy pequeño.

V. DISCUSION GENERAL Y CONCLUSIONES

La liberación de gases de fisión ha sido baja, no ha superado el 0,05%, esta tasa de liberación no es extraña considerando que el porcentaje se calcula globalmente para toda la barra y que, de acuerdo a los valores de temperaturas centrales estimados a través del código Pizza una cantidad relativamente pequeña de material combustible habría estado en condiciones tales como para que actúen los mecanismos térmicamente activados responsables del principal aporte a la liberación. La mayor parte del gas ocluido en el cerámico ha permanecido en la red, indicando una reducida migración, atribuible a las bajas temperaturas alcanzadas.

El gas retenido en el cerámico se encuentra preferentemente ocluido en la red y no en los poros. En las barras 10 T y 23 T la cantidad de Xenón que permanece en la red es notablemente mayor que la de Kriptón. Las barras 2 T y 10 T presentan para el Kriptón una relación red-poros similar.

La barra 10 T contrariamente a lo que podía suponerse, ya que las condiciones de irradiación a las que estuvo sometida fueron intermedias respecto a las otras dos barras, experimentó la menor liberación. La concordancia entre el bajo porcentaje de liberación calculado en base al gas libre y la alta retención por parte del material establecida mediante un ensayo efectuado por separado, no descarta posibles errores en las determinaciones, puesto que las muestras de material combustible fueron tomadas en zonas cercanas entre si para las tres barras, pero no equivalentes desde el punto de vista térmico y en menor grado neutrónico. La muestra correspondiente a la barra 10 T se obtuvo a una mayor distancia del extremo inferior de la barra que las otras, por lo cual el material soportó menores temperaturas, efecto que se traduce en una mayor retención. Al igual que en las otras barras el gas ha permanecido primordialmente en la red, pero en una proporción comparativamente mayor. Un factor a tener en cuenta en la confrontación de los porcentajes, aunque de un grado de incidencia mínima, es la aproximación realizada al calcular los quemados de las barras 2 T y 10 T, puesto que se asumió una variación lineal con la posición e igual a la correspondiente a la 23 T lo cual no es totalmente exacto si se observan los resultados de gamma-scanning corregidos respecto a la parte fina que se incluyen en (1). Podría suponerse que la singularidad

de comportamiento se debería a diferencias en el estado de las pastillas (grado de fragmentación) y/o en la estructura del material combustible. Lamentablemente no se dispone de radiograffas totales ni de ceramograffas de esta barra que permitan confirmar o no tales suposiciones, tampoco es posible inferir el estado del cerámico a través de la comparación de los "scans" de las diferentes barras, ya que las ligeras variaciones que presentan pueden atribuirse a otras causas.

En valores relativos el grado de retención para las diferentes barras está de acuerdo con la posición relativa de las muestras en la columna activa. La consideración de los resultados del código Pizza indicaría que en los tres casos la temperatura máxima de la muestra no superó los 1000°C.

En términos generales, el comportamiento del combustible en cuanto a gases se refiere no se apartó de lo normal, considerando las condiciones de irradiación a las que estuvo sometido. La falta de mayores datos en el análisis de los gases de fisión, el análisis isotópico se redujo al contenido de Kr85, no permite profundizar más en el estudio del comportamiento. Un pequeño número de ensayos de posirradiación adicionales, bien seleccionados, habría posibilitado casi con seguridad explicar las anomalías señaladas.

Se sugiere para posteriores irradiaciones efectuar un mayor número de determinaciones isotópicas especialmente Kr86. Las muestras de material para ensayos de gases retenidos deberían ser menores a las tomadas en estos exámenes, especialmente si el combustible alcanza temperaturas más altas, para evitar tener resultados globales, estableciéndose cuidadosamente su lugar de origen y tratando que pertenezcan a posiciones equivalentes entre las diferentes barras, además es conveniente contar con ceramograffas correspondientes a la zona de muestreo. En el caso particular de esta irradiación en que el combustible presenta inhomogeneidades, islas de características diferentes al resto del material, habría sido interesante disponer de análisis de micromuestras de las diferentes zonas para tratar de establecer correlaciones entre la evolución de los gases y la estructura.

VI. BIBLIOGRAFIA

1. R.H. RODRIGUEZ PASQUES, D. VASSALLO, E. GARCIA, A. CASTELLA y E. GUILLAUME. Examen posirradiación del elemento combustible nuclear prototipo CNEA -MZFR-I, CN-5/145, 1974.
2. CNEA, Protocolo de fabricación del prototipo Ia.
3. Kernforschungszentrum Karlsruhe. Untersuchungsbericht, Atucha BE -1
4. LEWIS. The return of escaped fission product gases to UO_2 .
5. SOODAK. Reactor handbook .
6. C. MONTENERO. Comunicación interna.

SIMBOLOS

A:	actividad específica	$\mu\text{Ci/mm}^3$
Bu_j :	quemado en la barra. j	MWd/tU
$\overline{Bu}$:	quemado medio	MWd/tU
$Bu(x)$:	quemado a x mm del extremo superior	MWd/tU
X:	distancia desde el extremo superior	mm
X_L :	longitud de columna activa	mm
$b_{i,j}$:	contribución porcentual del isótopo i al número de fisiones totales en la barra j.	
E_i :	energía de fisión del isótopo i.	
$f_{i,j}$:	número de fisiones producidas por el isótopo i en la barra j	
F_j :	número de fisiones totales producidas en la barra j por tonelada de uranio.	
n:	número de átomos	
N:	concentración atómica	átomos/mm ³
m:	masa	g
T:	período de semidesintegración	años
V:	volumen de gas	mm ³
W:	potencia específica	W/cm
τ :	tiempo	seg
λ :	constante de decaimiento	seg ⁻¹

VII. APENDICES

Apéndice 1Determinación del quemado medio

De acuerdo a las cifras tomadas de (1)

$$\frac{\Delta Bu}{\Delta X} = \frac{3,07 \text{ MWd/tU}}{\text{mm}}$$

$$X_0 = 900 \text{ mm}$$

$$Bu_{(0)} = Bu(X_0)$$

$$\frac{\Delta Bu}{\Delta X} = \frac{Bu - Bu_{(0)}}{X - X_0}$$

$$Bu(X) = \frac{\Delta Bu}{\Delta X} \cdot X - 2763 + Bu_{(0)}$$

$$\bar{Bu} = \frac{\int_0^{X_L} Bu(X) dX}{X_L - 0}$$

$$\bar{Bu} = \frac{3,07}{2} X_L + (-2763 + Bu_{(0)})$$

$$\bar{Bu} = \frac{3,07}{2} X_L + a$$

TABLA 23

Barra	a MWd/tU	X_L mm	$\bar{Bu}$ MWd/tU
2 T	1847	1826,81	4651,15
10 T	2187	1826,36	4990,46
23 T	2937	1806,42	5709,85

Apéndice 2

Determinación del número de fisiones totales

Energías de fisión

TABLA 24

Isótopo	Ei Mev/fisión	Ei MWd/fisión
235	212	$0,39309 \cdot 10^{-21}$
238	201	$0,37269 \cdot 10^{-21}$
239	235	$0,43574 \cdot 10^{-21}$
241	210	$0,38938 \cdot 10^{-21}$

$$\overline{Bu}_j = b_{235,j} \cdot F_j \cdot E_{235} + b_{238,j} \cdot F_j \cdot E_{238} + b_{239,j} \cdot F_j \cdot E_{239} + b_{241,j} \cdot F_j \cdot E_{241}$$

$$F_j = \frac{\overline{Bu}_j}{b_{235,j} \cdot E_{235} + b_{238,j} \cdot E_{238} + b_{239,j} \cdot E_{239} + b_{241,j} \cdot E_{241}}$$

Considerando la tabla 5:

barra 2 T:

$$F_{2T} = \frac{4651,15 \cdot 10^{21}}{0,23586 + 0,0306 + 0,13509 + 0,00234} \quad \frac{\text{fisiones}}{\text{tU}}$$

$$F_{2T} = 11517,594 \cdot 10^{21} \quad \frac{\text{fisiones}}{\text{tU}}$$

barra 10 T:

$$F_{10T} = \frac{4990,46 \cdot 10^{21}}{0,227208 + 0,029816 + 0,145536 + 0,00312} \quad \frac{\text{fisiones}}{\text{tU}}$$

$$F_{10T} = 12301,62 \cdot 10^{21} \quad \frac{\text{fisiones}}{\text{tU}}$$

barra 23 T:

Se adoptó, para los valores de b, el promedio para cada isótopo (Tabla 5).

$$b_{235} = 0,5683$$

$$b_{238} = 0,0817$$

$$b_{239} = 0,339$$

$$b_{241} = 0,011$$

$$F_{23T} = \frac{5709,85 \cdot 10^{21}}{0,223277 + 0,030561 + 0,147715 + 0,004} \quad \frac{\text{fisiones}}{\text{tU}}$$

$$F_{23T} = 14065,298 \cdot 10^{21} \quad \frac{\text{fisiones}}{\text{tU}}$$

. Número de fisiones totales en cada barra

$$\text{Barra 2 T: } 11517,594 \cdot 10^{21} \cdot \frac{\text{fis.}}{10^6 \text{ g U}} \cdot 1421,908 \text{ gU} = 1637,696 \cdot 10^{19} \text{ fisiones}$$

$$\text{Barra 10 T: } 12301,62 \cdot 10^{21} \cdot \frac{\text{fis.}}{10^6 \text{ gU}} \cdot 1421,558 \text{ gU} = 1748,747 \cdot 10^{19} \text{ fisiones}$$

$$\text{Barra 23 T: } 14065,298 \cdot 10^{21} \cdot \frac{\text{fis.}}{10^6 \text{ gU}} \cdot 1406,037 \text{ gU} = 1977,633 \cdot 10^{19} \text{ fisiones}$$

. Número de fisiones producidos por cada isótopo en cada barra

$$f_{i,j} = b_{i,j} F_j$$

$$\begin{aligned} \text{Barra 2 T: } f_{235,2T} &= 0,604 \cdot 1637,696 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 989,1683 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{238,2T} &= 0,082 \cdot 1637,696 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 134,2911 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{239,2T} &= 0,308 \cdot 1637,696 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 504,4103 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{241,2T} &= 0,006 \cdot 1637,696 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 9,8262 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{barra 10 T: } f_{235,10T} &= 0,578 \cdot 1748,747 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 1010,776 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{238,10T} &= 0,08 \cdot 1748,747 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 139,8997 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{239,10T} &= 0,334 \cdot 1748,747 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 584,0814 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{241,10T} &= 0,008 \cdot 1748,747 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 13,9900 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Barra 23 T: } f_{235,23T} &= 0,5863 \cdot 1977,63 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 1159,486 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{238,23T} &= 0,0816 \cdot 1977,63 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 161,3749 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{239,23T} &= 0,339 \cdot 1977,63 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 670,4177 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \\ f_{241,23T} &= 0,011 \cdot 1977,63 \cdot 10^{19} \text{ fis.} = 21,7540 \cdot 10^{19} \text{ fis.} \end{aligned}$$

Apéndice 3

Determinación de la potencia específica

$$W = \frac{Bu \cdot MU}{\zeta \cdot X_L}$$

según los valores indicados en las tablas 1 y 5 y considerando $\zeta = 240$ días, resulta:

$$\text{Barra 2 T} \quad W = \frac{4651,15 \cdot 10^6 \text{ Wdía}/10^6 \text{ gU} \cdot 1421,908 \text{ gU}}{240 \text{ días} \cdot 182,681 \text{ cm}} = 150,84 \text{ W/cm}$$

$$\text{Barra 10 T} \quad W = \frac{4990,46 \cdot 10^6 \text{ Wdía}/10^6 \text{ gU} \cdot 1421,558 \text{ gU}}{240 \text{ días} \cdot 182,636 \text{ cm}} = 161,85 \text{ W/cm}$$

$$\text{Barra 23 T} \quad W = \frac{5709,85 \cdot 10^6 \text{ Wdía}/10^6 \text{ gU} \cdot 1406,037 \text{ gU}}{240 \text{ días} \cdot 180,642 \text{ cm}} = 185,18 \text{ W/cm}$$

Apéndice 4Determinación del número de átomos de gases de fisión producidos

Con el número de átomos fisionados para cada uno de los isótopos fisionables y considerando los rendimientos de fisión para cada uno de ellos tomados de (4) y (5), es posible calcular el número de átomos de gases de fisión generados.

Barra 2 T

Tabla 24

isótopo isótopo fisionable	U 235	U238	Pu239	Pu241
Kr83	53,42.10 ¹⁸	3,36.10 ¹⁸	14,63.10 ¹⁸	0,28.10 ¹⁸
Kr84	98,92.10 ¹⁸	8,06.10 ¹⁸	23,71.10 ¹⁸	0,46.10 ¹⁸
Kr85	28,98.10 ¹⁸	10,74.10 ¹⁸	6,41.10 ¹⁸	0,12.10 ¹⁸
Kr86	199,81.10 ¹⁸	14,77.10 ¹⁸	37,83.10 ¹⁸	0,74.10 ¹⁸
Kr	389,45.10 ¹⁸	36,93.10 ¹⁸	82,72.10 ¹⁸	1,16.10 ¹⁸
Xe131	289,83.10 ¹⁸	40,23.10 ¹⁸	190,16.10 ¹⁸	3,7.10 ¹⁸
Xe132	433,26.10 ¹⁸	60,43.10 ¹⁸	265,32.10 ¹⁸	5,17.10 ¹⁸
Xe134	850,68.10 ¹⁸	75,20.10 ¹⁸	376,29.10 ¹⁸	7,33.10 ¹⁸
Xe136	639,00.10 ¹⁸	87,29.10 ¹⁸	312,73.10 ¹⁸	6,09.10 ¹⁸
Xe	2657,90.10 ¹⁸	327,67.10 ¹⁸	1458,35.10 ¹⁸	28,41.10 ¹⁸

Barra 10 T

Tabla 25

isótopo fision. isótopo	U235	U238	Pu239	Pu241
Kr83	54,58.10 ¹⁸	3,50.10 ¹⁸	16,94.10 ¹⁸	0,41.10 ¹⁸
Kr84	101,08.10 ¹⁸	8,40.10 ¹⁸	27,45.10 ¹⁸	0,66.10 ¹⁸
Kr85	29,62.10 ¹⁸	11,19.10 ¹⁸	7,42.10 ¹⁸	0,18.10 ¹⁸
Kr86	204,18.10 ¹⁸	15,39.10 ¹⁸	43,81.10 ¹⁸	1,05.10 ¹⁸
Kr	526,01.10 ¹⁸	38,47.10 ¹⁸	95,79.10 ¹⁸	2,29.10 ¹⁸
Xe131	296,16.10 ¹⁸	41,97.10 ¹⁸	220,10.10 ¹⁸	5,27.10 ¹⁸
Xe132	442,72.10 ¹⁸	62,95.10 ¹⁸	307,23.10 ¹⁸	7,36.10 ¹⁸
Xe134	814,69.10 ¹⁸	78,34.10 ¹⁸	423,46.10 ¹⁸	10,44.10 ¹⁸
Xe136	652,96.10 ¹⁸	90,93.10 ¹⁸	362,13.10 ¹⁸	8,67.10 ¹⁸
Xe	2715,95.10 ¹⁸	341,36.10 ¹⁸	1688,58.10 ¹⁸	40,44.10 ¹⁸

Barra 23 T

Tabla 26

isótopo fision. isótopo	U235	U238	Pu239	Pu241
Kr83	62,61.10 ¹⁸	4,03.10 ¹⁸	19,44.10 ¹⁸	0,63.10 ¹⁸
Kr84	115,96.10 ¹⁸	9,68.10 ¹⁸	31,50.10 ¹⁸	1,02.10 ¹⁸
Kr85	33,97.10 ¹⁸	12,91.10 ¹⁸	8,51.10 ¹⁸	0,28.10 ¹⁸
Kr86	234,21.10 ¹⁸	17,75.10 ¹⁸	50,28.10 ¹⁸	1,63.10 ¹⁸
Kr	446,75.10 ¹⁸	44,38.10 ¹⁸	109,95.10 ¹⁸	3,57.10 ¹⁸
Xe131	338,73.10 ¹⁸	48,41.10 ¹⁸	252,75.10 ¹⁸	8,20.10 ¹⁸
Xe132	507,86.10 ¹⁸	72,62.10 ¹⁸	352,64.10 ¹⁸	11,44.10 ¹⁸
Xe134	997,16.10 ¹⁸	90,37.10 ¹⁸	500,27.10 ¹⁸	15,77.10 ¹⁸
Xe136	743,03.10 ¹⁸	104,89.10 ¹⁸	415,66.10 ¹⁸	13,49.10 ¹⁸
Xe	3115,54.10 ¹⁸	341,36.10 ¹⁸	1938,18.10 ¹⁸	62,89.10 ¹⁸

En la confección de las tres tablas anteriores se ha tomado como rendimiento de fisión del Pu241 el correspondiente al Pu239. Además, en el cómputo de la cantidad de Xe total se consideró que el 80% del Xe135 se transformó en Xe136, por consiguiente, el número de átomos de Xe136 que se explicitan es únicamente el que resulta de aplicar el rendimiento de cadena para ese isótopo.

Apéndice 5Determinación del número de átomos liberados

Kr85

$$N_{\text{Kr85}} = \frac{A_{\text{Kr85}}}{\lambda_{\text{Kr85}}}$$

$$\lambda_{\text{Kr85}} = \frac{0,692}{T_{\text{Kr85}}}$$

$$T = 10,6 \text{ años} \Rightarrow \lambda_{\text{Kr85}} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ seg}^{-1}$$

Tomando los valores de actividad específica de la Tabla 2.

Barra 2 T

$$A_{\text{Kr85}} = 99 \text{ } \mu\text{Ci/mm}^3$$

$$N_{\text{Kr85}} = \frac{99 \cdot 3,7 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^{-9}} \text{ at/mm}^3 = 18,315 \cdot 10^{14} \text{ at/mm}^3$$

$$V_{\text{Kr}} = 9,5 \text{ mm}^3 \text{ tabla 2}$$

$$n_{\text{Kr85}} = N_{\text{Kr85}} \cdot V_{\text{Kr}} = 18,315 \cdot 10^{14} \text{ at/mm}^3 \cdot 9,5 \text{ mm}^3 = 1,740 \cdot 10^{16} \text{ at de Kr85}$$

número de átomos de Kr

$$V_{\text{Kr}} = 9,5 \text{ mm}^3 \text{ tabla 2} \Rightarrow 25,527 \cdot 10^{16} \text{ at de Kr}$$

número de átomos de Xe

$$V_{\text{Xe}} = 63,5 \text{ mm}^3 \text{ tabla 2} \Rightarrow 170,625 \cdot 10^{16} \text{ at de Xe}$$

Barra 10 T

$$A_{\text{Kr85}} = 97 \text{ } \mu\text{Ci/mm}^3$$

$$N_{\text{Kr85}} = \frac{97 \cdot 3,7 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^{-9}} \text{ at/mm}^3 = 179,45 \cdot 10^{13} \text{ at/mm}^3$$

$$n_{\text{Kr85}} = N_{\text{Kr85}} \cdot V_{\text{Kr}} = 179,45 \cdot 10^{13} \text{ at/mm}^3 \cdot 9,3 \text{ mm}^3 = 1,669 \cdot 10^{16} \text{ at de Kr85}$$

$$V_{\text{Kr}} = 9,3 \text{ mm}^3 \implies 24,990 \cdot 10^{16} \text{ at de Kr}$$

$$V_{\text{Xe}} = 55,3 \text{ mm}^3 \implies 148,591 \cdot 10^{16} \text{ at de Xe}$$

Barra 23 T

$$A_{\text{Kr85}} = 101 \text{ Ci/mm}^3$$

$$N_{\text{Kr85}} = \frac{101 \cdot 3,7 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^{-9}} \text{ at/mm}^3 = 1,869 \cdot 10^{13} \text{ at/mm}^3$$

$$n_{\text{Kr85}} = N_{\text{Kr85}} \cdot V_{\text{Kr}} = 1,869 \cdot 10^{13} \text{ at/mm}^3 \cdot 12,9 \text{ mm}^3 = 2,410 \cdot 10^{16} \text{ at de Kr85}$$

$$V_{\text{Kr}} = 12,9 \text{ mm}^3 \implies 34,662 \cdot 10^{16} \text{ at de Kr}$$

$$V_{\text{Xe}} = 106,5 \text{ mm}^3 \implies 286,166 \cdot 10^{16} \text{ at de Xe}$$