

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 1	AÑO 1974

04.74.12

CN 6/156

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

AREA COMBUSTIBLES NUCLEARES

COMPORTAMIENTO BAJO IRRADIACION DE MATERIALES COMBUSTIBLES
PARTE II

RAUL L. OLEZZA

Departamento Combustibles Nucleares
Buenos Aires-Argentina
1974

INDICE

I.	INTRODUCCION
II.	OBJETIVO DE LA IRRADIACION
III.	LUGAR DE IRRADIACION
IV.	DISPOSITIVO DE IRRADIACION
V.	CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS
	1. Probeta CIA
	2. Probeta CIB
VI.	CONDICIONES DE IRRADIACION
VII.	ENSAYOS DE POST IRRADIACION
	1. Ensayos de post irradiación solicitados
	2. Resultados de los ensayos de post irradiación
VII	HISTORIA DE LA IRRADIACION
IX.	INTERPRETACION DE RESULTADOS
	1. Cálculos previos
	2. Estructura
	3. Gases de fisión
X.	APLICACION DEL CODIGO PIZZA
XI.	CONCLUSION GENERAL
XII	APENDICES

RESUMEN

Se resumen en este informe los resultados de la irradiación de la cápsula CI-EPI-MZFR, en lo que al material combustible se refiere, así como también las condiciones de irradiación y los datos correspondientes a los ensayos de pre y post irradiación necesarios para la interpretación del comportamiento del material.

La irradiación se llevó a cabo con el objeto de obtener información sobre polvos con material fisiónable disperso y homogéneo, aplicable al estudio del comportamiento bajo irradiación de materiales combustibles.

Las dos probetas contenidas en la cápsula fueron cargadas con pastillas de UO_2 sinterizado, fabricadas con polvos de UO_2 enriquecido. Habiéndose logrado el enriquecimiento por mezclado mecánico de polvos para el material de una de las probetas y por coprecipitación para la otra.

I. INTRODUCCION

El programa de irradiaciones del Departamento Combustibles Nucleares destinado al desarrollo de elementos combustibles, se inicia con la irradiación de una cápsula denominada CI-EPI-MZFR.

En el presente informe se resumen los resultados de la evaluación de la irradiación de dicha cápsula, en lo que al material combustible se refiere, así como también las condiciones de irradiación y los datos correspondientes a los ensayos de pre y post-irradiación necesarios para la interpretación del comportamiento del óxido.

Es interesante destacar que esta es la primera irradiación de un combustible tipo UO_2 -zircaloy fabricado en el país.

II. OBJETIVO DE LA IRRADIACION

En un principio fue el de determinar el comportamiento en irradiación de barras combustibles fabricadas por la CNEA, con técnicas que posteriormente se emplearían en la fabricación de un elemento combustible MZFR a irradiarse en dicho reactor.

Obviamente, debía procurarse la mayor semejanza posible entre las barras a irradiarse en la cápsula con aquéllas que formarían el elemento combustible tipo MZFR en lo que se refiere al diseño y a los procesos de fabricación, pero estableciéndose condiciones más severas para las primeras, con el fin de contar con un margen de seguridad que pudiese absorber pequeñas variaciones en las técnicas de fabricación. Para poder alcanzar potencias específicas relativamente altas, el combustible debió enriquecerse en material fisionable.

El hecho de haberse seleccionado para la irradiación una cápsula en lugar de un elemento completo se debe a que la primera posibilita efectuar la irradiación en forma más controlada en cuanto a condiciones de irradiación, y con mayor seguridad con respecto a cualquier eventual falla en las barras combustibles, al provocar percances de menor cuantía si éstas se encuentran en la cápsula, que si forman parte de un elemento del núcleo del reactor.

Razones circunstanciales obligaron a redefinir este primer objetivo, estableciéndose entonces como propósitos de la irradiación los siguientes:

a) Obtener información sobre polvos con material fisionable disperso y homogéneo, a los efectos de aplicarla a futuros desarrollos de combustibles a base de $(U-Pu)O_2$. Comparar con tal fin el comportamiento de pastillas de UO_2 , fabricadas con dos polvos obtenidos por métodos distintos: i) polvo de UO_2 enriquecido disperso en UO_2 natural (mezcla mecánica); ii) UO_2 natural enriquecido por coprecipitación. Incidentalmente evaluar los métodos y equipos usados en el Departamento para la fabricación de los dos tipos de polvo, las pastillas y las barras combustibles.

b) Obtener información para aplicarla a la verificación de modelos de cálculo usados o a usarse en los prototipos CNEA-MZFR I y II. Puesto que una cápsula por su longitud y diseño permite someter al combustible a condiciones físicas bien determinadas. Es posible efectuar la irradiación en condiciones tales que un gran número de parámetros permanezcan sensiblemente constantes, lo que facilita la aplicación y verificación de modelos de cálculo, así como la interpretación y evaluación de los diferentes fenómenos que se producen en el combustible durante la irradiación. Se logra de este modo una mejor aproximación al estudio del comportamiento de los prototipos donde, dada su longitud (1,80 m) los parámetros de irradiación presentan variaciones.

c) Comparar los datos de irradiación y las performances de la cápsula CI-EPI-MZFR y del prototipo CNEA-MZFR I a los fines de posibilitar la predicción del comportamiento de futuros prototipos.

III. LUGAR DE IRRADIACION

La irradiación se efectuó en el reactor Siloe, de tipo piscina a uranio enriquecido y agua liviana con una potencia de 30 MW, situado en Grenoble, Francia.

IV. DISPOSITIVO DE IRRADIACION

Llamado Cyrano, conteniendo dos pequeñas barras combustibles (probetas) denominadas CIA y CIB.

V. CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS

Se fabricaron dos pequeñas barras combustibles, una para cada tipo de polvo.

V.1 Probeta CIA

Identificación: marca que dice CIA en la parte cónica de los tapones.

Posición de la identificación: parte inferior de la probeta.

Posición en el dispositivo: alta.

Dimensiones: ver Fig. 1

Vaina: Zry-4 Sandvick

Diámetro vaina: 11,75 mm

Espesor vaina: 0,62 mm

Soldadura de tapones: método TIG, bajo He

Gap pastilla-vaina: $0,02 \div 0,08$ mm

Diámetro pastilla: $10,39 \div 10,41$ mm

Material Combustible: UO_2 sinterizado

Enriquecimiento: 4%

Método de preparación del polvo: coprecipitación de U natural y enriquecido.

Procedencia del polvo: CICA F

Peso de UO_2 : 83,4 g

Largo de columna activa: 96,89 mm

Densidad media: $9,98 \text{ g/cm}^3$ (91,1% D.T.)

Rango de variación de la densidad: $9,89 \div 10,05 \text{ g/cm}^3$ (90,2% $\div$ 91,7% D.T.)

Disposición de las pastillas según densidad: ver Fig. 2

Contenido de humedad de las pastillas en la superficie: < 5 ppm

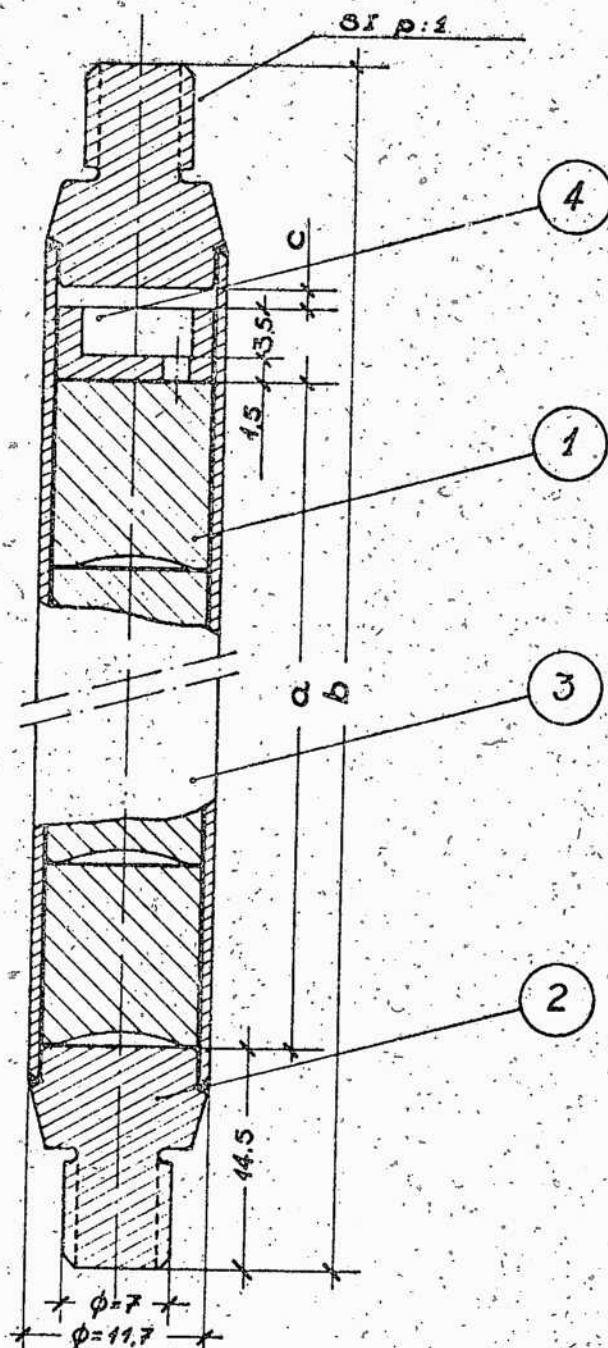
área específica: $67 \text{ cm}^2/\text{g}$

Contenido de hidrógeno de las pastillas: < 1 ppm

Textura original: ver 3

Tamaño de grano original (promedio): 38μ (por comparación)

	C1A	C1B
UO ₂	COPRECIPI. TADO	MEZCLA MECANICA
a	96,9	96,5
b	135,2	134,8
c	3,1	3,5



4	CARTUCHO	1	ZRY-4	
3	VAINA	1	ZRY-4	
2	TAPON	2	ZRY-4	
1	TABLETAS	14	UO ₂	
Nº	DENOMINACION	CANT.	MATERIAL	OBSERVACION
PROYECTO: R.O.C DIBUJO: O.U.S. Vº 8º FECHA  CNEA GCIA. TECNOLOGIA DEPTO. COMB. NUCLEARES				
ESCALA: 2:1		PROYECTO <u>DESARROLLO PHWR</u>		PLANO Nº 4-1.1-070
FABRICAD. SEGUN ESPECIFICACION		DENOMINACION <u>CAPSULA C1-EPI-MZFR</u>		REMP. A PLANO
CNEA				REMP. POR PLA.

PASTILLAS DE UO_2 ENRIQUECIDO AL 4%
POLVO COPRECIPITADO

ϕ recitificado	Altura	Densidad
$10,39 \leq \phi \leq 10,41$	12,03	10,05
"	12,07	10,04
"	12,10	10,03
"	12,10	10,01
"	12,14	9,95
"	12,14	9,95
"	12,19	9,92
"	12,12	9,89

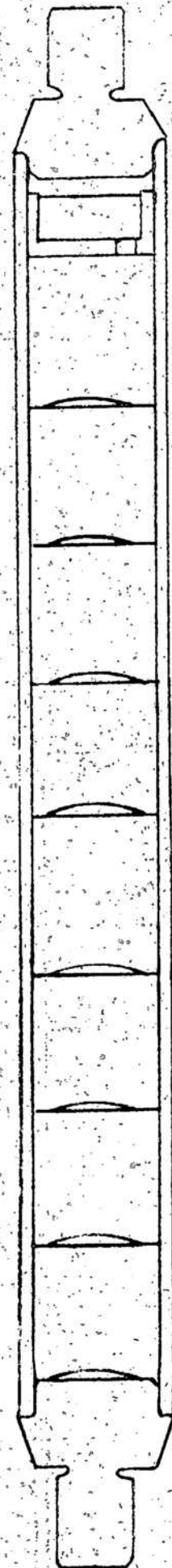


Fig. 2

V.2 Probeta CIB

Identificación: marca que dice CIB en la parte cónica de los tapones.

Posición de la identificación: parte superior.

Posición en el dispositivo: baja

Dimensiones: ver Fig. 1

Vaina: Zry-4 Sandvick

Diámetro de la vaina: 11,75 mm

Espesor de la vaina: 0,62 mm

Soldadura de tapones: método TIG bajo He

Gap pastilla-vaina: $0,02 \div 0,08$ mm

Diámetro pastilla: $10,39 \div 10,41$ mm

Material combustible: UO_2 sinterizado

Enriquecimiento: 4%

Método de preparación del polvo: mezclado mecánico de polvos

Procedencia del polvo con U natural: CICAF

Procedencia del polvo enriquecido: CNEA

Peso UO_2 : 84,3125 g

Longitud columna activa: 96,5 mm

Densidad: $10,4 \text{ g/cm}^3$ (95% D. T.)

Contenido de humedad de las pastillas en la superficie: < 4 ppm

Area específica: $24 \text{ cm}^2/\text{g}$

Contenido de hidrógeno de las pastillas < 1 ppm

VI. CONDICIONES DE IRRADIACION

A continuación se indican las principales condiciones de irradiación solicitadas al Servicio de Irradiaciones del Reactor Siloé, las condiciones reales a las que estuvo sometida la cápsula y las fijadas para el prototipo CNEA-MZFR I.

TABLA I

Barras o Barra Parámetro	Condiciones solicitadas		Condiciones reales		Condiciones definidas
	CIA	CIB	CIA	CIB	
Flujo n. termicos $\text{cm}^2 \text{ seg}$	$1,1 \cdot 10^{14}$		$0,252 \cdot 10^{14}$	$0,268 \cdot 10^{14}$	Prototipo CNEA-MZFRI
Quemado $\frac{\text{MWD}}{\text{tU}}$	3000		$1,660,6$	1767	5000
Tiempo de Irradiación	$1000 \text{ hs} \approx 40 \text{ días}$		935 hs $38,9 \text{ días}$	935 hs $38,9 \text{ días}$	280 días
Potencia específica W/cm	450				$220 \div 380$

VII. ENSAYOS DE POST-IRRADIACION

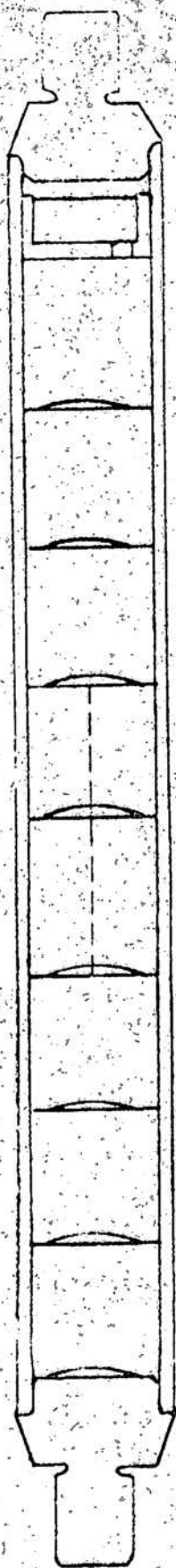
VII.1 Ensayos de post-irradiación solicitados

Con el objeto de concretar los fines fijados para la irradiación y aprovechar al máximo la misma, se confeccionó una lista de ensayos.

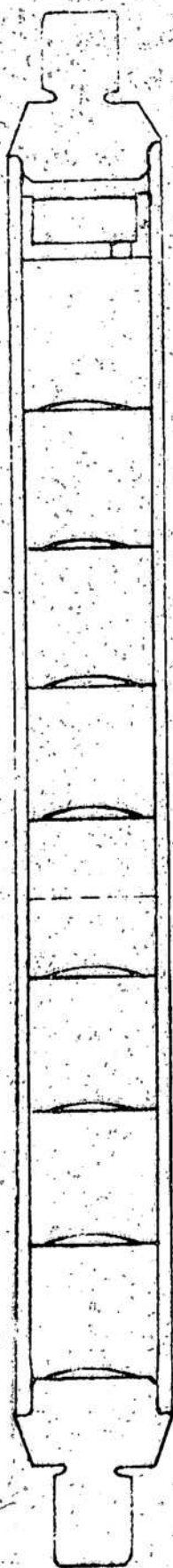
El número de ensayos realizados debió reducirse, en algunos casos por razones presupuestarias y en otros por dificultades materiales, para efectuar cierto tipo de determinaciones en los laboratorios franceses.

En el cuadro siguiente se indican los ensayos y la información que los mismos suministran.

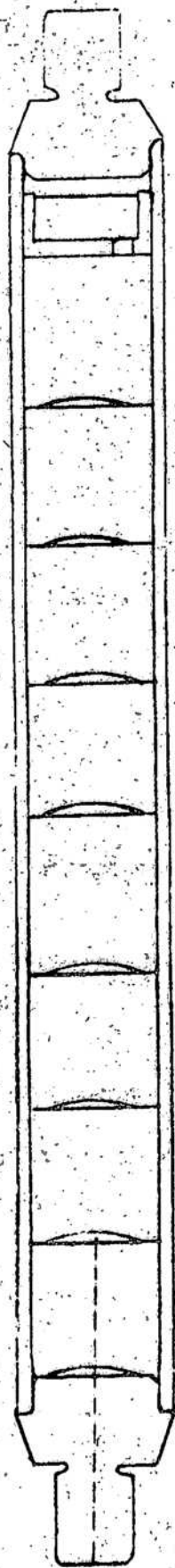
Ensayo	Realizado	Información
Metrológicos: longitud	si	Determinar cambios dimensionales y deformaciones
flecha	si	
diámetro	si	
Radiografía	si	Observar estado de las pastillas en el interior de la barra
Quemado: determinación vía química	no	Número de fisiones producidas
determinación zonal	no	Distribución del quemado
Scanning	si	Quemado relativo
Metalografías: a) Secc. transversal Fig. 4 aII	si	Cambios estructurales
b) Secc. longitudinal Fig. 4 aI	no	Estado de la unión entre pastillas
c) Secc. longitudinal pastilla-tapón Fig. 4 aIII	no	Eventual interacción UO_2/Zry
d) Montaje según un diámetro	si	Detalle de las variaciones de estructura según un diámetro.



I- a



II-a



III-a

Análisis de gases:			
volumen total	si	Cantidad de gases de fisión liberados	
de fisión:			
composición	si	Mecanismos actuantes	
composición isotópica	no	Mecanismos actuantes	
retenidos	no	Mecanismos actuantes	
Relación O/M:			
global	no	Migración de oxígeno	
zonal	no	Migración de oxígeno y su relación con la estructura.	
Autoradiografía	no	Distribución productos de fisión	

VII.2 Resultados de los ensayos de post-irradiación

a) Metrológicos

Ver Fig. 5

b) Aspecto exterior de las probetas

Ver Fig. 6

c) Radiografías

Ver Fig. 7

d) Scanning ☒

Se efectuó considerando los radionucleidos ^{144}Pr , ^{103}Ru , ^{106}Rh , ^{137}Cs , ^{95}Zr y ^{95}Nb , encontrándose, según el informe francés, diferencias entre las probetas. La relación entre el quemado alcanzado por cada barra indicada por este método es de 1, 3, siendo mayor el que corresponde a la denominada CIB (Tabla 2).

e) Espectro gama

Los resultados se aprecian en la Tabla 2.

f) Micrografías

Ver Fig. 8, 9, 10 y 11.

g) Análisis de gases

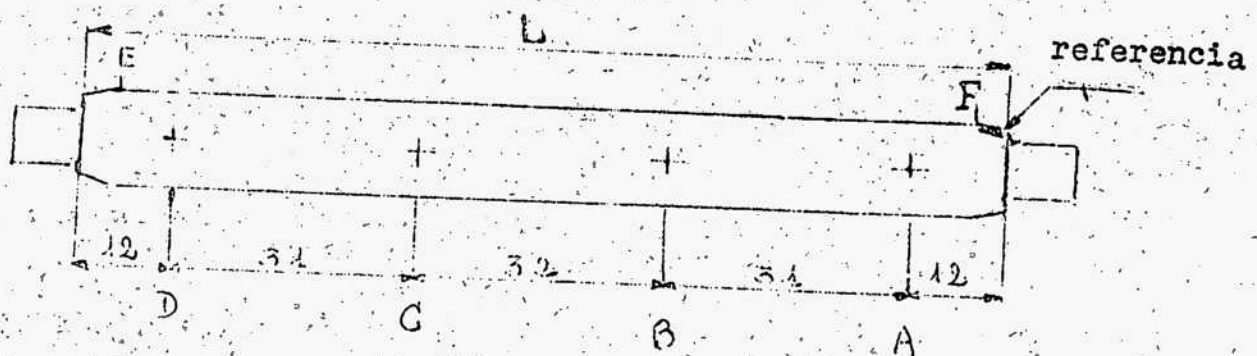
Volumen total de gas libre en las probetas

CIA 869 mm³ (CN)

ENSAYOS METROLOGICOS

Dispositivo usado: conjunto Palmer

Temperatura: 24 °C

**CIA**

Diámetro sobre la referencia

A 11,694
B 11,683
C 11,685
D 11,680

Diámetro a 90°

A 11,683
B 11,685
C 11,679
D 11,688

Longitud: promedio sobre 4 mediciones

117,924

CIB

Diámetro sobre la referencia

A 11,697
B 11,692
C 11,694
D 11,688

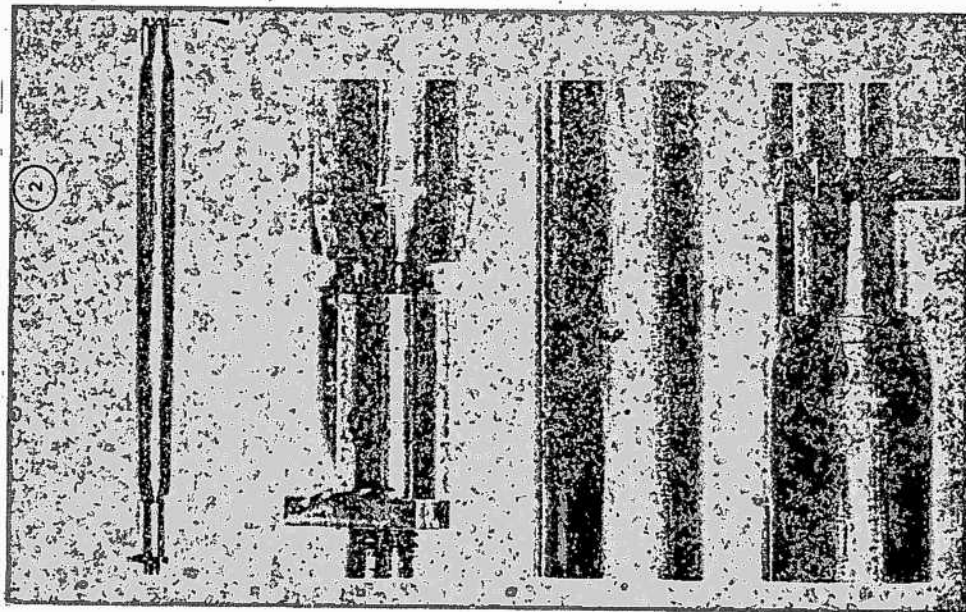
Diámetro a 90°

A 11,694
B 11,692
C 11,688
D 11,690

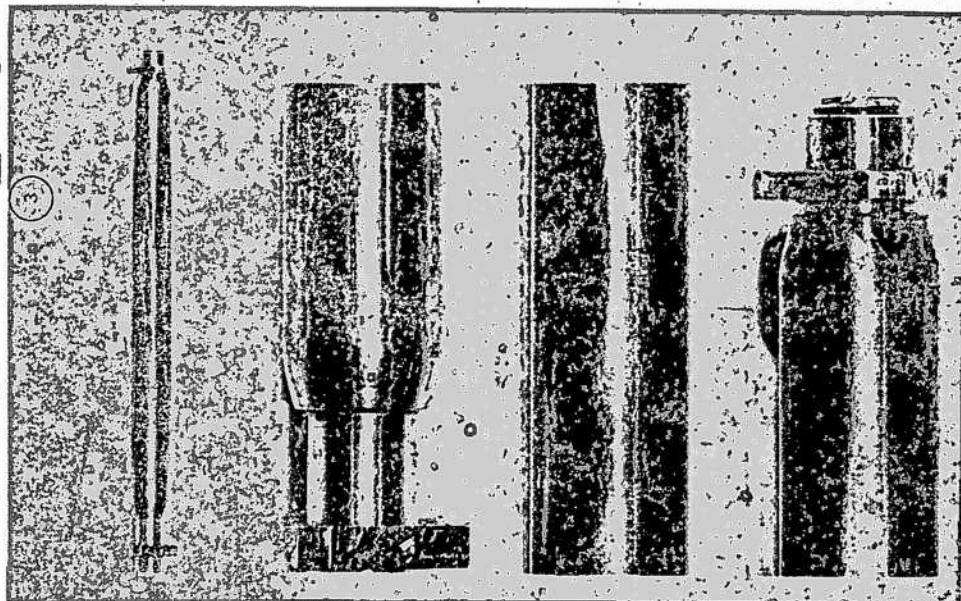
Longitud: Promedio sobre 4 mediciones

117,894

fig. 5

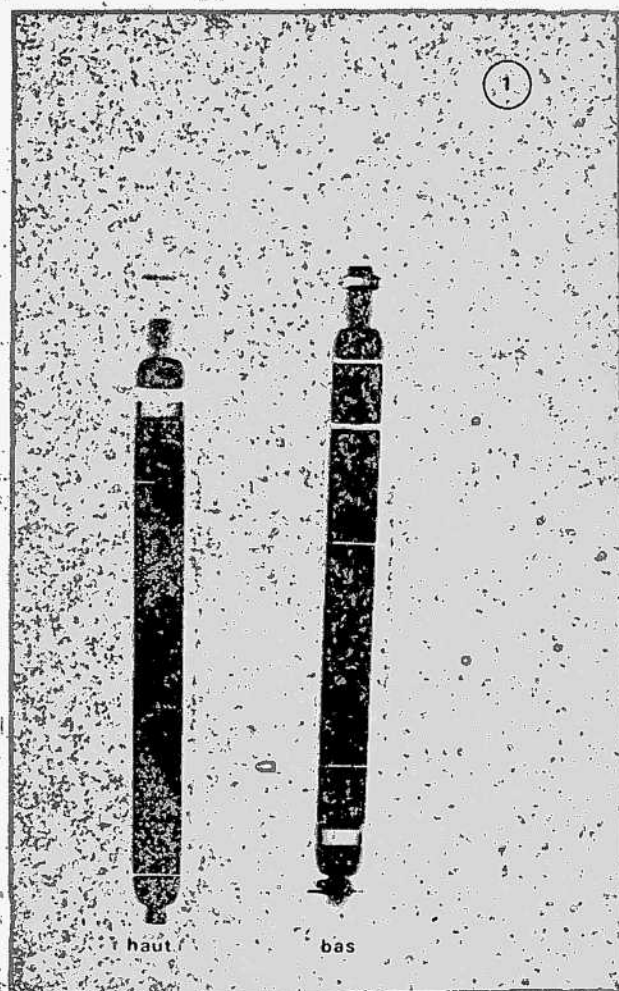


CIA



CIB

fig. 6



CIA

CIB

fig. 7

CYRANES CIA

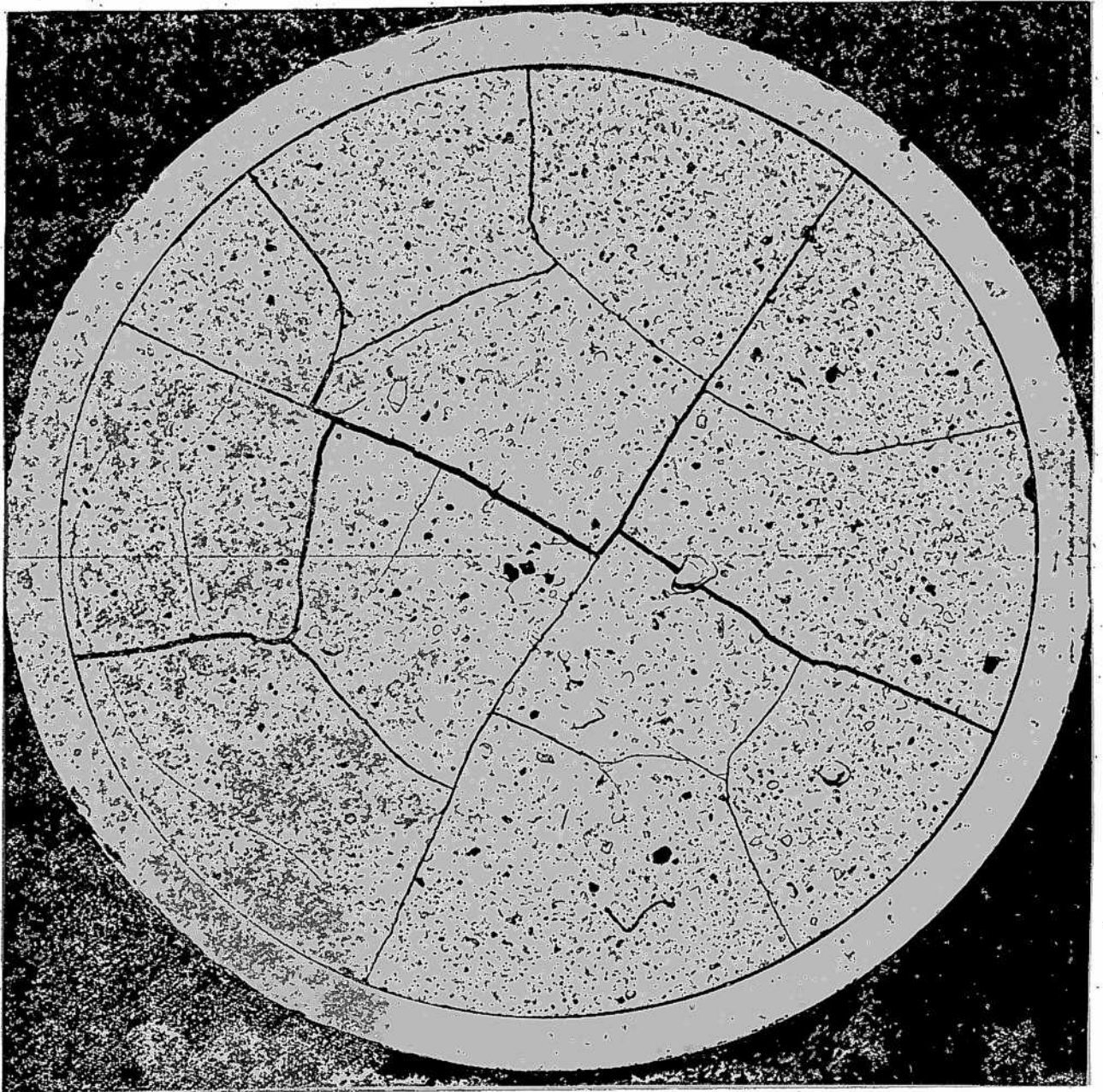


fig. 8

CYRANES

C 1B

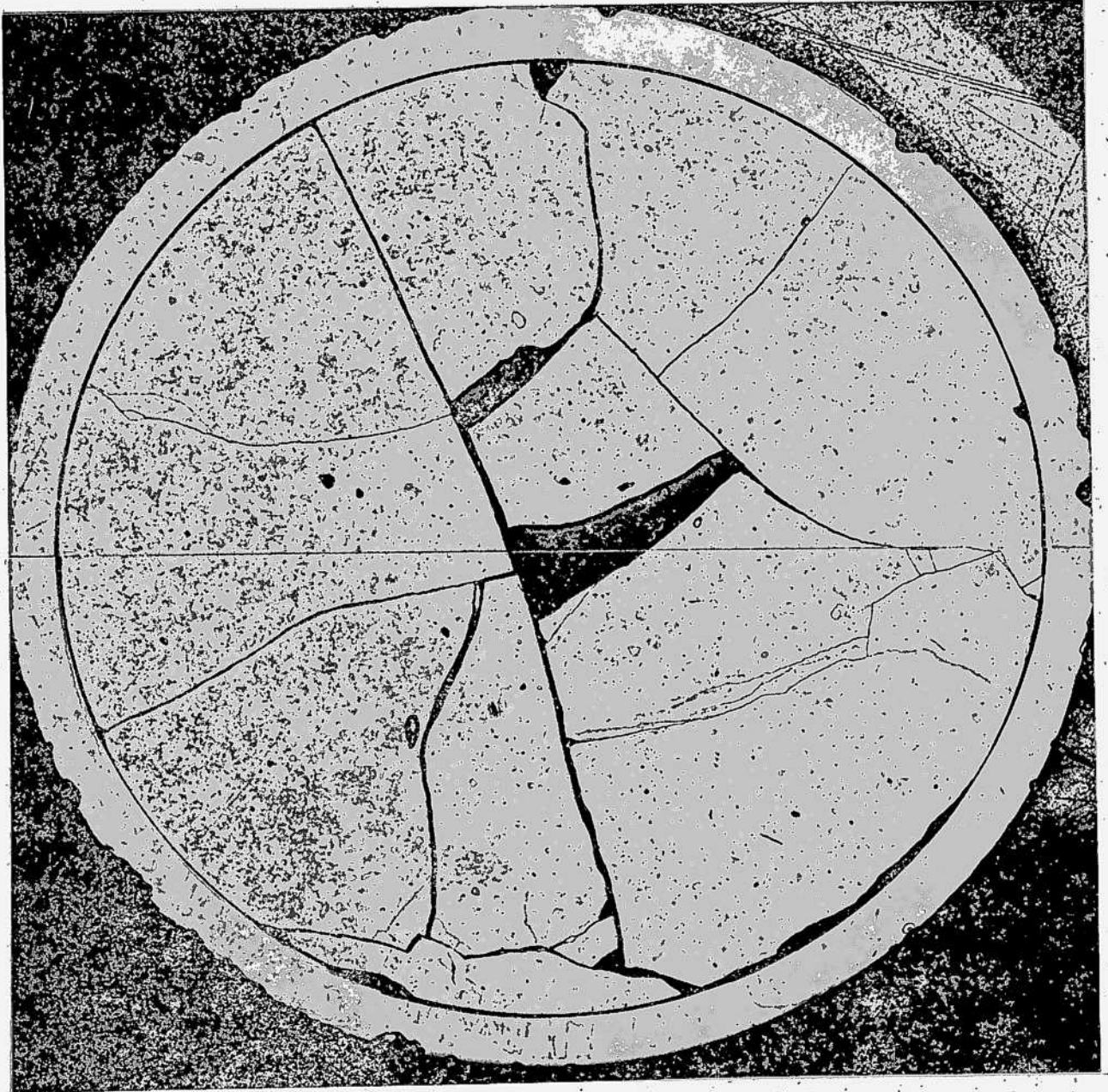
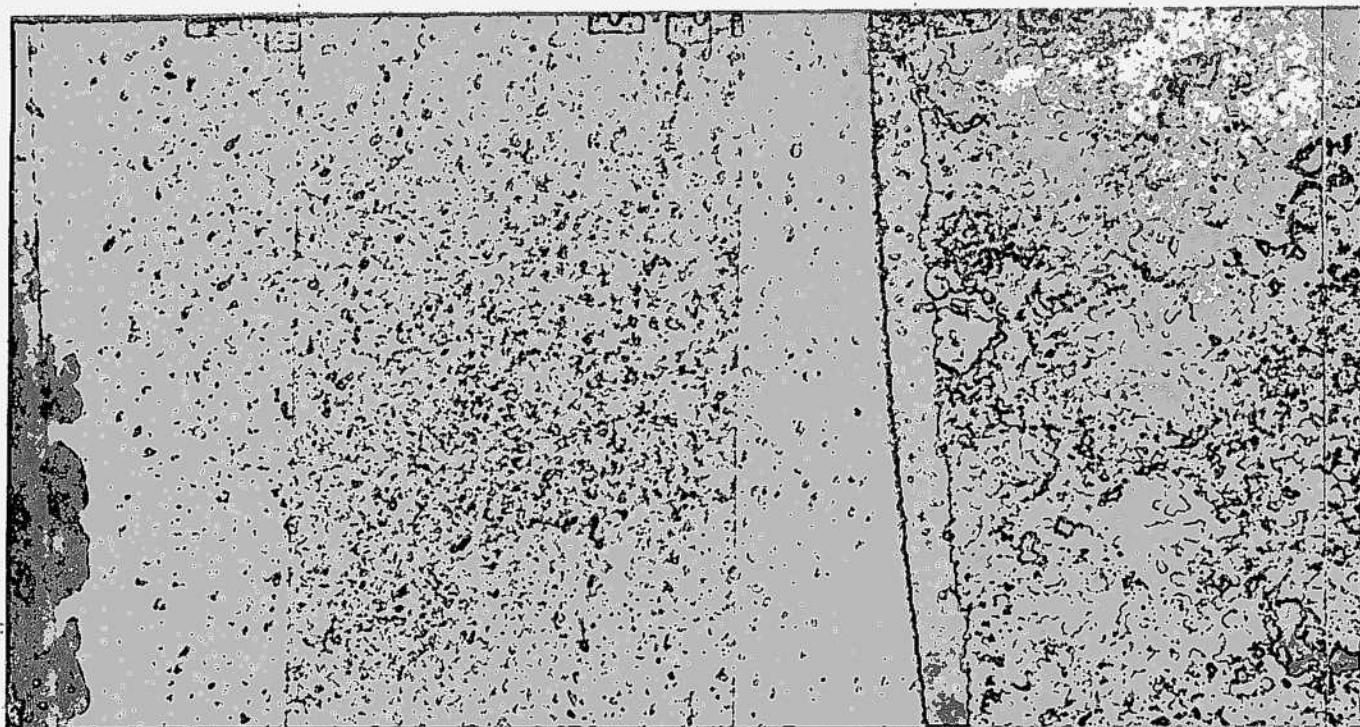


fig. 9

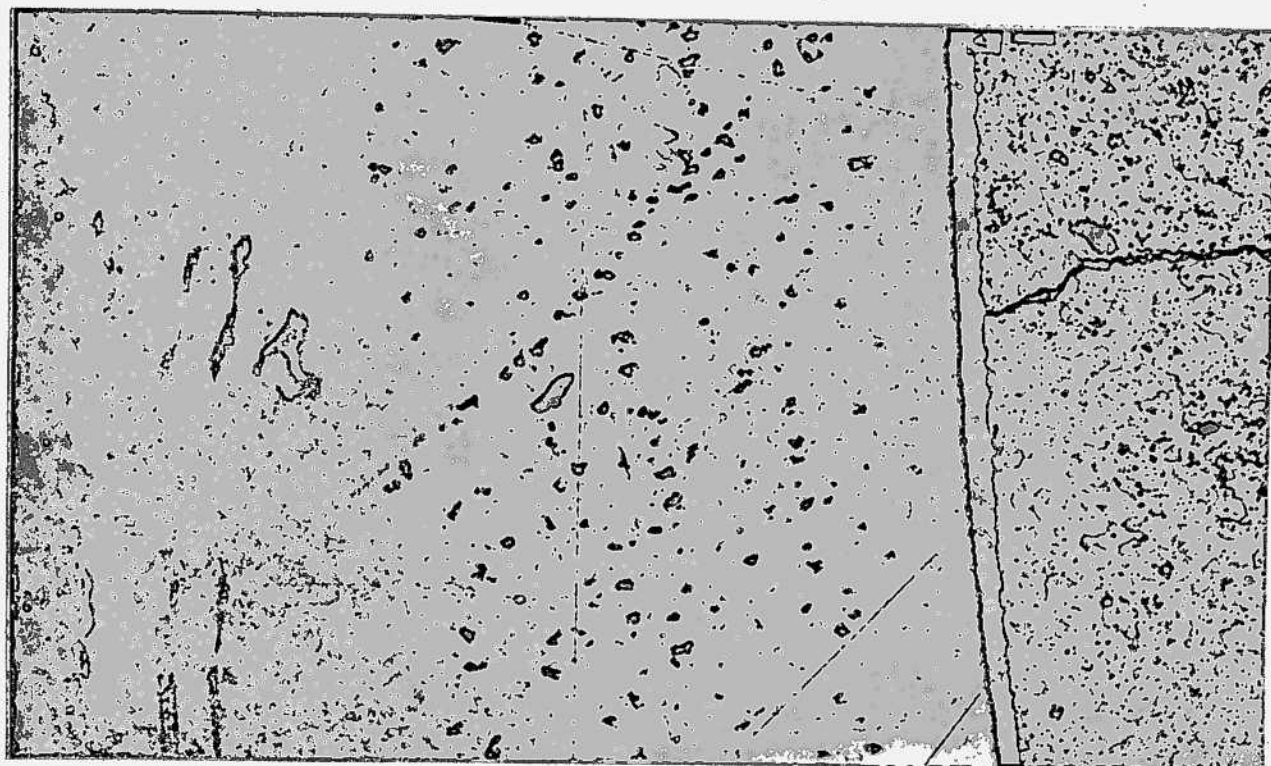
TABLA 2

Radio-nucleido	Período	Energía del rayo más representativo	Superficie Gaussiana IA $\Sigma\%$	Superficie Gaussiana IB $\Sigma\%$	$\frac{I_B}{I_A} = k$
^{144}Pr	~ 1 añ	696,4	206 2,4	276 2,7	1,350
^{103}Ru	40 d	497,1	1128 5,6	1450 4,8	1,285
^{106}Rh	~ 1 añ	511,8	211 2,4	321 5,6	1,521
^{137}Cs	30 añ	661,5	776 3,6	984 2,8	1,268
^{95}Zr	65 d	724,2	4212 1,2	5499 3	1,305
Nb		765	18165	22814	1,256
				$k = 1,3$	



CIA
fig. 10

X 200



CIB
fig. 11

X 200

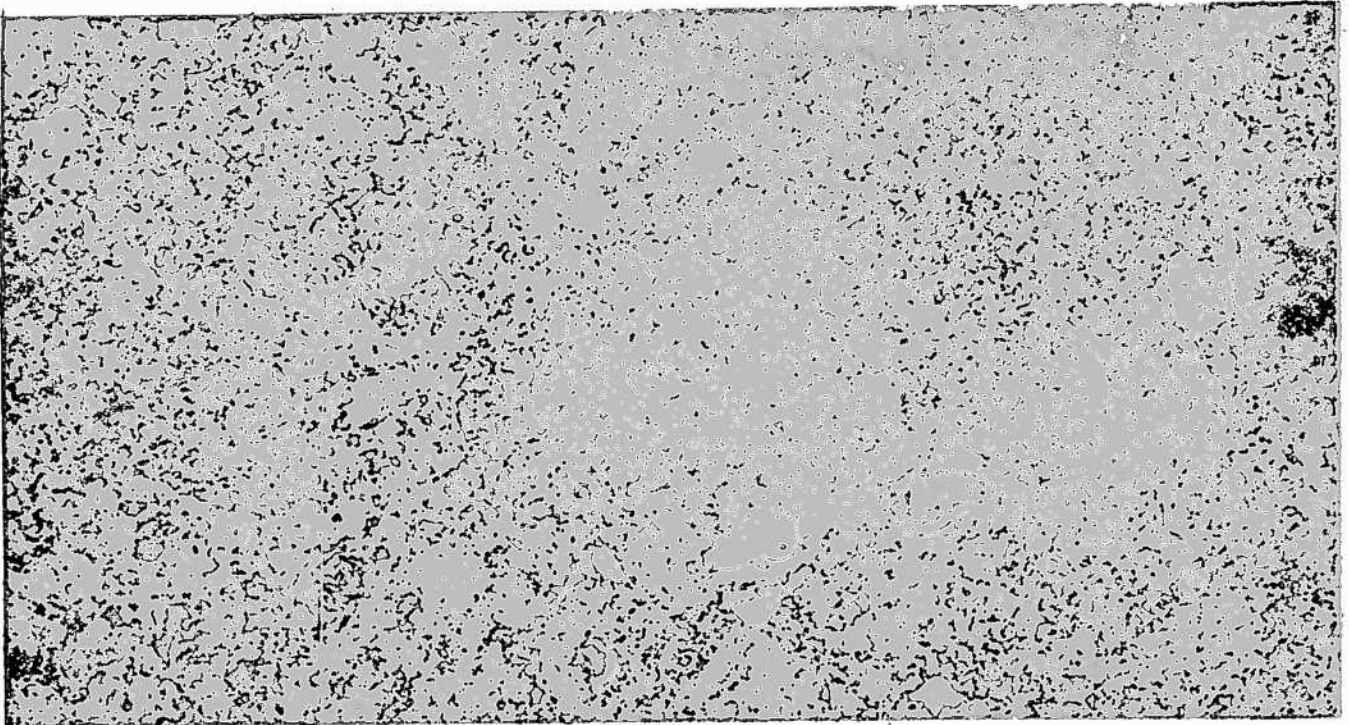


fig.10

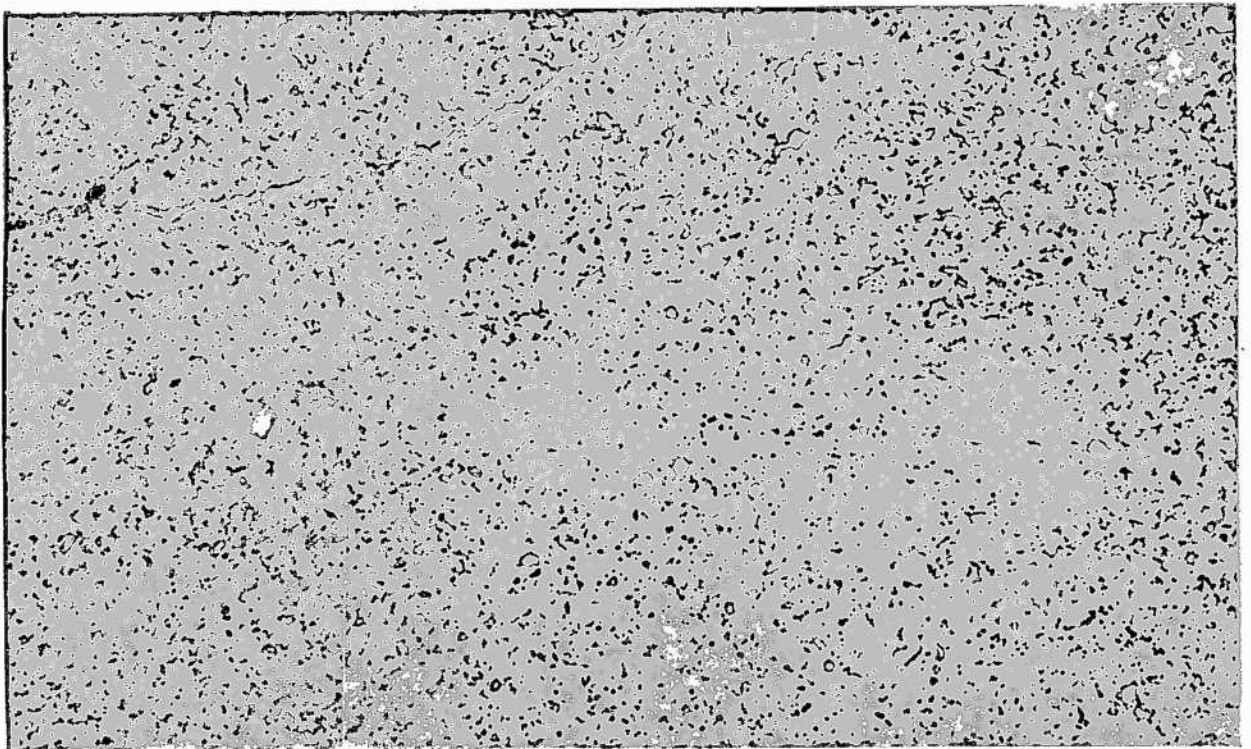


fig.11

17-1

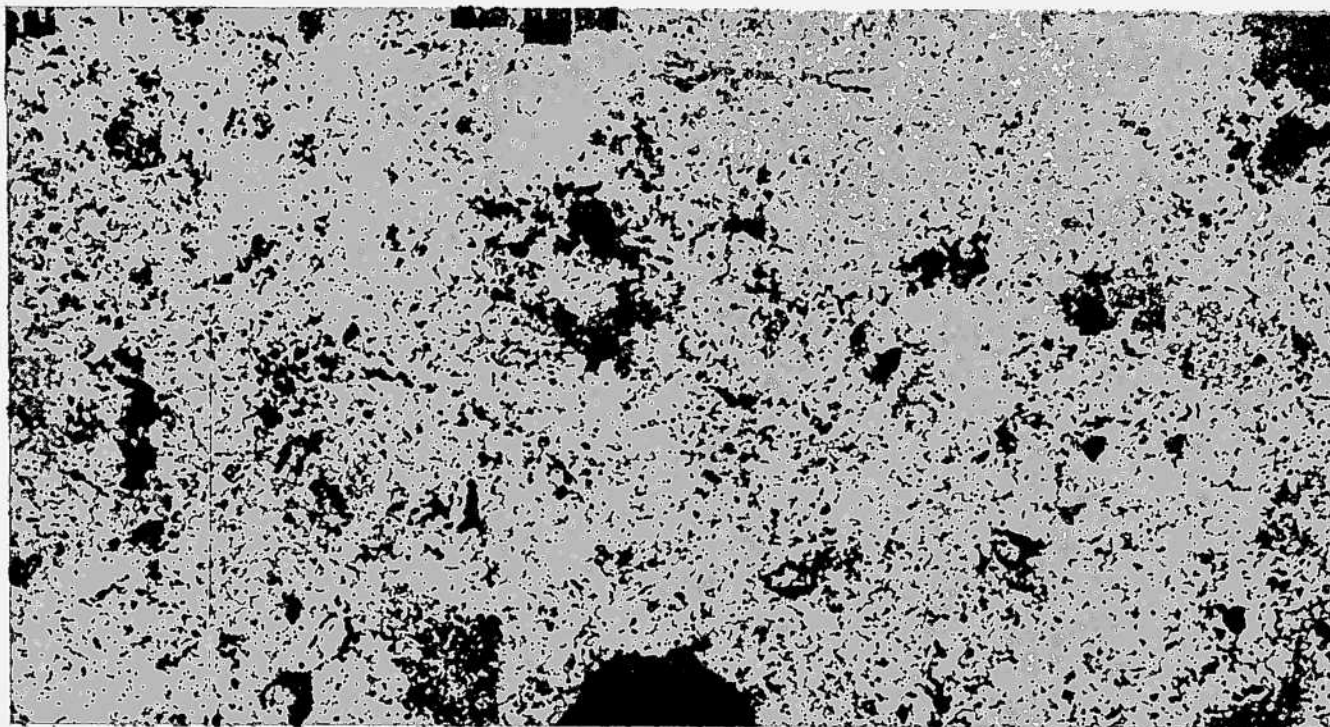


fig.10

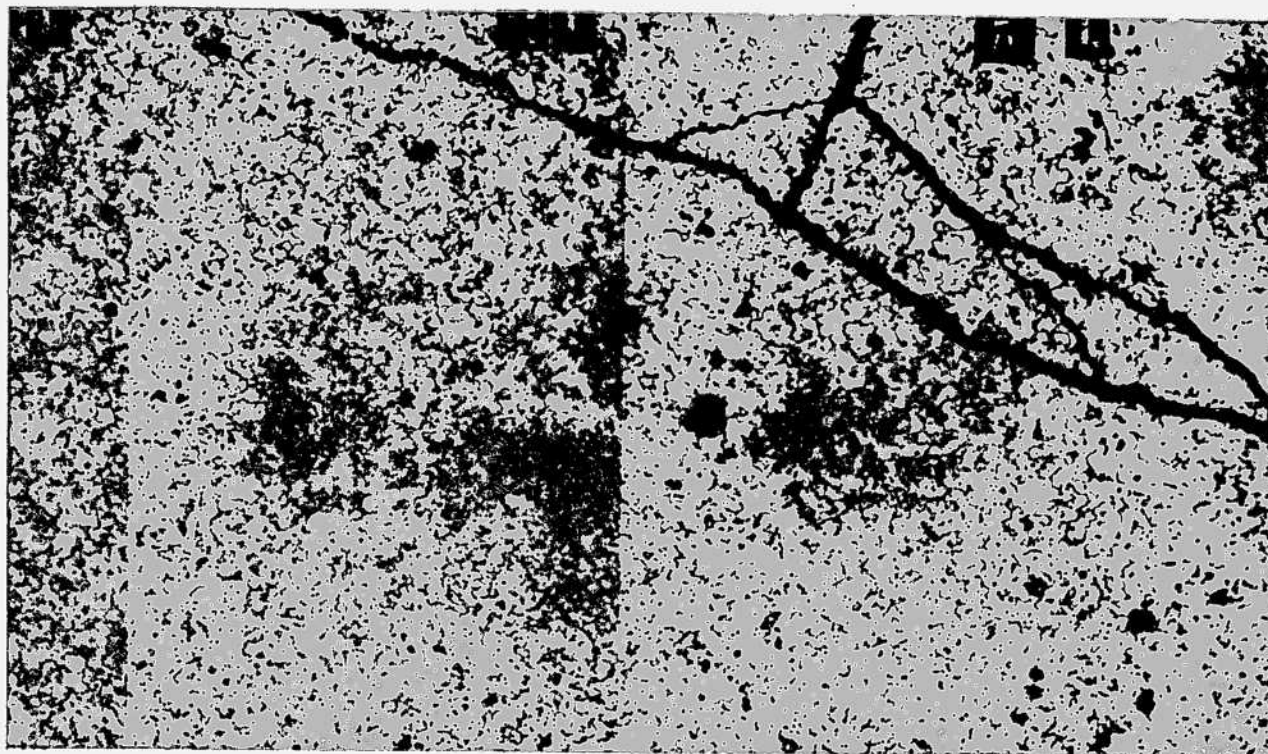


fig.11

17-2

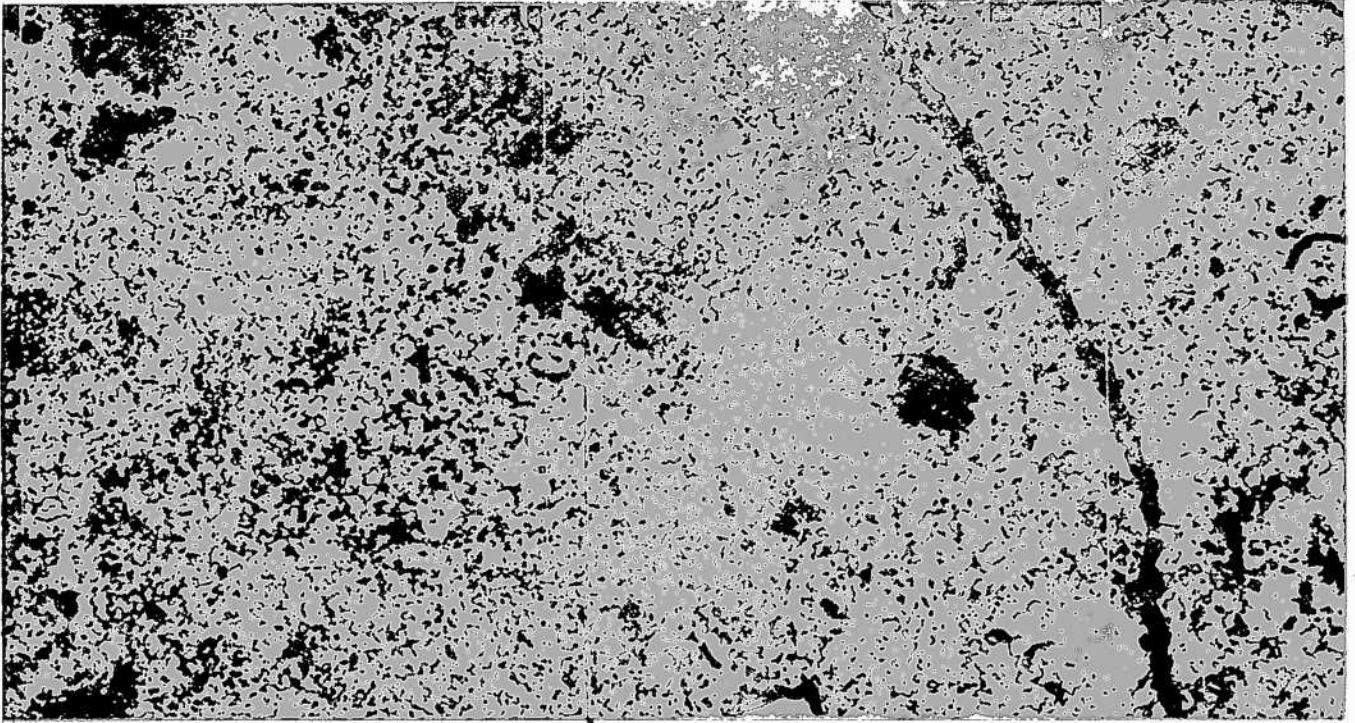


fig.10

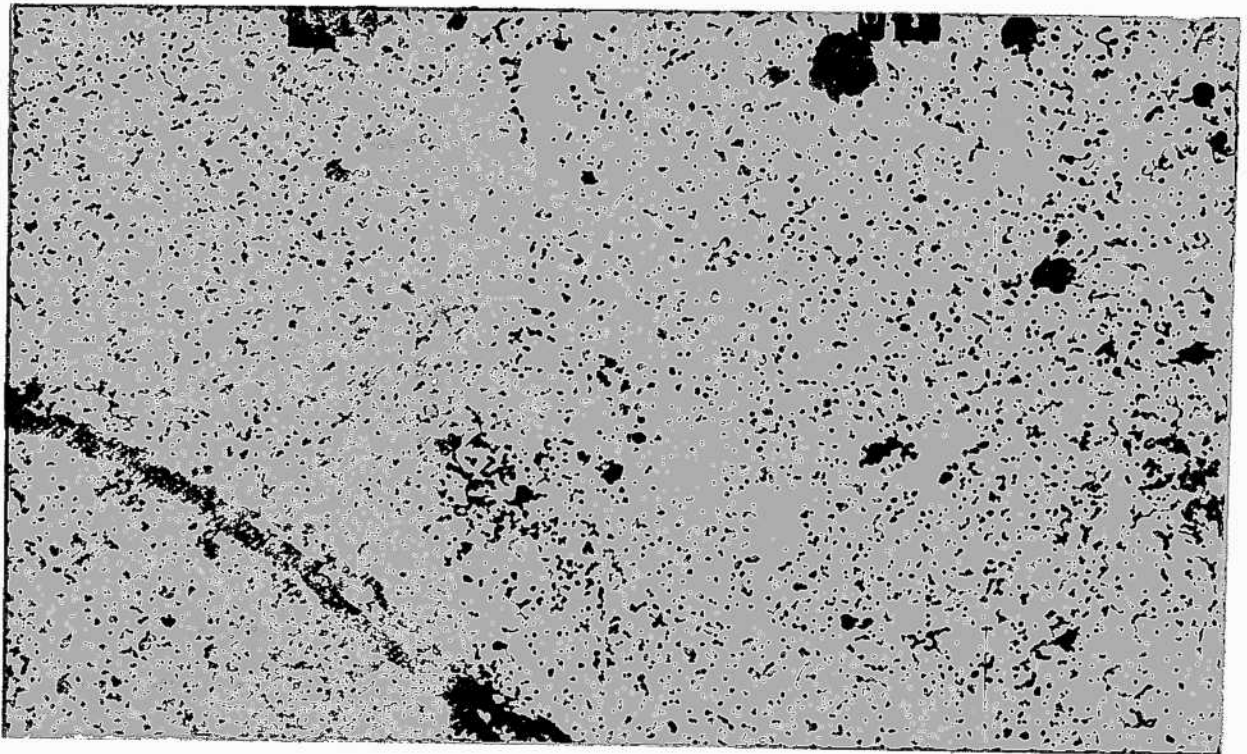


fig.11

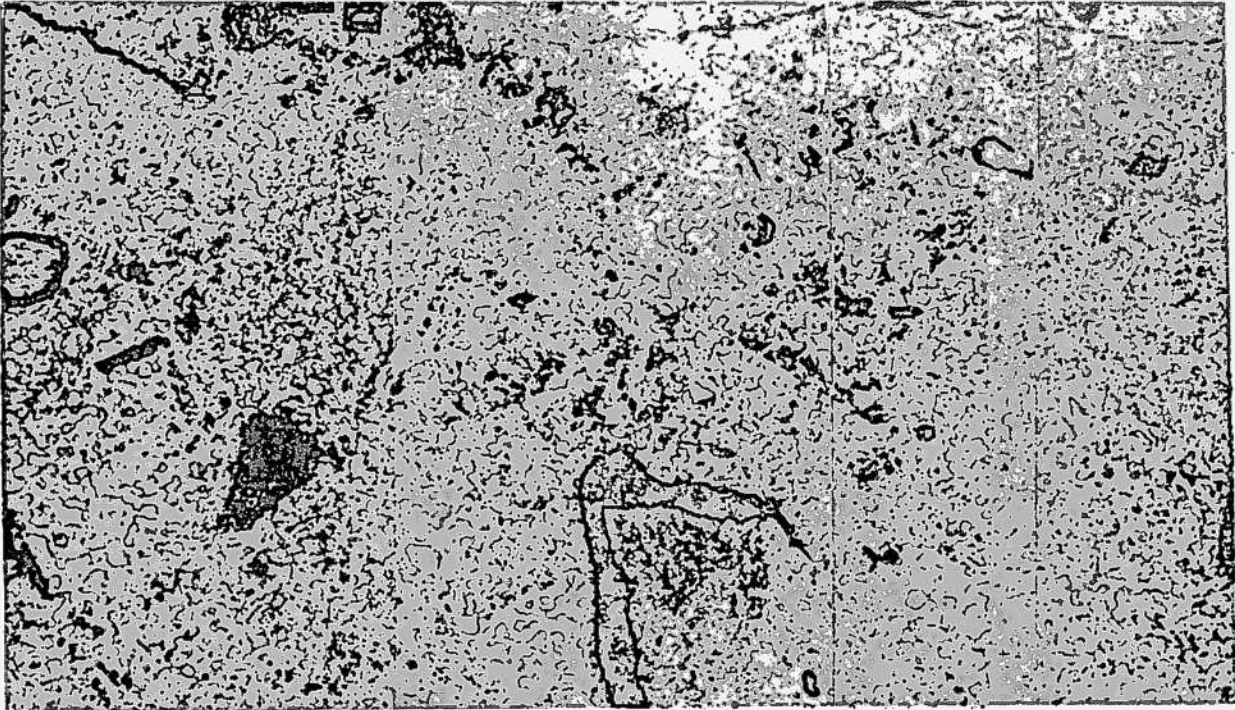


fig.10

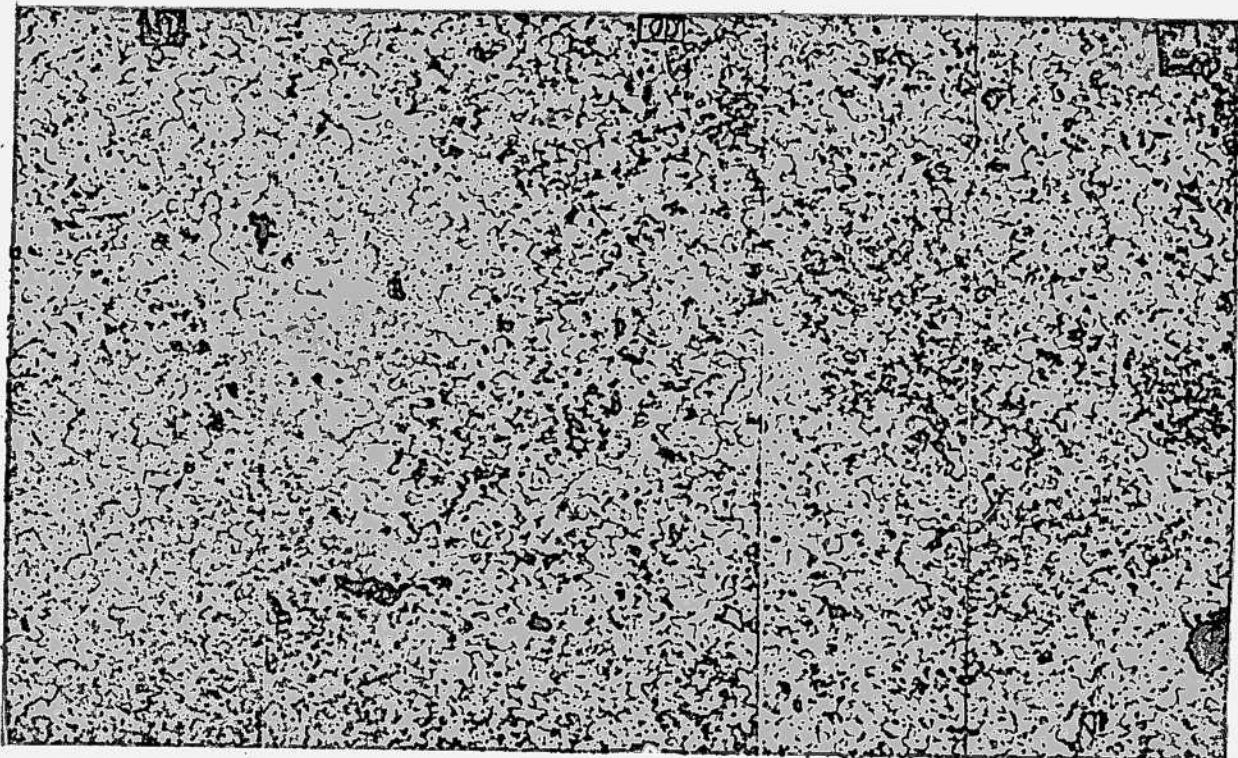


fig.11

17-4

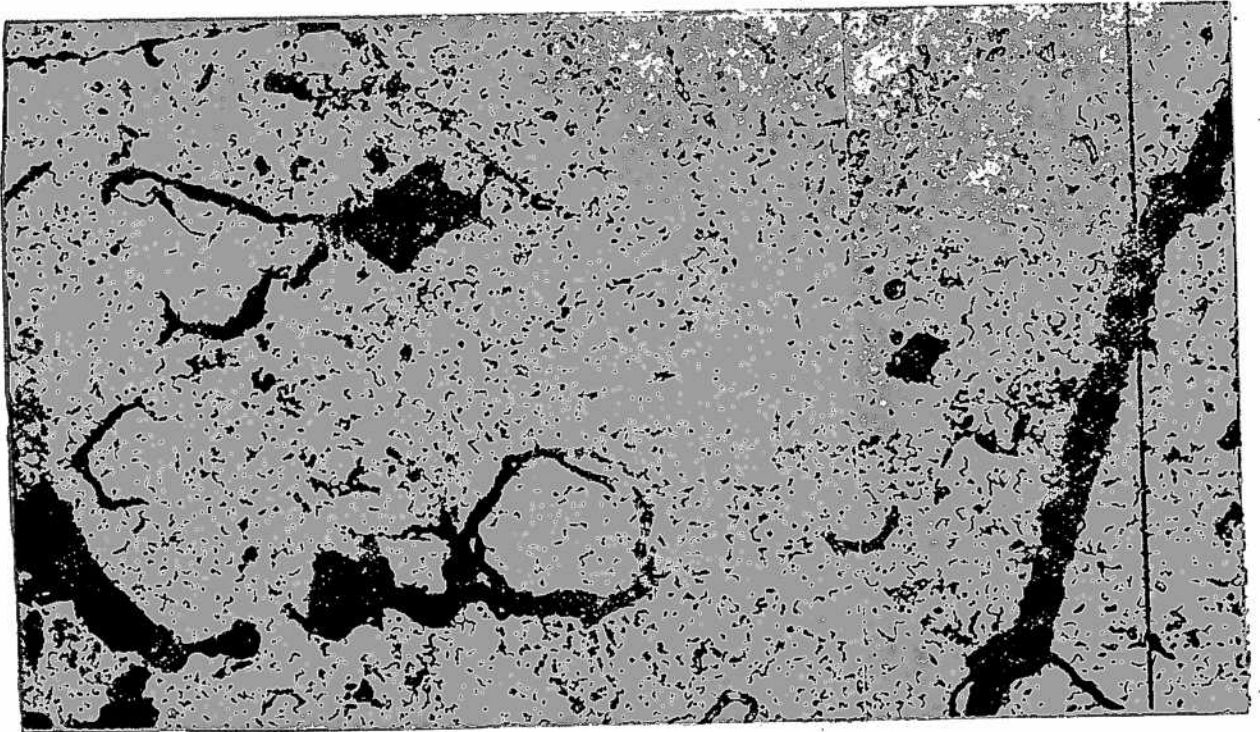


fig.10

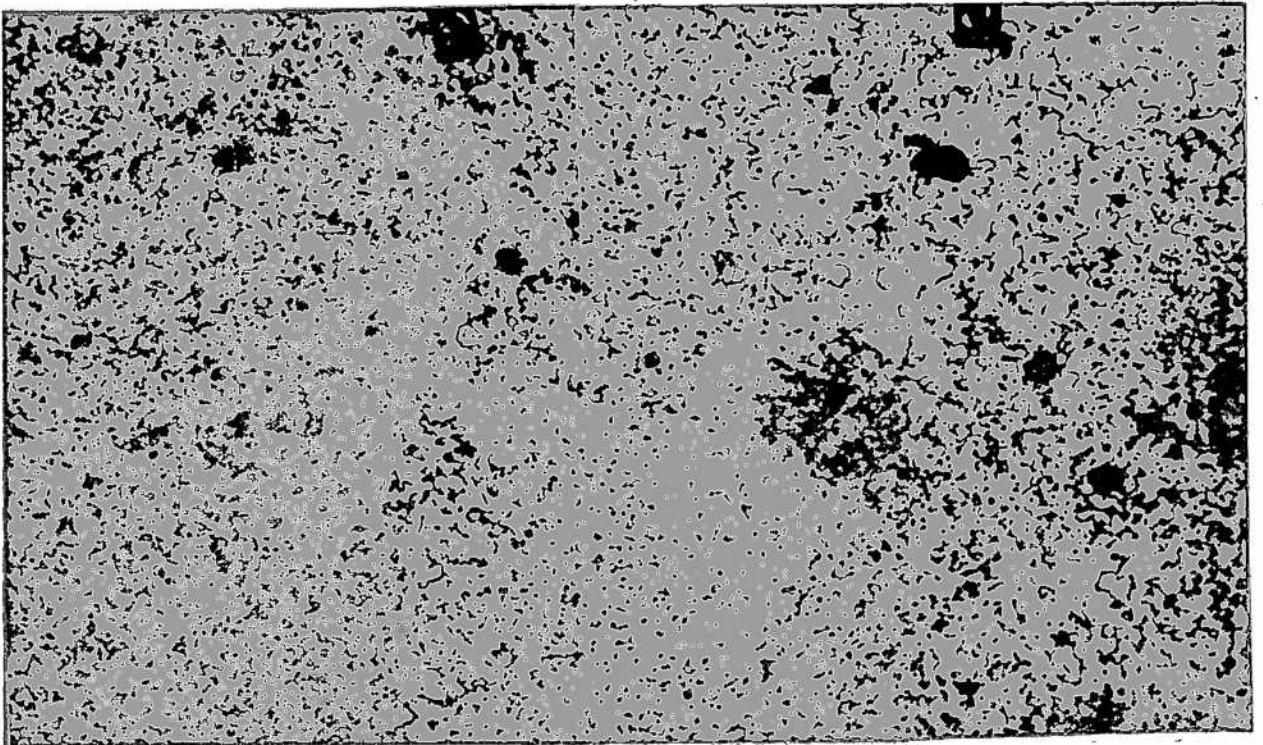


fig.11

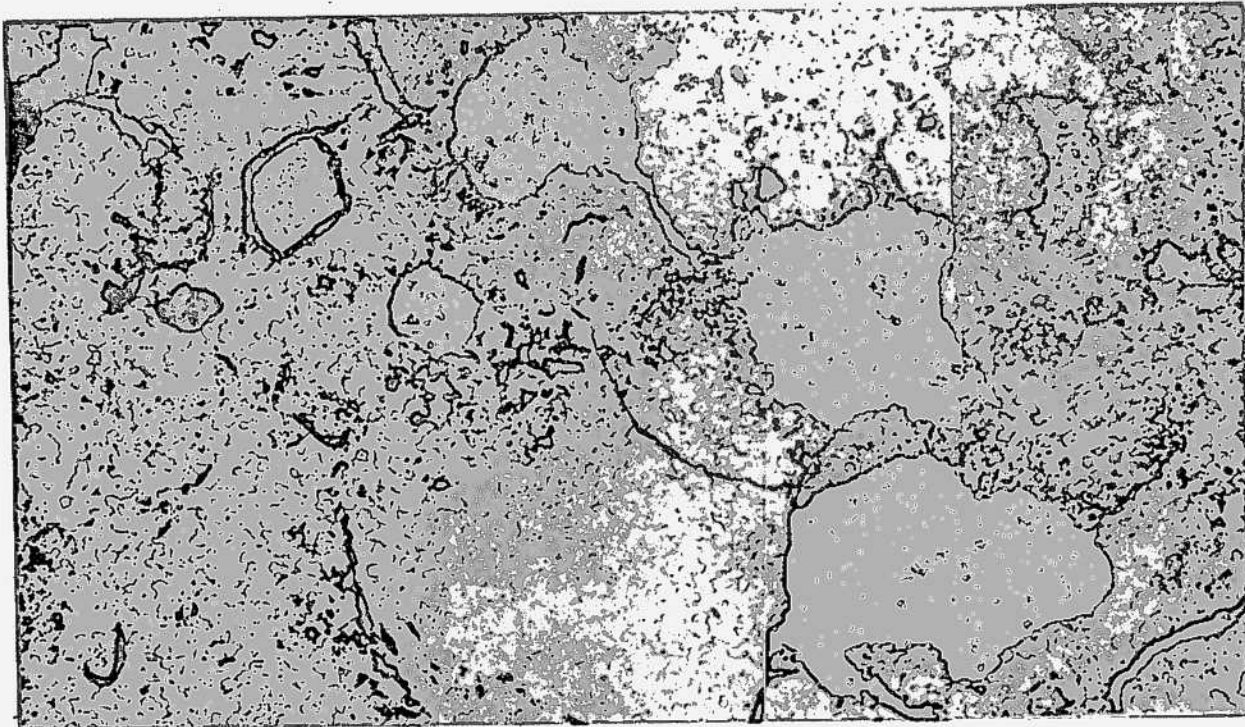


fig.10

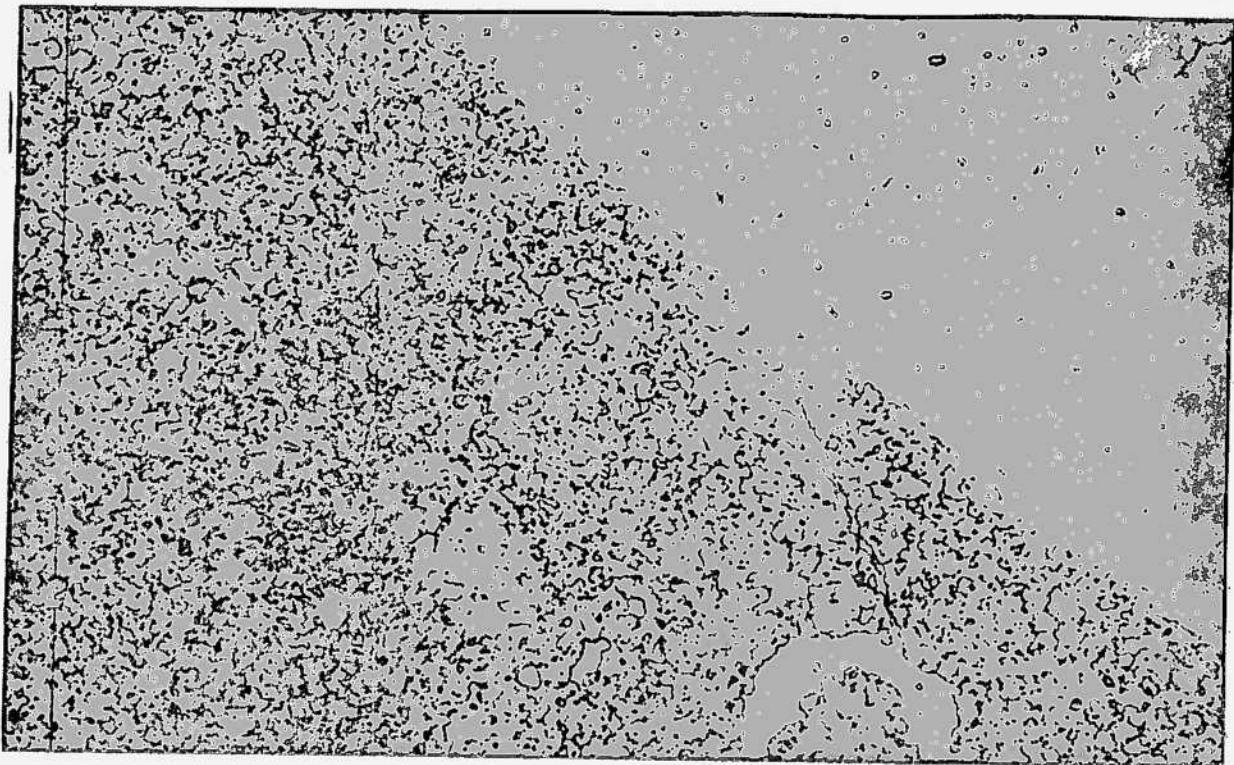


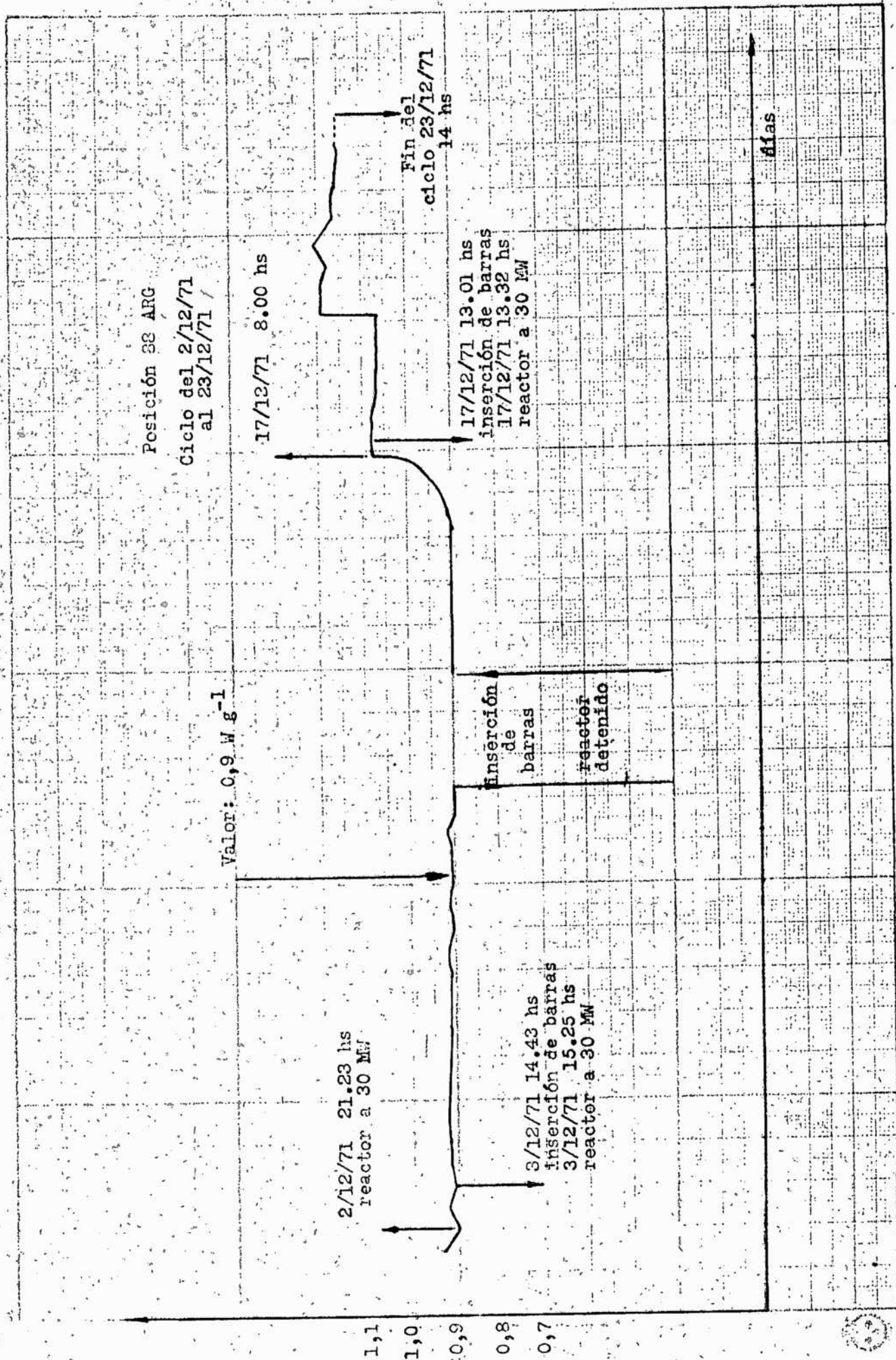
fig.11

CIB 802 mm³ (CN)
 Volumen de ⁸⁵Kr liberado
 CIA 0,205 mm³ (CN)
 CIB no se efectuó el análisis
 Volumen total de Kr liberado
 CIA 2,42 mm³ (CN)
 CIB no se efectuó el análisis
 Volumen de Xe total liberado
 CIA 12,9 mm³ (CN)
 Volumen de Xe estable liberado
 CIB 8,65 mm³ (CN)

VIII. HISTORIA DE LA IRRADIACION

La irradiación se efectuó en dos ciclos: el primero de 448 h y el segundo de 487 h. Los flujos medios fueron de $0,365 \cdot 10^{14}$ y $0,41 \cdot 10^{14}$ n/cm² seg respectivamente.

Los registros de las potencias y de las temperaturas para ambos ciclos son los siguientes:



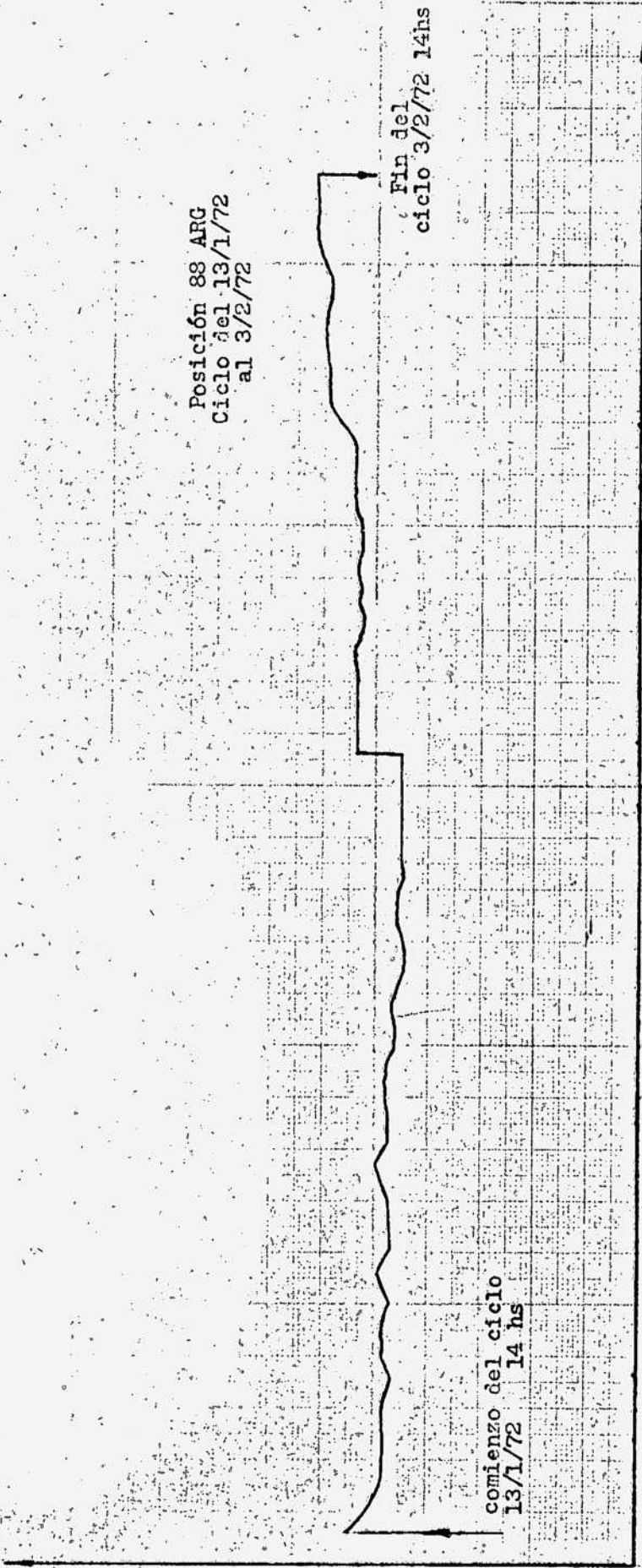
Posición 88 ARG
Ciclo del 13/1/72
al 3/2/72

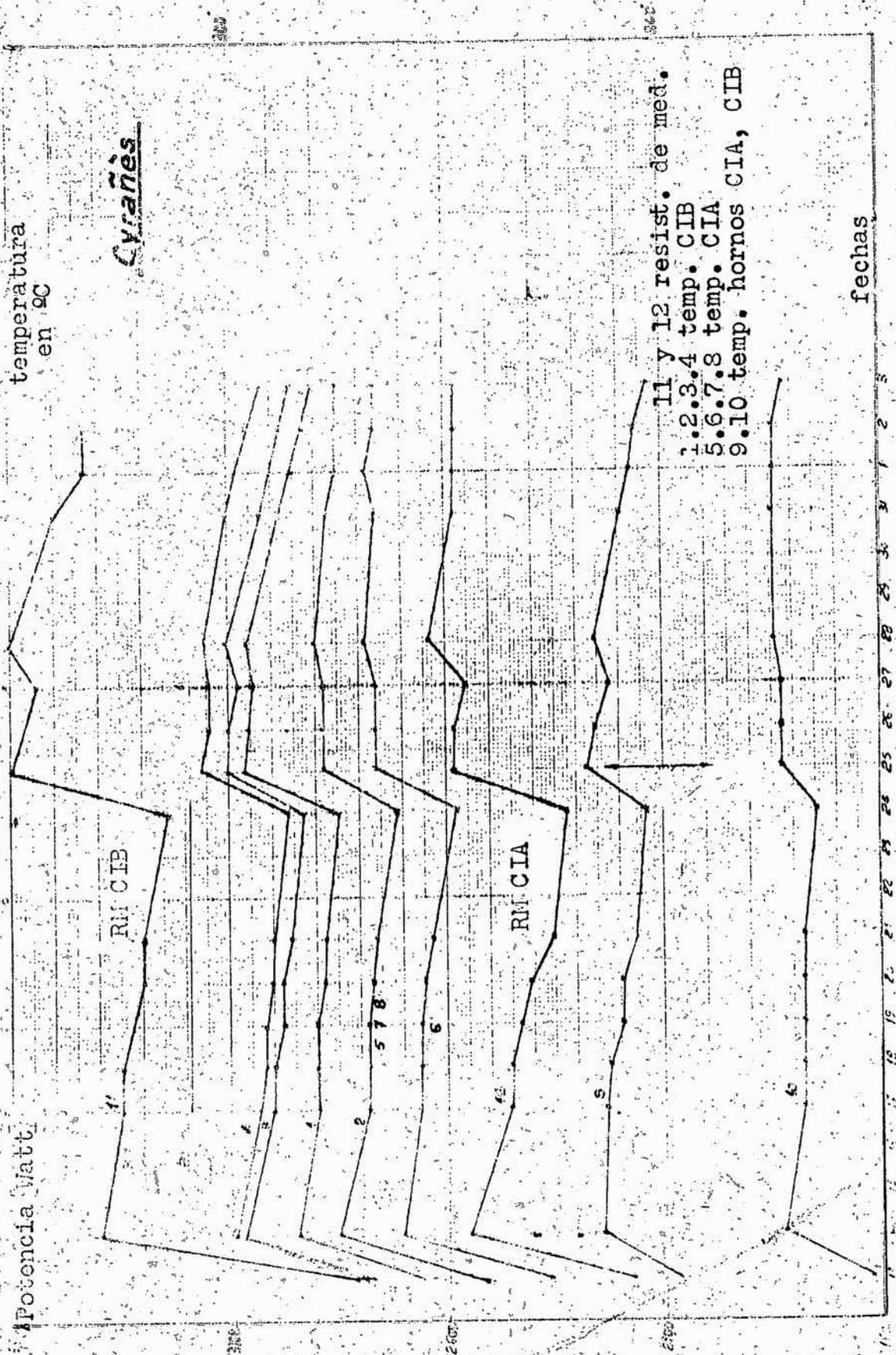
Fin del
ciclo 3/2/72 14hs

comienzo del ciclo
13/1/72 14 hs

días

1,2
1,1
1,0
0,9
0,8



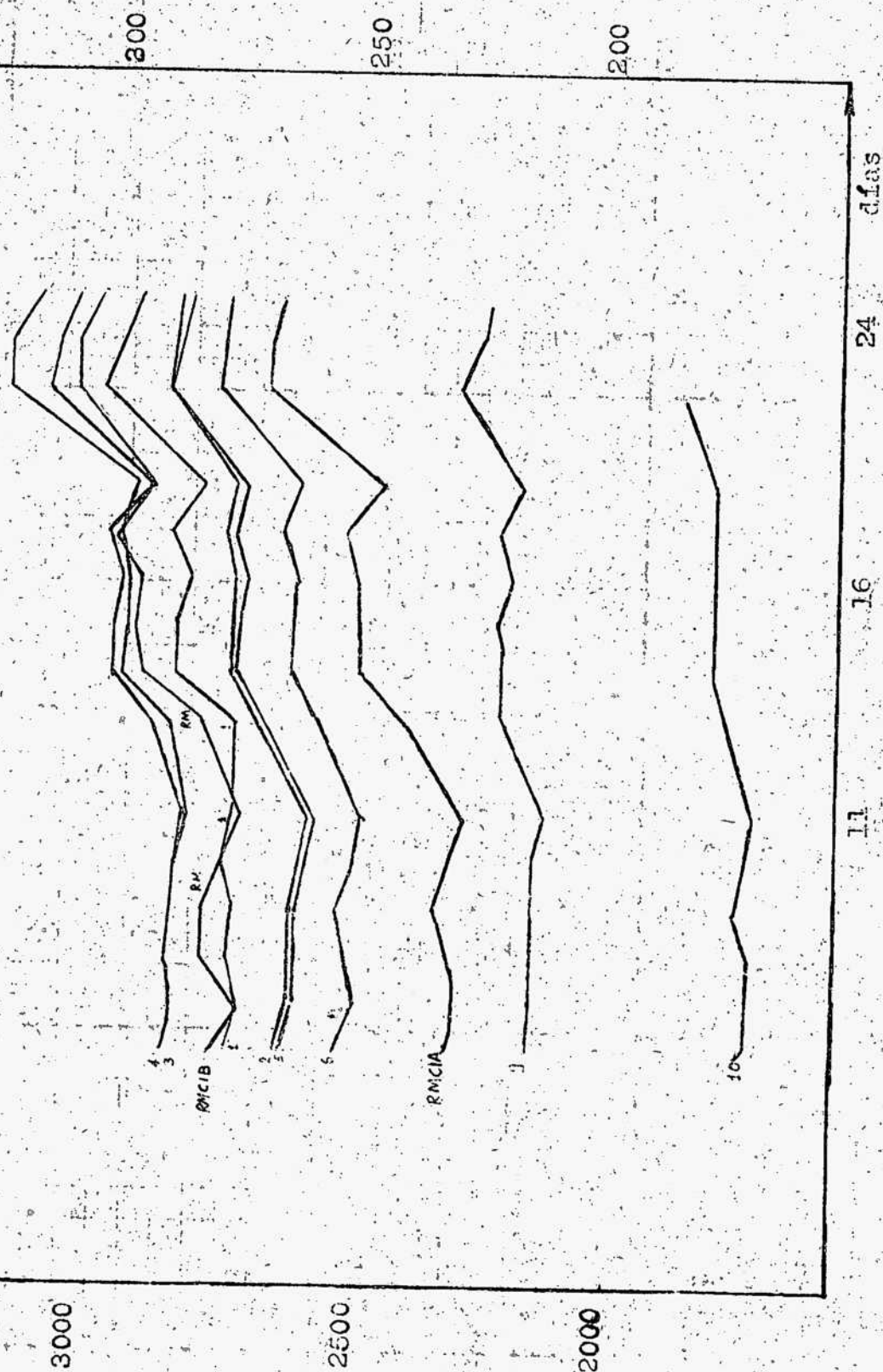


Temp.

°C

Potencia. watts

Diciembre 1971



IX. INTERPRETACION DE RESULTADOS

IX.1 Cálculos previos

Para realizar la elaboración de la información disponible, fué necesario efectuar una serie de cálculos previos y, en algunos casos, recalcular algunos de los valores incluidos en el informe del CEA conteniendo los datos de los ensayos de post-irradiación.

Se consignan, a continuación, los valores correspondientes a los parámetros principales obtenidos por cálculo o suministrados en el informe francés.

TABLA 3

Parámetro	Probeta	
	CIA	CIB
átomos de ^{235}U consumidos (apéndice 2)	$33,14 \cdot 10^{19}$	$45,83 \cdot 10^{19}$
átomos de ^{235}U fisionados	$27,838 \cdot 10^{19}$	$38,5 \cdot 10^{19}$
fisiones totales producidas (apéndice 2)	$36,64 \cdot 10^{19}$	$39,41 \cdot 10^{19}$
fisiones de ^{239}Pu	$8,802 \cdot 10^{19}$	$0,91 \cdot 10^{19}$
sección eficaz macroscópica de fisión, informe francés	$0,493 \text{ cm}^{-1}$	
sección eficaz macroscópica de fisión, calculada (apéndice 1)	$0,517 \text{ cm}^{-1}$	$0,540 \text{ cm}^{-1}$
potencia, informe francés	2970 W	3174 W
potencia calculada (apéndice 1)	3135 W	3372 W
potencia específica	318 Wcm^{-1}	353 Wcm^{-1}
quemado (apéndice 1)	$1464 \frac{\text{MWd}}{\text{t UO}_2}$	$1558 \frac{\text{MWd}}{\text{t UO}_2}$

La sección eficaz macroscópica de fisión que utiliza el CEA en el cálculo de la potencia es baja, si se tiene en cuenta que la sección eficaz microscópica de ^{235}U es $583.10^{-24} \text{ cm}^2$. De la aplicación de este valor de la sección microscópica de fisión con los correspondientes al material combustible de la CIA, se obtiene la sección macroscópica de fisión consignada en la tabla anterior.

IX. 2 Estructura

De un somero estudio del conjunto de micrografías montadas según un radio, para ambos combustibles, surgen las siguientes consideraciones:

a) Probeta CIA

No se ha producido crecimiento de grano, de lo que se infiere que las temperaturas no superaron los $1400-1500^\circ\text{C}$.

En la región central los poros están casi completamente localizados en los bordes de grano. En la zona comprendida entre la superficie exterior y aproximadamente la mitad del radio, habría una mayor porosidad, con tendencia a concentrarse en los bordes de grano. Por consiguiente, las temperaturas en el centro de la pastilla habrían sido suficientemente altas como para producir una migración de poros apreciable. En esta mitad exterior del radio, es posible observar zonas con límites bastante bien definidos, donde la densidad de porosidad es comparativamente mayor a la que presenta el resto del material.

b) Probeta CIB

Tampoco en esta probeta hubo crecimiento de grano, por lo tanto las consideraciones hechas al tratar la probeta CIA.

Los poros aparecen preferentemente ubicados en los bordes de grano, esta preferencia se acentúa en la zona central.

Al igual que en la probeta CIA, aunque con bordes no tan nítidos, existen zonas con concentraciones altas de porosidad.

El combustible obtenido por mezcla mecánica de polvos presenta un tamaño de grano mayor que el material obtenido por coprecipitación.

IX. 3 Gases de fisión

Los datos de los ensayos de post-irradiación disponibles permiten hacer estimaciones no demasiado exactas, la carencia de resultados se acentúa para la probeta CIB.

TABLA 4
PROBETA CIA

Isótopo	Debidos al ²³⁵ U				Debidos al ²³⁹ Pu				Totales			
	No. átomos producidos	No. átomos liberados	% de liberación	volumen liberado cm ³ *	No. átomos producidos	No. átomos liberados	% de liberación	volumen liberado cm ³ *	No. átomos producidos	No. átomos liberados	% de liberación	volumen liberado cm ³ *
⁸⁵ Kr	8,35.10 ¹⁷	4,11.10 ¹⁵			1,147.10 ¹⁷	1,23.10 ¹⁵			9,497.10 ¹⁷	5,34.10 ¹⁵		0,198
Kr establ.	101,61.10 ¹⁷	49,28.10 ¹⁵		1,834	13,28.10 ¹⁷	15,10.10 ¹⁵		0,563	114,89.10 ¹⁷	64,38.10 ¹⁵		2,395
Kr total	109,96.10 ¹⁷	53,39.10 ¹⁵		1,987	14,43.10 ¹⁷	16,40.10 ¹⁵		0,610	124,30.10 ¹⁷	69,79.10 ¹⁵		2,598
¹³⁵ Xe	140,30.10 ¹⁷	61,33.10 ¹⁵			51,38.10 ¹⁷	58,37.10 ¹⁵			191,68.10 ¹⁷	114,7.10 ¹⁵		4,454
Xe establ.	607,7.10 ¹⁷	299,13.10 ¹⁵		1,132	203,9.10 ¹⁷	232,5.10 ¹⁵		8,653	811,6.10 ¹⁷	531,63.10 ¹⁵		19,783
Xe total	748.10 ¹⁷	360,46.10 ¹⁵			254,98.10 ¹⁷	290,92.10 ¹⁵			1002,98.10 ¹⁷	651,38.10 ¹⁵		24,237
(Kr+Xe)	857,96.10 ¹⁷	413,85.10 ¹⁵	0,482	15,399	269,41.10 ¹⁷	307,32.10 ¹⁵	1,141	11,435	1127,37.10 ¹⁷	721,07.10 ¹⁵	0,639	26,8305

* Volumen en condiciones normales.

TABLA 5

PROBETA CIB

Isótopo	Debidos al ^{235}U			Debidos al ^{239}Pu			Totales		
	No. átomos producidos	No. átomos liberados	% de liberación	volumen liberado cm^3 *	No. átomos producidos	No. átomos liberados	% de liberación	volumen liberado cm^3 *	volumen liberado cm^3 *
^{85}Kr	$11,55 \cdot 10^{17}$	$3,17 \cdot 10^{15}$			$0,115 \cdot 10^{17}$	$0,031 \cdot 10^{15}$			0,119
Kr estable	$140,53 \cdot 10^{17}$	$37,16 \cdot 10^{15}$		1,382	$1,415 \cdot 10^{17}$	$0,355 \cdot 10^{15}$		0,013	1,395
Kr total	$152,08 \cdot 10^{17}$	$40,33 \cdot 10^{15}$		1,5	$1,53 \cdot 10^{17}$	$0,386 \cdot 10^{15}$		0,014	1,515
^{135}Xe	$217,71 \cdot 10^{17}$	$46,24 \cdot 10^{15}$			$5,82 \cdot 10^{17}$	$1,37 \cdot 10^{15}$			1,772
Xe estable	$840,46 \cdot 10^{17}$	$226,66 \cdot 10^{15}$		8,392	$21,03 \cdot 10^{17}$	$5,46 \cdot 10^{15}$		0,203	8,596
Xe total	$1058,16 \cdot 10^{17}$	$272,9 \cdot 10^{15}$			$26,85 \cdot 10^{17}$	$6,826 \cdot 10^{15}$			10,408
(Kr+Xe)	$1210,24 \cdot 10^{17}$	$313,23 \cdot 10^{15}$	0,259	11,655	$28,38 \cdot 10^{17}$	$7,212 \cdot 10^{15}$	0,254	0,268	11,9249

* Volumen en condiciones normales.

La mayoría de los valores de las tablas 4 y 5 han sido obtenidos por cálculo usando relaciones entre los productos de fisión. Estas relaciones no necesariamente se mantienen entre los componentes de los gases de fisión liberados, debido al diferente comportamiento de los predecesores de los gases nobles en las cadenas radiactivas y, en alguna medida, a la influencia de los isótopos en los mecanismos de liberación.

La escasa liberación producida en ambas probetas 0,64% y 0,26% de la cantidad generada, para la CIA y la CIB respectivamente, es coherente con las relativamente bajas temperaturas centrales alcanzadas. Por consiguiente, la liberación puede atribuirse principalmente a los mecanismos actuantes en la zona superficial del combustible a baja temperatura y a las superficies libres creadas al fracturarse el material. Dadas las condiciones en que se efectuó la irradiación era previsible esperar una liberación menor que el 1%.

En las tablas 4 y 5 es posible observar que la liberación en la probeta CIA es algo superior al doble de la producida en CIB. Si bien las dos probetas no han alcanzado valores iguales de potencia específica y quemado, las diferencias de estos parámetros no tiene una significación tal como para provocar modificaciones apreciables en el comportamiento del material en cuanto a la retención de gases.

La menor retención del material de CIA, se debería fundamentalmente a su menor densidad media (hay pastillas cuyas densidades difieren marcadamente de las correspondientes a CIB).

La menor densidad habría provocado una mayor liberación en la probeta CIA, al tender a generar temperaturas más altas y, dada la relación inversa que existe entre la densidad y el área específica del material un aumento del área real del combustible.

Sin embargo, la mayor potencia específica desarrollada por la probeta CIB podría haber compensado, o al menos disminuido, el efecto térmico de la densidad en la CIA, con lo cual las máximas temperaturas alcanzadas por ambas probetas diferirían muy poco entre sí. Considerando, además, que los combustibles no han superado los 1500°C, el volumen de pastilla con temperaturas superiores a 1000°C (si es que realmente se llegó a temperaturas de ese orden) es pequeño. Por lo tanto, el incremento en la liberación por causa de mecanismos térmicamente activados es despreciable.

Luego, el efecto preponderante se centraría en la diferencia de áreas específicas. El área específica en CIA es aproximadamente 2,8 veces mayor que la correspondiente a CIB. Este hecho, dada la sensibilidad de los mecanismos de liberación superficiales a parámetros tales como el área específica, complementa y corrobora las consideraciones efectuadas al atribuir la supremacía a este tipo de mecanismo.

No obstante, sería una conclusión demasiado simplista y que no reflejaría

totalmente la realidad, establecer que la relación entre la liberación de gas por los materiales es aproximadamente igual a la relación entre sus áreas específicas.

En el cuadro siguiente se han volcado los resultados de calcular los cocientes entre el número de átomos liberados y: a) el número de átomos producidos; b) el número de fisiones; c) la masa de UO_2 y d) la potencia específica, para ambas probetas.

TABLA 6

Isótopo	Probeta CIA				Probeta CIB			
	$\frac{\text{No. at. lib.} \cdot 10^2}{\text{No. at. prod.}}$	$\frac{\text{at. lib.}}{\text{No. fisión.}}$	$\frac{\text{No. at. lib.}}{\text{mUO}_2(\text{g})}$	$\frac{\text{No. at. lib.}}{\text{pot. esp.}}$	$\frac{\text{No. at. lib.} \cdot 10^2}{\text{No. at. prod.}}$	$\frac{\text{No. at. lib.}}{\text{No. fisión.}}$	$\frac{\text{No. at. lib.}}{\text{mUO}_2(\text{g})}$	$\frac{\text{No. at. lib.}}{\text{pot. esp.}}$
Xe		$17,778 \cdot 10^{-4}$	$7,810 \cdot 10^{15}$	$2,045 \cdot 10^{15}$		$7,097 \cdot 10^4$	$3,317 \cdot 10^{15}$	$0,792 \cdot 10^{15}$
Kr		$1,905 \cdot 10^{-4}$	$0,837 \cdot 10^{15}$	$0,220 \cdot 10^{15}$		$1,033 \cdot 10^4$	$0,483 \cdot 10^{15}$	$0,115 \cdot 10^{15}$
Xe+Kr	0,639	$19,680 \cdot 10^{-4}$	$8,646 \cdot 10^{15}$	$2,264 \cdot 10^{15}$	0,259	$8,132 \cdot 10^4$	$3,801 \cdot 10^{15}$	$0,907 \cdot 10^{15}$

Se observa que todas las relaciones pertenecientes a la probeta CIA, doblan las correspondientes a la CIB.

En la tabla 7 figuran los volúmenes de gases de fisión liberados, en condiciones normales de presión y temperatura, obtenidos por análisis, calculados en este informe y los estimados en el informe del CEA.

TABLA 7

Isotopo	Probeta CIA			Probeta CIB		
	vol. calculado cm ³	vol. est. inf. del CEA cm ³	vol. det. por análisis cm ³	vol. calculado cm ³	vol. est. inf. del CEA cm ³	vol. det. por análisis cm ³
⁸⁵ Kr	0,198	--	0,205	0,119	--	--
Kr est.	2,395	2,66	--	1,395	--	--
Kr total	2,598	--	2,42	1,515	--	--
Xe est.	19,783	18,6	--	8,596	--	8,65
Xe total	24,237	--	12,9	10,408	--	--

La escasez de datos no permite determinar si las diferencias de comportamiento de ambos combustibles en cuanto a la liberación de gases, son debidas, además de los factores ya mencionados, a la influencia de los métodos de preparación del polvo de UO₂. Para arribar a alguna conclusión hubiese sido necesario conocer, entre otras cosas, la distribución de productos de fisión en ambos materiales para establecer, por ejemplo, si el material fisionable se ha distribuido homogéneamente o se han concentrado en zonas lo cual habría facilitado o entorpecido la liberación.

X. APLICACION DEL CODIGO PIZZA

Se suministraron al programa como datos de entrada, la geometría de las probetas, la temperatura exterior de vaina, la densidad del material, la naturaleza y presión del gas de llenado, el enriquecimiento y la historia de irradiación. Para la conductividad térmica se adoptó la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{1}{B+C(t+273)} + [D(t+273)] \cdot ES$$

λ = conductividad térmica

t = temperatura

B = 3,25

C = 0,03453

D = 0,11.10⁻¹¹

ES = 0,3.10

Obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 8

	Probeta CIA		Probeta CIB	
	$\tau = 0$	$\tau = 36$ ds	$\tau = 0$	$\tau = 36$ ds
Potencia nuclear w/cm	230	230	280	--
Potencia gamma w/cm	26	26	30	--
Temp. externa vaina °C	200	200	200	--
Temp. interna vaina °C	289,5	289,5	315	--
Temp. sup. comb. °C	586,8	591	646	688
Temp. central comb. °C	1382,6	1478	1684	1734
Radio interno vaina cm	0,5265	0,5265	0,5266	--
Conductividad el gap	0,26	0,257	0,2835	0,2513
Presión de contacto	0	0	0	0
Radio fundido	0	0	0	0
Dilatación combustible	0,0899	0,0908	0,1270	0,1373
Presión interna	5,1	5,8	8,3	9,5
Volumen libre inicial	1,232	--	1,2324	--
Volumen normal libre	1,129	--	1,129	--
Moles iniciales	0,4878.10 ⁻⁴		0,4878.10 ⁻⁴	
Volumen normal liberado	0	0,02346	0	0,07304
Moles liberados	0	0,10137.10 ⁻⁵	0	0,31558.10 ⁻⁵
Quemado MWd/tU	0	1228,7	0	1487

En la tabla siguiente se han colocado los valores de los parámetros más importantes calculados en el presente informe u obtenidos por otra vía y los resultantes de la aplicación del código.

TABLA 9

	Probeta CIA		Probeta CIB	
	Obtenido por el código Pizza	Obtenido por una vía diferente al código	Obtenido por el código Pizza	Obtenido por una vía diferente al código
	$\bar{Z} = 36$ ds	$\bar{Z} = 38,9$ ds	$\bar{Z} = 36$ ds	$\bar{Z} = 38,9$ ds
Potencia $W\ cm^{-1}$	256	318	280	353
temperatura central comb. $^{\circ}C$	1478	$\angle 1400$	1734	$\angle 1400$
Quemado MWd/tUO_2	1087,7	1464	1316	1558,3
Volumen libre inicial cm^3	1,232	0,649	1,232	0,889
Moles iniciales	$0,4878 \cdot 10^4$	$0,289 \cdot 10^4$	$0,4878 \cdot 10^4$	$0,397 \cdot 10^4$
Volumen normal liberado cm^3	0,02346	0,02683	0,07304	0,01192
Moles liberados	$0,10137 \cdot 10^5$	$0,11978 \cdot 10^5$	$0,31558 \cdot 10^5$	0,05324

Los valores que se comparan con los obtenidos a través del Código Pizza se han calculado, excepto las temperaturas que se estimaron en base a la estructura.

Hay una buena concordancia entre los valores correspondientes al número de moles y volumen del gas liberado en CIA y el quemado alcanzado por CIB. Debe tenerse en cuenta que los tiempos de irradiación considerados son ligeramente diferentes.

Como se ha mencionado, ninguno de los combustibles superó los $1400^{\circ}C$, por lo tanto, las temperaturas calculadas por el código están por arriba de los valores reales, en especial la consignada para la probeta CIB. Lógicamente, esto ha determinado que la liberación correspondiente también sea excesiva.

Las discrepancias en los valores se deben, aunque quizás parcialmente, a que en el cálculo mediante el código se tomó la misma densidad $10,42\ g/cm^3$ para ambos materiales y no se tuvieron en cuenta pequeñas variaciones en las dimensiones de las probetas.

XI. CONCLUSION GENERAL

Los combustibles, dadas las condiciones de irradiación, potencia específica, temperatura central y quemado de valores relativamente bajos, no han estado en ningún momento exigidos. Esto ha determinado que los procesos que en ellos han ocurrido y la magnitud de los mismos fuesen de escasa significación. Otro hecho desfavorable ha sido que las probetas no han estado sometidas a exactamente las mismas condiciones de irradiación, aunque este efecto se ha visto minimizado por los bajos valores de los parámetros ya mencionados, lo que habría dificultado, de no mediar esta circunstancia, la tarea de comparar el comportamiento de ambos tipos de material combustible.

Lamentablemente, no se ha contado con todos los ensayos de post-irradiación necesarios para interpretar adecuadamente los resultados de la irradiación y establecer diferencias en las performances de las probetas. El comportamiento de los combustibles de CIA y CIB, no difiere del previsible para las condiciones de irradiación a las que fueron sometidos. De haberse alcanzado una mayor temperatura central la experiencia hubiese resultado realmente interesante, pero de todas maneras tendría que haber sido complementada por un mayor número de ensayos de post-irradiación.

XII. NOMENCLATURA

Bu	quemado	MWd/tUO ₂
E	energía	joule
m	masa	gramos
$n_{Z,A}$	número de átomos del isótopo de número atómico Z, y número másico A, por unidad de volumen	átomos/cm ³
$N_{Z,A}$	número de átomos del isótopo de número atómico Z y número másico A	átomos
P	potencia	watt
Pe	potencia específica	watt/cm
	tiempo	
V _b	volumen interno de la barra combustible	cm ³
V _{cg}	volumen de la cámara de gases	cm ³
V _{conex}	volumen del conducto de comunicación a la cámara de gases	cm ³
V _{int}	volumen de la cámara con pastillas	cm ³
V _{cξ-t}	volumen espacio cámara de gases-tapón	cm ³
V _{past.}	volumen pastillas	cm ³
V _{He}	volumen de helio	cm ³
σ _a	sección eficaz microscópica de absorción	cm ²
σ _c	sección eficaz microscópica de captura	cm ²
σ _f	sección eficaz microscópica de fisión	cm ²
σ _f	sección macroscópica de fisión	cm ⁻¹

Φ	flujo	$n/cm^2 \cdot seg$
Φ	flujo medio	$n/cm^2 \cdot seg$
$\varnothing$	diámetro	cm
δ	densidad	gramos/cm ³
$\bar{\delta}$	densidad-media	gramos/cm ³

REFERENCIAS

1. ETHERINGTON, H., "Nuclear Engineering Handbook", N. York, McGraw-Hill 1968.
2. Commissariat a l'Energie Atomique (C.E.A.), "Informe de la irradiación de la cápsula CI-EPI-MZFR".
3. LEWIS, "The return of escaped fission product gases to UO_2 ".

Apéndice 1

Calculo de la Potencia

$$P' = \sum_f \Phi \cdot 0,288 \cdot 10^{-10} \text{ W.seg.}$$

$$\sum_f = n_{Z,A} \cdot \sqrt{f}$$

$$\sqrt{f} = 583 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (1)$$

para CIA

$$n_{2,5} = \delta_{UO_2} \cdot \frac{m_U}{m_{UO_2}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot \frac{\% \text{ } ^{235}\text{U.atg}}{10^2 \cdot m_{UO_2}}$$

$$n_{2,5} = 9,98 \text{ g/cm}^3 \cdot \frac{238 \text{ g}}{270 \text{ g}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg} \cdot 0,04 \cdot \frac{1 \text{ atg}}{238 \text{ g}}$$

$$n_{2,5} = 8,5 \cdot 10^{20} \text{ atomos/cm}^3$$

$$\sum_f = n_{2,5} \cdot \sqrt{f} = 8,5 \cdot 10^{20} \cdot 583 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^{-1} = 0,517 \text{ cm}^{-1}$$

$$P'_{CIA} = 0,288 \cdot 10^{-10} \text{ W.seg} \cdot 0,252 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{ seg} \cdot 0,517 \text{ cm}^{-1}$$

$$P'_{CIA} = 375,22 \text{ W/cm}^3$$

$$P_{CIA} = P'_{CIA} \cdot V_{UO_2} = P'_{CIA} \cdot \frac{m_{UO_2}}{\delta_{UO_2}} = 375,22 \text{ W/cm}^3 \cdot \frac{83,4 \text{ g}}{9,98 \text{ g/cm}^3}$$

$$P_{CIA} = 3135 \text{ W}$$

para CIB

$$n_{2,5} = 10,4 \text{ g/cm}^3 \cdot \frac{238 \text{ g}}{270 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ atg}}{238 \text{ g}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg} \cdot 0,04$$

$$n_{2,5} = 0,9275 \text{ at/cm}^3 \cdot 10^{21}$$

$$\sum_f = 9,28 \cdot 10^{20} \text{ at/cm}^3 \cdot 583 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 0,540 \text{ cm}^{-1}$$

$$P'_{CIB} = 0,288 \cdot 10^{-20} \text{ Wseg} \cdot 0,268 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2 \text{seg} \cdot 0,540 \text{ cm}^3 = 415,98 \text{ W/cm}^3$$

$$P_{CIB} = P'_{CIB} \cdot \frac{m_{UO_2}}{\delta_{UO_2}} = 415,98 \text{ W/cm}^3 \cdot \frac{84,3125 \text{ g}}{10,4 \text{ g/cm}^3} = 3372,36 \text{ W}$$

$$\frac{P_{CIB}}{P_{CIA}} = 1,06$$

Potencia Específica

$$Pe_{CIA} = \frac{P_{CIA}}{m_{UO_2}} \cdot \delta_{UO_2} \cdot \pi \cdot \frac{\overline{\phi_{past}}^2}{4} \cdot 10^2 = \frac{3135 \text{ W} \cdot 9,98 \text{ g/cm}^3 \cdot \pi \cdot 10,4^2}{83,4 \text{ g}} \cdot 10^2 \text{ cm}^2$$

$$Pe_{CIA} = 318,5 \text{ W/cm}$$

$$Pe_{CIB} = \frac{P_{CIB}}{m_{UO_2}} \cdot \delta_{UO_2} \cdot \pi \cdot \frac{\overline{\phi_{past}}^2}{4} \cdot 10^2 = \frac{3372,36 \text{ W} \cdot 10,4 \text{ g/cm}^3 \cdot \pi \cdot 10,4^2}{84,3125 \text{ g}} \cdot 10^2 \text{ cm}^2$$

$$Pe_{CIB} = 353,19 \text{ W/cm}$$

Quemado

$$Bu_{CIA} = \frac{P_{CIA}}{m_{UO_2}} \cdot \tau = \frac{3135 \text{ W} \cdot 935 \text{ hs} \cdot 1 \text{ día}}{83,4 \text{ g} \cdot 24 \text{ hs}} = 1464,4 \frac{\text{W} \cdot \text{día}}{\text{g}_{UO_2}}$$

$$Bu_{CIA} = 1464,4 \text{ MWd/t}_{UO_2} = 1660,6 \text{ MWd/t}_U$$

$$Bu_{CIB} = \frac{P_{CIB}}{m_{UO_2}} \cdot \tau = \frac{3372,36 \text{ W} \cdot 935 \text{ hs} \cdot 1 \text{ día}}{84,3125 \text{ g} \cdot 24 \text{ hs}} = 1558,3 \frac{\text{W} \cdot \text{día}}{\text{g}_{UO_2}}$$

$$Bu_{CIB} = 1558,3 \text{ MWd/t}_{UO_2} = 1767 \text{ MWd/t}_U$$

Apéndice 2Determinación del Número de Fisiones Totales

El calculo incluye las producidas por los isótopos ^{235}U
 y ^{239}Pu .

1 fision: 180 Mev.

1 ev.: $1,602 \cdot 10^{-19}$ joule

1 fision: $28,8 \cdot 10^{-12}$ joule

Para la probeta CIA

$$P_{\text{CIA}} = 3135 \text{ W}$$

$$E_{\text{CIA}} = P_{\text{CIA}} \cdot \tau = 3135 \text{ W} \cdot 935 \text{ hs} \cdot 3600 \text{ seg/hs} = 1055,24 \cdot 10^7 \text{ J}$$

$$\begin{aligned} \text{fisiones producidas} &= \frac{1055,24 \cdot 10^7 \text{ joule}}{28,8 \cdot 10^{-12} \text{ joule/fision}} \\ &= 36,64 \cdot 10^{19} \text{ fisiones} \end{aligned}$$

Para la probeta CIB

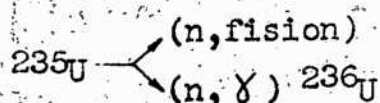
$$P_{\text{CIB}} = 3372,36 \text{ W}$$

$$E_{\text{CIB}} = 3372,36 \text{ W} \cdot 935 \text{ hs} \cdot 3600 \text{ seg/hs} = 1135,02 \cdot 10^7 \text{ joule}$$

$$\begin{aligned} \text{fisiones producidas} &= 1135,02 \cdot 10^7 \text{ joule} \cdot \frac{1 \text{ fision}}{28,8 \cdot 10^{-12} \text{ joule}} \\ &= 39,41 \cdot 10^{19} \text{ fisiones} \end{aligned}$$

Desaparición de ^{235}U

Reacciones



$$\sigma_{ab} = \sigma_c + \sigma_r$$

$$\frac{dN_{Z,A}}{dz} = -N_{Z,A} \int \sigma_{ab} \bar{\Phi} dE$$

$$N_{Z,A}(z) = N_{Z,A}(0) e^{-\int \int \sigma_{ab} \bar{\Phi} dE dz}$$

tomando un valor medio para $\bar{\Phi}$

$$N_{Z,A}(z) = N_{Z,A}(0) e^{-\sigma_{ab} \bar{\Phi} z}$$

$$\sigma_{ab} \text{ del } ^{235}\text{U} = 694 \cdot 10^{24} \text{cm}^2 \quad (1)$$

$$z = 3366 \cdot 10^3 \text{seg}$$

$$\bar{\Phi}_{CIA} = 0,252 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{seg}$$

$$\bar{\Phi}_{CIB} = 0,268 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{seg}$$

para CIA

$$[N_{2,5}]_{CIA} = [N_{2,5}(0)]_{CIA} e^{-(0,252 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2 \text{seg} \cdot 694 \text{ cm}^2 \cdot 10^{24} \cdot 3366 \cdot 10^3)}$$

$$[N_{2,5}(0)]_{CIA} = 83,4 \text{ g} \cdot \frac{238 \text{ g} \cdot 1 \text{ atgU}}{270 \text{ g}} \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at}}{238 \text{ g}} \cdot 0,04$$

$$[N_{2,5}(0)]_{CIA} = 74,2 \cdot 10^{20} \text{ at}$$

$$[N_{2,5}(z)]_{CIA} = 74,2 \cdot 10^{20} \cdot e^{-588 \cdot 10^4} \text{ at}$$

$$[N_{2,5}(z)]_{CIA} = 70,89 \cdot 10^{20} \text{ at}$$

$$\begin{aligned} \text{átomos de } ^{235}\text{U} \text{ consumidos} &= [N_{2,5}(0)]_{CIA} - [N_{2,5}(z)]_{CIA} \\ &= 3,31 \cdot 10^{20} \text{ at} \end{aligned}$$

$$\text{átomos fisionados} = \frac{V_f}{V_{ab}} \cdot \text{átomos consumidos}$$

$$\frac{583.3}{694} \cdot 1.10^{20} \text{ at} = 27,84.10^{19} \text{ at}$$

$$\text{átomos de } ^{235}\text{U fisionados} = 27,84.10^{19} \text{ at}$$

$$\text{fisiones debidas al } ^{239}\text{Pu}$$

$$\text{at. de Pu fisionados} = n^{\circ} \text{ de fisiones totales} - n^{\circ} \text{ at. } ^{235}\text{U fisionados}$$

$$= 36,64.10^{19} \text{ at} - 27,84.10^{19}$$

$$= 8,8.10^{19} \text{ at. de } ^{239}\text{Pu}$$

para CIB

$$[N_{2,5}]_{CIB} = [N_{2,5(0)}]_{CIB} \cdot e^{-626.10^4}$$

$$[N_{2,5(0)}]_{CIB} = 24,3125 \text{ g.} \cdot \frac{238 \text{ g.}}{270 \text{ g.}} \cdot \frac{\text{atgU}}{238 \text{ g.}} \cdot 6,02.10^{23} \frac{\text{at}}{\text{atgU}} \cdot 0,04$$

$$[N_{2,5(0)}]_{CIB} = 75,03.10^{20} \text{ at.}$$

$$[N_{2,5}]_{CIB} = 75,03.10^{20} \cdot e^{-626.10^4} \text{ at.} = 70,447.10^{20} \text{ at.}$$

$$\begin{aligned} \text{at. de } ^{235}\text{U consumidos} &= [N_{2,5(0)}]_{CIB} - [N_{2,5}]_{CIB} \\ &= 75,03.10^{20} - 70,447.10^{20} \\ &= 4,583.10^{20} \text{ at.} \end{aligned}$$

$$\text{at. de } ^{235}\text{U fisionados} = \frac{V_f}{V_{ab}} \cdot \text{at de } ^{235}\text{U consumidos}$$

$$= 0,84.4,583.10^{20} \text{ at}$$

$$= 38,5.10^{19} \text{ at}$$

numero de fisiones debidas al Pu

nº de fisiones totales - nº de fisiones del ^{235}U

$$39,41 \cdot 10^{19} - 38,5 \cdot 10^{19} = 0,91 \cdot 10^{19} \text{ fisiones}$$

Apéndice 3

Volumen disponible para gases

$$V_{disp.} = V_{barra} - V_{past}$$

volumen libre de la barra

$$V_b = V_{cg} + V_{conex} + V_{int} + V_{cg-t}$$

$$V_{cg} = \pi \frac{\phi_{cg}^2}{4} h_{cg}$$

$$V_{cgCIA} = 3,75^2 \cdot 3,5 \text{ mm}^3 = 154,5 \text{ mm}^3$$

$$V_{cgCIB} = V_{cgCIA}$$

$$V_{conex} = \pi \cdot r_{conex}^2 \cdot h_{conex}$$

$$V_{conexCIA} = V_{conexCIB} = 0,7^2 \cdot 1,5 \text{ mm}^3 = 2,31 \text{ mm}^3$$

$$V_{int} = \pi \frac{\phi_i^2}{4} \cdot a$$

$$V_{intCIA} = \pi \cdot 28,09 \cdot 96,9 \text{ mm}^3 = 8550 \text{ mm}^3$$

$$V_{intCIB} = \pi \cdot 28,09 \cdot 96,5 \text{ mm}^3 = 8520 \text{ mm}^3$$

$$V_{cg-t} = \pi \frac{\phi_c^2}{4} \cdot c$$

$$V_{cg-tCIA} = \pi \cdot 28,09 \cdot 3,1 \text{ mm}^3 = 264 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{cgt CIB}} = \pi \cdot 28,09 \cdot 3,5 \text{ mm}^3 = 308 \text{ mm}^3$$

$$V_{1b\text{CIA}} = 9070,81 \text{ mm}^3$$

$$V_{1b_{\text{cra}}} = 9084,81 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{past}} = \frac{m_{\text{past}}}{\delta_{\text{past}}}$$

$$V_{\text{pastCIA}} = \frac{83,4 \text{ g}}{9,98 \text{ g/cm}^3} = 8,3567 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{pastCIB}} = \frac{84,3125 \text{ g}}{10,4 \text{ g/cm}^3} = 8,1069 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{disp CIA}} = 9070,81 - 8356,7 = 714,11 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{dispCIB}} = 9084,81 - 8106,9 = 977,91 \text{ mm}^3$$

Volumen de He en condiciones normales a $T=0$

$$V_{\text{He}} = \frac{273}{300} \cdot V_{\text{disp}}$$

$$V_{\text{He CIA}} = 649 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{He CIB}} = 889 \text{ mm}^3$$

moles iniciales

$$\text{CIA} \quad 0,289 \cdot 10^{-4} \text{ moles}$$

$$\text{CIB} \quad 0,397 \cdot 10^{-4} \text{ moles}$$

Cálculo de la cantidad generada y del volumen liberado de gases de fisión

Probeta CIA

Gases debidos a fisiones del ^{235}U

En base a los rendimientos de fisión del ^{235}U (3) se pueden establecer las siguientes relaciones:

$$\frac{\text{at de Kr estables}}{\text{at de } ^{85}\text{Kr}} = 11,99$$

$$\frac{\text{at de Xe estables}}{\text{at de Kr estables}} = 6,069$$

at de Kr estables

$$\frac{\text{at de Xe estables}}{\text{at de } ^{85}\text{Kr}} = 72,77$$

• N° de at. de ^{85}Kr producidos

$$0,063 \frac{\text{at } ^{85}\text{Kr}}{\text{fisión}} \cdot 27,838 \cdot 10^{19} \text{ fisiones} = 8,35 \cdot 10^{17} \text{ at}$$

• N° de átomos de ^{85}Kr liberados

$$\text{at. de } ^{85}\text{Kr} \text{ totales} = 5,41 \cdot 10^{15} \text{ at (por análisis)}$$

$$5,41 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot \frac{\text{n° de fisiones } ^{235}\text{U}}{\text{n° de fisiones totales}}$$

$$5,41 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot \frac{27,838}{36,64} = 4,11 \cdot 10^{15} \text{ at de } ^{85}\text{Kr del } ^{235}\text{U}$$

.At. de Kr estable liberados

at. de Kr estables. at. de ^{85}Kr liberados
at. de ^{85}Kr

$$11,99.5,41.10^{15} \text{ at. } \frac{27,838}{36,64} = 49,28.10^{15} \text{ at.}$$

.Nº de at. de Kr liberados

(nº at. ^{85}Kr + nº at Kr estable) liberados =

$$4,11.10^{15} + 49,28.10^{15} = 53,39.10^{15} \text{ at}$$

.Nº total de at. Kr producidos por el ^{235}U

rendimiento = 0,0395 at/ fision (3)

$$0,0395 \text{ at/fision. } 27,838.10^{19} \text{ fisiones} = 1099,6.10^{16} \text{ at}$$

.Nº de at. de Xe estables producidos

rendimiento = 0,2183 at/fision

$$0,2183 \text{ at/fision. } 27,838.10^{19} \text{ fisiones} = 748.10^{17} \text{ at}$$

.Nº de at. de Xe estables liberados

at. de Xe estables at de Xe estables. at de Kr liberados
at. de Kr estables

$$6,07. 49,28. 10^{15} \text{ at.} = 299,13.10^{15} \text{ at}$$

.Nº de at. de ^{135}Xe liberados

rendimiento = 0,0504 at/fision

$$\frac{\text{at. de } ^{135}\text{Xe}}{\text{at. de Xe estables}} = 0,205$$

at. de Xe estables

$$\text{nº de at. de } ^{135}\text{Xe liberados} = 0,205.299,13.10^{15} \text{ at.}$$

$$= 61,33.10^{15} \text{ at.}$$

Nº de at de ^{135}Xe producidos

$$0,0504 \text{ at/fisión} \cdot 27,833 \cdot 10^{19} \text{ fisiones} = 140,3 \cdot 10^{17} \text{ at}$$

Nº at de Xe liberados

$$(\text{nº at de } ^{135}\text{Xe} + \text{nº de at de Xe estables})_{\text{liberados}} =$$

$$= 61,33 \cdot 10^{15} \text{ at} + 299,13 \cdot 10^{15} \text{ at} = 360,46 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

. % de liberación de gas debido al U

$$\text{nº at de Kr y Xe producidos} (\text{nº at de Xe} + \text{nº at de Kr})_{\text{prod}}$$

$$748 \cdot 10^{17} \text{ at} + 109,96 \cdot 10^{17} = 857,96 \cdot 10^{17} \text{ at}$$

$$\text{nº at de Xe y Kr liberados} = (\text{nº at de Xe} + \text{nº at Kr})_{\text{liberados}}$$

$$= 360,46 \cdot 10^{15} \text{ at} + 61,33 \cdot 10^{15} \text{ at} = 421,79 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

$$\% \text{ de liberación} = \frac{\text{nº at liberados} \cdot 10^2}{\text{nº at producidos}}$$

$$= 0,482$$

. Volumen de Kr estable liberado (CN)

$$\frac{49,23 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 1,987 \text{ mm}^3$$

Volumen de Xe estable liberado (CN)

$$\frac{299,13 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 11,132 \text{ mm}^3$$

. Volumen total (Kr + Xe) liberado en (CN) 15,399 mm³

Gases debidos al Pu

Segun los rendimientos de fision correspondientes (3):

$$\frac{\text{at. de Kr estables}}{\text{at de } ^{85}\text{Kr}} = 11,62$$

$$\frac{\text{at. de Xe estables}}{\text{at. de Kr estables}} = 10,40$$

$$\frac{\text{at. de Xe estables}}{\text{at. de } ^{85}\text{Kr}} = 178,461$$

.Nº at de ^{85}Kr producidos

$$0,0013.\text{at/fision}.8,802.10^{19}\text{fisiones} = 11,47.10^{16}\text{at}$$

.Nº at de Kr estables liberados

$$\text{at. de } ^{85}\text{Kr liberados totales} = 5,41.10^{15}\text{at. (2)}$$

$$\frac{\text{at. de Kr est. fisiones Pu}}{\text{at } ^{85}\text{Kr}} = \frac{5,41.10^{15}\text{at}}{\text{fis. tot.}} = 15,1.10^{15}\text{at}$$

.Nº total de at. de Kr liberados

$$15,14.10^{15} + 5,41.10^{15} \frac{\text{fisiones Pu}}{\text{fis. totales}} = 16,4 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

.Nº total de at. de Kr producidos

$$\text{rendimiento} = 0,0164 \text{ at/fision}$$

$$0,0164.\text{fisiones Pu} = 0,0164.8,802.10^{19} \text{ Fisiones.at/fision} \\ = 14,43.10^{17} \text{ at}$$

.Nº at estables de Xe liberados

$$\frac{\text{at. de Xe est. at de Kr est, liberados}}{\text{at de Kr est.}} =$$

$$10,4.15,14.10^{15} \text{at} = 290,92.10^{15} \text{at}$$

.Nº at. de Xe producidos

$$\text{rendimiento} = 0,2311 \text{ at/fision}$$

$$0,2311 \text{ at/fision} \cdot \text{fisiones Pu} = 0,2311 \cdot 8,802 \cdot 10^{19} \text{at} \\ = 203,9 \cdot 10^{17} \text{at}$$

.Nº at de ^{135}Xe liberados

$$\text{rendimiento} = 0,058 \text{ at/fision}$$

$$\frac{\text{at. de } ^{135}\text{Xe}}{\text{at est. de Xe}} = 0,251$$

$$n^\circ \text{ at } ^{135}\text{liberados} = 0,251 \cdot n^\circ \text{at. de Xe est. liberados} \\ = 0,251 \cdot 232,55 \cdot 10^{15} \text{at.} = 53,37 \cdot 10^{15} \text{at.}$$

.Nº at. de ^{135}Xe producidos

$$0,058 \text{ at/fision} \cdot \text{fisiones Pu} = 0,058 \cdot 8,802 \cdot 10^{19} \text{at.} \\ = 51,38 \cdot 10^{17} \text{at.}$$

.Nº total de at. de Xe producidos

$$(n^\circ \text{ at Xe est.} + n^\circ \text{ at. } ^{135}\text{Xe})_{\text{prod.}} = \\ = 254,47 \cdot 10^{17} \text{at.} + 51,38 \cdot 10^{17} \text{at.} = 254,98 \cdot 10^{17} \text{at.}$$

.Nº total de at. de Xe liberados

$$(n^\circ \text{ at. Xe est} + n^\circ \text{at. } ^{135}\text{Xe})_{\text{lib.}} =$$

$$= 232,5 \cdot 10^{15} \text{at.} + 58,37 \cdot 10^{15} \text{at.} = 290,92 \cdot 10^{15} \text{at.}$$

. % de liberación total (Kr+Xe) debido al Pu

$$n^\circ \text{ at. totales producidos} = n^\circ \text{ at. totales Xe} + n^\circ \text{ at tot. Kr}$$

$$254,98 \cdot 10^{17} \text{at} + 14,47 \cdot 10^{17} \text{at.} = 269,45 \cdot 10^{17} \text{at.}$$

$$\begin{aligned}
 n^{\circ} \text{ at. totales liberados} &= n^{\circ} \text{ at de Xe} + n^{\circ} \text{ at de Kr} \\
 &= 290,92 \cdot 10^{15} \text{ at} + 16,44 \cdot 10^{15} \text{ at.} \\
 &= 307,32 \cdot 10^{15} \text{ at.}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\text{at. liberados} \cdot 10^2}{\text{at. producidos}} = 1,141 \%$$

.Volumen de Kr est. liberado en CN

$$\text{Vol} = \frac{15,10 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 0,563 \text{ mm}^3$$

.Volumen total de Kr liberado en CN

$$\text{Vol} = \frac{16,40 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 0,610 \text{ mm}^3$$

.Volumen Xe estable liberado en CN

$$\text{Vol} = \frac{232,5 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 8,653 \text{ mm}^3$$

.Volumen total (Kr+Xe) liberado en CN

$$11,435 \text{ mm}^3$$

. % de liberación total de gas (Kr+Xe) proveniente de fisio-
nes de U y Pu

$$\begin{aligned}
 n^{\circ} \text{ at. tot. lib.} &= n^{\circ} \text{ tot. (Kr+Xe)}_{\text{U}} + n^{\circ} \text{ tot. (Kr+Xe)}_{\text{Pu}} \\
 &= 413,85 \cdot 10^{15} \text{ at.} + 307,32 \cdot 10^{15} \text{ at.} \\
 &= 721,07 \cdot 10^{15} \text{ at.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n^{\circ} \text{ at. tot. prod.} &= n^{\circ} \text{ at (Kr+Xe)}_{\text{U}} \text{ prod.} + n^{\circ} \text{ tot. (Kr+Xe)}_{\text{Pu}} \\
 &= 857,96 \cdot 10^{17} \text{ at.} + 269,41 \cdot 10^{17} \text{ at.} = 1127,37 \cdot 10^{17} \text{ at}
 \end{aligned}$$

$$\frac{n^{\circ} \text{ at liberados} \cdot 10^2}{n^{\circ} \text{ at producidos}} = 0,639$$

.Volumen de Kr liberado debido a U y Pu en CN

$$2,598 \text{ mm}^3$$

.Volumen de Xe liberado debido a U y Pu en CN

$$24,237 \text{ mm}^3$$

.Volumen total de gases de fisión liberados debidos al U y Pu en CN

$$26,8305 \text{ mm}^3$$

Probeta CIB

Gases debidos a fisiones de U

.Nº at. de Kr est. liberados

$$\text{Vol. de Xe est. lib.} = 0,6 \text{ mm}^3$$

$$\frac{0,6 \cdot 10^3 \text{ cm}^3}{22400 \text{ cm}^3/\text{atg}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg} = 2,31 \cdot 10^{17} \text{ at de Xe}$$

$$2,31 \cdot 10^{17} \text{ at Xe} \cdot \frac{\text{at. Kr est.} \cdot \text{fisiones } ^{235}\text{U}}{\text{at Xe est. fis. tot.}} =$$

$$= 2,31 \cdot 10^{17} \text{ at} \cdot \frac{1}{6,0} \cdot \frac{38,5}{39,43} = 37,16 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

.Nº at. de ^{85}Kr liberados

$$\text{at. Xe est.} \cdot \frac{\text{at. } ^{85}\text{Kr}}{\text{at Xe est.}} = 2,31 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot \frac{1}{72,7} = 3,17 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

.Nº at. ^{135}Xe liberados

$$\text{rendimiento} = 0,0504$$

$$\frac{\text{at. } ^{135}\text{Xe}}{\text{at Xe est.}} = 0,205$$

$$0,205 \cdot \text{at. Xe tot.} \cdot \frac{\text{fisiones U}}{\text{fis. tot.}} =$$

$$0,205.231.10^{15} \cdot \frac{38,5}{39,43} = 46,24.10^{15} \text{ at.}$$

.Nº at. de Kr producidos

$$\text{rendimiento} = 0,0395 \text{ at/fision}$$

$$0,0395 \text{ at/fision} \cdot \text{fisiones U} = 0,0395.38,5.10^{19} = 1520,75.10^{16} \text{ at}$$

.At. totales de Kr liberados

$$\begin{aligned} (\text{at. } ^{85}\text{Kr} + \text{at. Kr est.})_{\text{lib.}} &= 3,17.10^{15} + 37,16.10^{15} \\ &= 40,33.10^{15} \text{ at.} \end{aligned}$$

.Total de at. de Xe liberados

$$\begin{aligned} (\text{at. } ^{135}\text{Xe} + \text{at. Xe est.})_{\text{lib.}} &= \\ &= 46,24.10^{15} \text{ at} + \frac{38,5 \cdot 2,31.10^{15}}{39,4} \text{ at} = 272,9.10^{15} \text{ at} \end{aligned}$$

.Total de at. de Xe producidos

$$\text{rendimiento} = 0,2687 \text{ at/fision}$$

$$38,5.10^{19} \text{ fisiones} \cdot 0,2687 \text{ at/fision} = 1068,16.10^{17} \text{ at.}$$

.Liberación de (Kr+Xe) provenientes del U

$$(\text{at. Xe} + \text{at. Kr})_{\text{lib.}} = 272,9.10^{15} + 40,33.10^{15} = 313,23.10^{15} \text{ at}$$

.At. de (Kr+Xe) debidos a fisiones de U

$$\begin{aligned} (\text{at. Kr} + \text{at. Xe})_{\text{prod.}} &= 1068,16.10^{17} + 152,08.10^{17} \\ &= 1210,24.10^{17} \text{ at.} \end{aligned}$$

.% de liberación

$$\frac{\text{nº at liberados} \cdot 10^2}{\text{nº at. producidos}} = 0,2588$$

.Volumen de Kr estable liberado, en CN

$$\frac{37,16 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 1,382 \text{ mm}^3$$

Volumen de Kr total liberado, en CN

$$\frac{40,33 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 1,5 \text{ mm}^3$$

Volumen de Xe estable liberado, en CN

$$\frac{226,66 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 8,392 \text{ mm}^3$$

Volumen de (Kr + Xe) total liberado, en CN

$$\frac{313,23 \cdot 10^{15} \text{ at} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 11,655 \text{ mm}^3$$

Gases debidos al Pu producido

$$8,6 \text{ mm}^3 \text{ de Xe liberado (por análisis)} \Rightarrow 2,31 \cdot 10^{17} \text{ at de Xe}$$

At. de Xe debidos al Pu

$$2,31 \cdot 10^{17} \text{ at} \cdot \frac{\text{fisiones Pu}}{\text{fis. totales}}$$

At de Kr estables liberados

$$2,31 \cdot 10^{17} \text{ at} \cdot \frac{\text{fisiones Pu. at de Kr est.}}{\text{fis. totales at de Xe}}$$

$$2,31 \cdot 10^{17} \cdot \frac{0,932}{39,43} \cdot \frac{1}{19,21} = 0,355 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

At de ^{85}Kr liberados

$$2,31 \cdot 10^{17} \text{ at} \cdot \frac{\text{fisiones Pu. at. } ^{85}\text{Kr}}{\text{fis. totales at Xe}}$$

$$2,31 \cdot 10^{17} \text{ at} \cdot \frac{0,932}{39,432} \cdot \frac{1}{178,46} = 0,031 \cdot 10^{15} \text{ a}$$

At. de ^{135}Xe liberados

rendimiento = 0,038 at/fisión

$$\frac{\text{at. } ^{135}\text{Xe}}{\text{at. est Xe}} = 0,251$$

$$\frac{\text{at } ^{135}\text{Xe}}{\text{at Xe est.}} \cdot \text{at Xe est.} \cdot \frac{\text{fisiones Pu}}{\text{fis. tot.}} = \text{at } ^{135}\text{Xe liberados}$$

$$0,251 \cdot 231 \cdot 10^{17} \cdot \frac{0,932}{39,43} = 1,37 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

At. de Kr producidos

rendimiento = 0,0164 at/fisión

$$0,0164 \text{ at/fisión} \cdot \text{Fisiones Pu} = 1,53 \cdot 10^{17} \text{ at}$$

At. totales de Kr liberados

$$(\text{at } ^{85}\text{Kr} + \text{at Kr est.})_{\text{lib.}} = 0,031 \cdot 10^{15} \text{ at} + 0,355 \cdot 10^{15} \text{ at} \\ = 0,386 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

At. de Xe liberados

$$\text{at. } ^{135}\text{Xe lib.} + 2,31 \cdot 10^{17} \text{ at.} \cdot \frac{\text{fisiones Pu}}{\text{fis. tot.}} = \\ = 1,37 \cdot 10^{15} \text{ at} + 5,46 \cdot 10^{15} \text{ at} = 6,83 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

At. de Xe producidos

$$0,2891 \cdot \text{Fisiones Pu} = 26,88 \cdot 10^{17} \text{ at de Xe}$$

Liberación de (Kr+Xe)

$$(\text{at Kr} + \text{at Xe})_{\text{lib}} = 0,386 \cdot 10^{15} \text{ at} + 6,83 \cdot 10^{15} \text{ at} \\ = 7,21 \cdot 10^{15} \text{ at}$$

Producción de at. (Kr+Xe)

$$\begin{aligned} \text{(at de Kr + at de Xe)}_{\text{prod.}} &= 1,53 \cdot 10^{17} \text{ at.} + 26,85 \cdot 10^{17} \text{ at} \\ &= 28,38 \cdot 10^{17} \text{ at} \end{aligned}$$

• % de liberación

$$\frac{n^{\circ} \text{ at. liberados} \cdot 10^2}{n^{\circ} \text{ at. producidos}} = 0,254$$

• Volumen de Kr estable liberado, en CN

$$\frac{0,355 \cdot 10^{15} \text{ at.} \cdot 22400 \text{ cm}^3 / \text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 0,013 \text{ mm}^3$$

• Volumen de Kr total liberado, en CN

$$\frac{0,386 \cdot 10^{15} \text{ at.} \cdot 22400 \text{ cm}^3 / \text{atg}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 0,014 \text{ mm}^3$$

• Volumen Xe estable liberado, en CN

$$\frac{5,46 \cdot 10^{15} \text{ at.} \cdot 22400 \text{ cm}^3 / \text{atg}}{6,06 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 0,203 \text{ mm}^3$$

• Volumen de (Kr + Xe) liberado, en CN

$$\frac{7,21 \cdot 10^{15} \text{ at.} \cdot 22400 \text{ cm}^3 / \text{atg}}{6,06 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} = 0,268 \text{ mm}^3$$

• Liberación total de (Kr + Xe) debidos a U y Pu

$$\begin{aligned} \text{at(Kr + Xe)}_U + \text{at(Kr + Xe)}_{\text{Pu lib.}} &= \\ = 313,23 \cdot 10^{15} \text{ at} + 7,21 \cdot 10^{15} \text{ at} &= 320,48 \cdot 10^{15} \text{ at} \end{aligned}$$

• Producción total de Kr y Xe debida a U y Pu

$$\begin{aligned} \text{at (Kr + Xe)}_U + \text{at (Kr + Xe)}_{\text{Pu prod.}} &= \\ 1210,24 \cdot 10^{17} \text{ at} + 28,38 \cdot 10^{17} \text{ at} &= 1238,62 \cdot 10^{17} \text{ at} \end{aligned}$$

• % de liberación total

$$\frac{n^{\circ} \text{ at. totales liberados} \cdot 10^2}{n^{\circ} \text{ at. totales producidos}} = 0,259$$

Volumen total de Kr liberado, en CN

$$1,5 \text{ mm}^3 + 0,014 \text{ mm}^3 = 1,515 \text{ mm}^3$$

Volumen total de Xe liberado, en CN

$$\frac{279,73 \cdot 10^{15} \text{ at}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ at/atg}} \cdot 22400 \text{ cm}^3/\text{atg} = 10,408 \text{ mm}^3$$

Volumen total de gas liberado (Kr + Xe), en CN

$$1,515 \text{ mm}^3 + 10,408 \text{ mm}^3 = 11,9249 \text{ mm}^3$$

A los efectos de simplificar los cálculos que anteceden, se consideró como únicos isótopos fisibles presentes al ^{235}U y al ^{239}Pu