

CNEA AC-15/75

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

CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

GENERACION DE RADIONUCLEIDOS EN LA OPERACION
DE UNA CENTRAL NUCLEAR

E. Díaz

Buenos Aires-Argentina
1975

1. Introducción.
2. Productos de fisión.
Inventario radioactivo del núcleo.
3. Productos de activación del medio refrigerante.
4. Productos de activación de los materiales estructurales
(productos de corrosión).
5. Productos de activación del aire de refrigeración del reactor.

1. INTRODUCCION

Durante la operación de una central nuclear del tipo de agua pesada y uranio natural, tal como la C.N.A. se generan una serie de radionucleídos que, debido a la naturaleza del proceso de formación y su origen, se dividen clásicamente en:

- a) Productos de fisión.
- b) Productos de activación del medio refrigerante.
- c) Productos de activación de los materiales estructurales.
- d) Productos de activación del aire que refrigera o circunda al reactor.

1.a. Productos de fisión

Es sabido que durante la fisión del U-235, se generan elementos de número másico menor y cuya abundancia es mayor para valores de A entre 80 y 110 y de 125 a 155 (ver Fig. 1). Estos elementos son β - radioactivos y se desintegran hasta alcanzar el elemento estable dentro de su cadena. En estas desintegraciones, en muchas de ellas, el exceso de energía para cada estado se manifiesta también con emisión de rayos γ . Debido al hecho de que estos productos de fisión son radioactivos, resulta importante desde el punto de vista de la seguridad radiológica y nuclear considerar el inventario de los mismos, pues si bien los mencionados productos se encuentran confinados dentro de los elementos combustibles, un daño en los mismos producirá su incorporación al medio refrigerante. En caso de accidentes de magnitud, no solo pasarán al refrigerante, sino que también pueden alcanzar los edificios del reactor y aun salir al exterior del mismo.

1.b. Productos de activación del medio refrigerante

El agua pesada del medio refrigerante primario y moderador contiene deuterio y oxígeno como componentes (D_2O), sin embargo es necesario hacer notar que se encuentran también otros componentes, tales como:

H_2 como impureza del D_2O

O^{17} , O^{18} como isótopos del oxígeno

Na, como impurezas provenientes de las resinas del sistema de

limpieza

Li⁷ como aditivo para alcalinizar el medio primario

B como aditivo para el control de la reactividad

etc.

Con los elementos mencionados se producen reacciones nucleares ($n, p; n, \alpha; n, \gamma; d, p$) que dan lugar a elementos radioactivos que contribuyen al inventario radioactivo del refrigerante, revistiendo importancia radiológica en el caso de pérdidas por inestaqueidad de cañerías, válvulas, bombas, etc.

Los elementos más importantes producto de estas reacciones son el tritio (H^3) y el nitrógeno 16 (N^{16}). Este último importante aun sin que existan pérdidas de refrigerante, dado que la radiación γ que emite es de alta energía y posee un gran peso en el diseño de los blindajes de la planta.

1.c. Productos de activación de los materiales estructurales

El medio refrigerante produce sobre los materiales del circuito primario efectos de abrasión y corrosión. Como resultado aparecen en el medio refrigerante partículas del metal erosionado y en solución los óxidos metálicos correspondientes. Tanto los elementos particulares en suspensión como los óxidos en solución atraviesan la zona de flujo neutrónico produciéndose reacciones nucleares del tipo $n, \gamma; n, p$, que dan lugar a nucleídos radioactivos de importancia radiológica. En general predominan las reacciones n, γ por lo que el elemento blanco o reaccionante y el elemento producto constituyen la misma especie química. De acuerdo a los componentes de las aleaciones utilizadas en el circuito primario aparecerán los distintos productos de "corrosión". Entre los más comunes para este tipo de reactor pueden citarse el Fe-59, Co-58, Co-60, Mn-54, Cr-51, etc.

1.d. Productos de activación del aire

El más importante es el Argón 41 (Ar-41) formado por reacción n, γ con el Ar-40 del aire que circunda el recipiente del reactor.

NOMENCLATURA SECCION 2

$\phi \left[\frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}} \right]$: Flujo neutrónico

$\sigma_f \left[\text{cm}^2 \right]$: Sección eficaz de fisión

$N[\text{átomos}]$: Numero de átomos de material fisiónable

$\eta_1 [-]$: Rendimiento de fisión para el isótopo 1 que luego por decaimiento da el isótopo 2.

$\eta_2 [-]$: Rendimiento de fisión para el isótopo 2

$N_1[\text{átomos}]$: Numero de átomos del producto de fisión 1

$N_2[\text{átomos}]$: Numero de átomos del producto de fisión 2

$\lambda_1 \left[\frac{1}{\text{S}} \right]$: Constante de decaimiento del producto de fisión 1

$\lambda_2 \left[\frac{1}{\text{S}} \right]$: Constante de decaimiento del producto de fisión 2

$\sigma_1 \left[\text{cm}^2 \right]$: Sección eficaz de captura del nucleído 1

$\sigma_2 \left[\text{cm}^2 \right]$: Sección eficaz de captura del nucleído 2

$P \left[\text{MW} \right]$: Potencia térmica del reactor

2. PRODUCTOS DE FISION. INVENTARIO RADIOACTIVO DEL NUCLEO

Si se analiza una cadena de productos de fisión y se considera la misma constituida en promedio por dos nucleidos inestables y uno estable (Fig. 2), puede plantearse el balance de átomos de un determinado nucleido en función del tiempo.

La variación de la cantidad de átomos del nucleido 2 con el tiempo quedará expresada por la velocidad de generación por fisión de este nucleido $\eta_2 \sigma_f N \phi$ más el aporte producido por el decaimiento del nucleido 1, menos la velocidad de decaimiento del isótopo 2, menos la absorción del isótopo 2.

$$\frac{dN_2}{dt} = \eta_2 \sigma_f N \phi - \lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1 - \sigma_2 N_2 \phi \quad (1)$$

La producción del radionucleido 1 a su vez está dada por:

$$\frac{dN_1}{dt} = \eta_1 \sigma_f N \phi - \lambda_1 N_1 - \sigma_1 N_1 \phi \quad (2)$$

La solución de (2) es:

$$N_1(t) = \frac{\eta_1 N \sigma_f \phi}{\lambda_1 + \sigma_1 \phi} \cdot (1 - e^{-(\lambda_1 + \sigma_1 \phi)t}) \quad (4)$$

La ecuación (1) puede escribirse, teniendo en cuenta la (4):

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 + \sigma_2 N_2 \phi &= \eta_2 \sigma_f N \phi + \lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} + N_2 (\lambda_2 + \sigma_2 \phi) &= \eta_2 \sigma_f N \phi + \lambda_1 \frac{\eta_1 N \sigma_f \phi}{\lambda_1 + \sigma_1 \phi} \cdot (1 - e^{-(\lambda_1 + \sigma_1 \phi)t}) \end{aligned} \quad (5)$$

Llamando:

$$A = \lambda_2 + \sigma_2 \phi$$

$$B = \eta_2 \sigma_f N \phi$$

$$C = \frac{\lambda_1 \eta_1 \sigma_f \phi N}{\lambda_1 + \sigma_1 \phi}$$

$$D = \lambda_1 + \sigma_1 \phi$$

la (5) queda:

$$\frac{dN_2}{dt} + N_2 A = B + C - C e^{-Dt} \quad (6)$$

Resolviendo la (6) mediante transformada de Laplace:

$$p [N_2] + [N_2] A = (B + C) \frac{1}{p} - \frac{C}{p+D}$$

$$[N_2] (p+A) = (B + C) \frac{1}{p} - \frac{C}{p+D}$$

$$[N_2] = \frac{(B + C)}{(p + A)p} - \frac{C}{(p + D)(p + A)}$$

Separando en fracciones simples:

$$[N_2] = \frac{a}{p+A} + \frac{b}{p} + \frac{c}{p+D} + \frac{d}{p+A}$$

con

$$a = -\frac{B+C}{A}$$

$$b = \frac{B+C}{A}$$

$$c = \frac{C}{A-D}$$

$$d = \frac{C}{A-D}$$

$$\begin{aligned}
 [N_2] &= \frac{B+C}{A} e^{-\frac{1}{p}t} - \frac{B+C}{A} e^{-\frac{1}{p+A}t} - \frac{C}{A-D} e^{-\frac{1}{p+D}t} + \frac{C}{A-D} e^{-\frac{1}{p+A}t} \\
 &= \frac{B+C}{A} \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p+A} \right) + \frac{C}{A-D} \left(\frac{1}{p+A} - \frac{1}{p+D} \right)
 \end{aligned}$$

Antitransformando:

$$N_2(t) = \frac{B+C}{A} (1 - e^{-At}) + \frac{C}{A-D} (e^{-At} - e^{-Dt}) \quad (7)$$

Reemplazando los valores de A, B, C y D en la (7)

$$\begin{aligned}
 N_2(t) &= \left[\frac{\eta_2 \bar{\sigma}_f N \phi}{\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi} + \frac{\lambda_1 \eta_1 \bar{\sigma}_f \phi N}{(\lambda_1 + \bar{\sigma}_1 \phi)(\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi)} \right] (1 - e^{-(\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi)t}) + \\
 &+ \frac{\lambda_1 \eta_1 \bar{\sigma}_f \phi N}{[(\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi) - (\lambda_1 + \bar{\sigma}_1 \phi)](\lambda_1 + \bar{\sigma}_2 \phi)} (e^{-(\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi)t} - e^{-(\lambda_1 + \bar{\sigma}_1 \phi)t})
 \end{aligned}$$

Ordenando:

$$\begin{aligned}
 N_2(t) &= \frac{\lambda_1 \eta_1 N \bar{\sigma}_f \phi}{\lambda_1 + \bar{\sigma}_1 \phi} \left[\frac{1 - e^{-(\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi)t}}{\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi} + \frac{e^{-(\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi)t} - e^{-(\lambda_1 + \bar{\sigma}_1 \phi)t}}{\lambda_2 - \lambda_1 + \bar{\sigma}_2 \phi - \bar{\sigma}_1 \phi} \right] + \\
 &+ \frac{\eta_2 \bar{\sigma}_f N \phi}{\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi} (1 - e^{-(\lambda_2 + \bar{\sigma}_2 \phi)t}) \quad (8)
 \end{aligned}$$

La expresión (8) da entonces la concentración del radio-nucleído 2 en función del tiempo.

Estado de equilibrio

El estado de equilibrio se logra cuando

$$\frac{dN_2}{dt} = 0$$

$$N_2 (\lambda_2 + \sigma_2 \phi) = \eta_2 \sigma_f N \phi + \frac{\lambda_1 \eta_1 N \sigma_f \phi}{\lambda_1 + \sigma_1 \phi}$$

$$N_2 (\infty) = \frac{\eta_2 \sigma_f N \phi}{\lambda_2 + \sigma_2 \phi} + \frac{\lambda_1 \eta_1 N \sigma_f \phi}{(\lambda_1 + \sigma_1 \phi) (\lambda_2 + \sigma_2 \phi)}$$

$$N_2 (\infty) = \frac{\sigma_f N \phi}{\lambda_2 + \sigma_2 \phi} \left(\eta_2 + \frac{\lambda_1 \eta_1}{\lambda_1 + \sigma_1 \phi} \right) \quad (9)$$

η_2 se denomina a veces rendimiento directo de fisión para el radionucleído 2.

η_1 se denomina a veces rendimiento directo de fisión para el radionucleído 1.

$$\frac{\lambda_1 \eta_1}{\lambda_1 + \sigma_1 \phi} = \eta_{cy} = \text{rendimiento fraccional de la cadena (es la influencia por decaimiento del precursor).}$$

La (9) puede entonces escribirse:

$$N_2 (\infty) = \frac{\sigma_f N \phi}{(\lambda_2 + \phi \sigma_2)} (\eta_2 + \eta_{cy}) \quad (10)$$

$$\eta_{c2} = (\eta_2 + \eta_{cy})$$

se denomina rendimiento de fisión acumulado.

$$N_2(\infty) = \frac{\bar{\sigma}_f N \phi}{(\lambda_2 + \phi \bar{\sigma}_2)} \cdot \eta_{c2} \quad (11)$$

Los valores de η_c se encuentran en la bibliografía, pudiéndose citar "SUMMARY OF FISSION PRODUCT YIELDS FOR U²³⁵, U²³⁸, Pu²³⁹ AND P²⁴¹ AT THERMAL, FISSION SPECTRUM AND 14 MeV NEUTRON ENERGIES" M.E. MEEK, B.F. RIDER, General Electric Nucleonics Laboratory, APED-5398-A.

En muchos casos de radionucleídos de importancia radiológica $\lambda_2 \gg \phi \bar{\sigma}_2$ pudiéndose la (11) simplificarse:

$$N_2(\infty) \cong \frac{\bar{\sigma}_f N \phi}{\lambda_2} \eta_{c2} \quad (12)$$

La (12) puede expresarse en función de la potencia térmica P [MW]

$$A_2(\infty) \cong N_2 \lambda_2 = \bar{\sigma}_f N \phi \eta_{c2} \left(\frac{\text{desint.}}{\text{Seg.}} \right) \quad (13)$$

El término $\bar{\sigma}_f N \phi$ da el número de fisiones por segundo, las que pueden calcularse en base a la potencia térmica, sabiendo que

$$3,1 \times 10^{10} \frac{\text{fisiones}}{\text{seg.}} = 1 \text{ watt}$$

La (13) expresada en curies será:

$$A_2 [Ci] = P [MW] \times 3,1 \times 10^{10} \frac{\text{fisiones}}{\text{seg. W} \times 10^{-6} \frac{MW}{W}} \times \\ \times \eta_{c_2} [\%] \times 10^{-2} \times \frac{1}{3,7 \times 10^{10} \frac{\text{dis.}}{\text{seg ci}}}$$

$$A_2 [Ci] = 0,84 \times 10^4 \times P [MW] \times \eta_{c_2} [\%] \quad (14)$$

En la Tabla I se ha calculado el inventario de productos de fisión más importantes desde el punto de vista radiológico de la Central Nuclear en Atucha. Para los radionucleídos que alcanzan equilibrio para tiempos medios de irradiación típicos se ha utilizado la expresión (14); para aquellos nucleídos que no alcanzan equilibrio debería utilizarse la expresión (8), teniendo en cuenta que la actividad será:

$$A_2(t) = \frac{N_2(t) \lambda_2}{3,7 \times 10^{10}} [Ci]$$

Sin embargo, con el objeto de simplificar, se ha utilizado la (15):

$$A_2 [Ci] = 0,84 \times 10^4 \times P [MW] \times \eta_{c_2} (\%) (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (15)$$

con $P = 1100 \text{ MW}$.

NOMENCLATURA SECCION 3

$P \left[\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3} \right]$	: Densidad volumétrica del radionucleído formado por activación
$\phi \left[\frac{1}{\text{cm}^2\text{S}} \right]$	: Flujo neutrónico de activación
$\sigma [\text{cm}^2]$	: Sección eficaz de activación o de la reacción nuclear considerada
$N \left[\frac{\text{átomos}}{\text{m}^3} \right]$	: Número de átomos blancos por m^3
$\lambda [1/\text{s}]$	: Constante de decaimiento del radionucleído considerado
$t_i [\text{seg}]$	: Tiempo que insume en atravesar la zona de flujo un diferencial volumen del refrigerante
$t_c [\text{seg}]$	: Tiempo que insume el diferencial volumen en recorrer el circuito exterior del reactor
$A [\text{Ci}/\text{m}^3]$	: Actividad específica del radionucleído considerado
Subíndices	
R y M	: Refrigerante y moderador respectivamente

3. PRODUCTOS DE ACTIVACION DEL MEDIO REFRIGERANTE

Para efectuar un primer análisis del problema se considerará un modelo simplificado como el de la fig. 3. El medio refrigerante evoluciona en el circuito con una cantidad N de átomos por unidad de volumen de un elemento blanco determinado (por ejemplo deuterio u oxígeno 16). La sección eficaz de captura (reacción n, γ o n, p) será σ , el flujo neutrónico al cual se ve expuesto el refrigerante dentro del reactor es ϕ y el tiempo de irradiación por vuelta es $t_i - t_c$ es el tiempo en que un elemento de volumen del refrigerante se encuentra fuera de la acción del flujo neutrónico. Llamando P [átomos/m³] a la densidad volumétrica de átomos que se forman por la reacción neutrónica considerada, se tiene:

$$\frac{dP}{dt} = \phi \sigma N - \lambda P \quad (1)$$

Siendo λ la constante de decaimiento del radionucleído formado. Resolviendo la ecuación diferencial (1) mediante la transformación de Laplace:

$$pL[P] - P(0) + \lambda L[P] = \frac{\phi \sigma N}{p}$$

$$L[P] = \frac{\phi \sigma N}{p(p + \lambda)} + \frac{P(0)}{(p + \lambda)}$$

$$\therefore P(t) = \frac{\phi \sigma N}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + P(0) e^{-\lambda t} \quad (2)$$

sabiendo que:

$$P(t) = P_2 \quad \text{cuando} \quad t = t_i$$

y $P(0) = P_1 e^{-\lambda t_c}$ (3) pues en régimen estacionario $P_1 = P(0)$ en el circuito n , es igual al valor de $P(0)$ en $n-1$ (ver fig.4).
Reemplazando (3) en (2):

$$P_2 = \frac{\phi \sigma N}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) + P_2 e^{-\lambda t_c} e^{-\lambda t_i}$$

$$\therefore P_2 = \frac{\sigma \phi N (1 - e^{-\lambda t_i})}{\lambda (1 - e^{-\lambda (t_c + t_i)})} \quad (4)$$

La expresión (4) da la densidad de átomos formados por activación en régimen estacionario, para un determinado radio-nucleído a la salida del reactor, mientras que a la entrada se tendrá:

$$P_1 = P_2 e^{-\lambda t_c} = \frac{\sigma \phi N (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_c}}{\lambda (1 - e^{-\lambda (t_c + t_i)})} \quad (5)$$

La actividad expresada en Ci/m³ para los mismos puntos estará dada por:

$$A_2 = \frac{\lambda P_2}{3.7 \times 10^{10}} = \frac{\sigma N \phi (1 - e^{-\lambda t_i})}{3.7 \times 10^{10} (1 - e^{-\lambda (t_i + t_c)})} \quad (6)$$

$$A_1 = \frac{N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_c}}{3.7 \times 10^{10} (1 - e^{-\lambda (t_i + t_c)})} \quad (7)$$

Las expresiones (6) y (7) pueden simplificarse si se cumple que:

$$\lambda (t_i + t_c) \ll 1$$

$$1 - e^{-\lambda (t_i + t_c)} \cong \lambda (t_i + t_c)$$

$$A_2(\infty) = \frac{N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i})}{3.7 \times 10^{10} \times \lambda (t_i + t_c)} \quad (8)$$

$$A_1(\infty) = \frac{N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_c}}{3.7 \times 10^{10} \times \lambda (t_i + t_c)} \quad (9)$$

Se ha denotado a A_1 y A_2 con el símbolo ∞ para significar concentración de actividad en régimen estacionario.

Cuando el radionucleído considerado posee un semiperíodo largo, tal el caso del tritio, interesa también conocer las funciones $A_1(t)$ y $A_2(t)$. Si se resuelve en forma completa la ecuación (1) se tiene:

$$A_1(t) = \frac{N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_c}}{3.7 \times 10^{10} (1 - e^{-\lambda (t_i + t_c)})} \quad (10)$$

$$A_2(t) = \frac{N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) (1 - e^{-\lambda t})}{3.7 \times 10^{10} (1 - e^{-\lambda (t_i + t_c)})} \quad (11)$$

que también pueden simplificarse si:

$$\lambda (t_i + t_c) \ll 1$$

$$A_1(t) \cong \frac{N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t_c}}{3.7 \times 10^{10} [\lambda (t_i + t_c)]} \quad (12)$$

$$A_2(t) \cong \frac{N \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) (1 - e^{-\lambda t})}{3.7 \times 10^{10} [\lambda (t_i + t_c)]} \quad (13)$$

Con las expresiones (12) y (13) puede calcularse la evolución de la concentración de tritio en el refrigerante a lo largo del tiempo. Debido al pequeño valor de t_c (del orden de los segundos) frente al valor de $T_{\frac{1}{2}}$ del tritio (12 años), los valores de A_1 y A_2 son coincidentes. En otras palabras, la activación del deuterio (tritio) no decae en el circuito exterior al reactor.

Esto en cambio no será cierto para el nitrógeno 16 cuyo

semiperíodo es de 7,6 segundos, debiendo aplicarse las expresiones (10) y (11).

Podrían aplicarse ahora las expresiones antes mencionadas (en general 10 y 11, para equilibrio las 6 y 7), pero esto sería válido para un reactor que responda al modelo simple de la fig. 3, es decir para un reactor PWR de recipiente simple. El caso de la C.N.A. es mucho más complejo pues consta ^{además} de un circuito moderador y de un recipiente con moderador, tal la fig. 5 y el modelo correspondiente de la fig. 6.

Para el caso del tritio interesa calcular el valor de concentración cuando ésta alcance el estado de equilibrio, pues ese será el caso más desfavorable (en lo que a tritio respecta) en accidentes que impliquen derrame de D₂O.

A título ilustrativo se calcula con el modelo de la fig. 6 esta concentración de equilibrio, suponiendo que originalmente los circuitos del moderador y del refrigerante son independientes, y luego de alcanzados ambos equilibrios, se produce la mezcla.

Los datos necesarios se dan a continuación:

$$N \text{ (átomos de D}_2\text{/kgD}_2\text{O)} = 6,02 \times 10^{25}$$

$$\phi_R \approx \phi_M = 2 \times 10^{14} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{seg}}$$

$$\sigma_R = 3,29 \times 10^{-28} \text{ cm}^2$$

$$\sigma_M = 3,65 \times 10^{-28} \text{ cm}^2$$

$$t_{iR} = 1 \text{ seg}$$

$$t_{cR} = 13 \text{ seg}$$

$$t_{iM} = 283 \text{ seg}$$

$$t_{cM} = 310 \text{ seg}$$

Aplicando la expresión (13) para equilibrio:

$$A_2(\infty) \approx \frac{N \sigma_0 \lambda t_i}{3,7 \times 10^{10} \lambda (t_i + t_c)}$$

se tiene

$$A_{2R}(\infty) = \frac{6,02 \times 10^{25} \times 3,29 \times 10^{-28} \times 2 \times 10^{14} \times 1}{3,7 \times 10^{10} \times 14} = 7,65 \text{ Ci/kg}$$

$$A_{2M}(\infty) = \frac{6,02 \times 10^{25} \times 3,65 \times 10^{-28} \times 2 \times 10^{14} \times 283}{3,7 \times 10^{10} \times 593} = 56,68 \frac{\text{Ci}}{\text{Kg}}$$

Aplicando la regla de mezclas, sabiendo que las masas del moderador y refrigerante son:

$$M_R = 117.900 \text{ Kg}$$

$$M_M = 152.100 \text{ Kg}$$

$$A_2(\infty) = \frac{A_{2R}(\infty) \times M_R + A_{2M}(\infty) \times M_M}{M_M + M_R}$$

$$= \frac{7,65 \times 117.900 + 56,68 \times 152.100}{270.000} = 35,3 \text{ Ci/kg}$$

$$6 \quad 35,3 \frac{\text{Ci}}{\text{Kg}} \times 1,1 \frac{\text{Kg}}{\text{l}} = \underline{\underline{38,83 \text{ Ci/l D}_2\text{O}}}$$

Si se considera que la saturación se alcanza para $t = 5 \tau_1$, los valores antes calculados tendrán lugar a los $5 \times 12 = 60$ años de operación a plena potencia de la Central. En las Figs. 7, 8 y 9 se muestra la evolución de la concentración de tritio en el agua del primario, en función del tiempo de operación a plena potencia. En la Tabla II se citan los productos de activación del refrigerante más importantes y sus características.

NOMENCLATURA SECCION 4

- $\bar{\sigma}_a$ [barn] : Sección eficaz de activación del blanco considerado.
- V [m³] : Volumen de D₂O del circuito primario.
- t_i [seg] : Tiempo de pasaje de un diferencial volumen de refrigerante por la zona de flujo.
- t_2 [seg] : Tiempo insumido por el diferencial volumen en atravesar el circuito exterior al reactor.
- c_j [g/m² año] : Cuota de corrosión del material.
- F_j [m²] : Superficie correspondiente a C_j .
- $\bar{\phi}$ [$\frac{1}{\text{cm}^2\text{S}}$] : Flujo medio de activación para el isótopo en el medio refrigerante.
- ϕ_j [$\frac{1}{\text{cm}^2\text{S}}$] : Flujo de activación correspondiente a cada isótopo.
- $\alpha_j = \frac{g_{.j}}{M}$: Peso porcentual del isótopo en el elemento por frecuencia del isótopo/peso atómico.
- R_1 [1/seg] : Cuota de limpieza del refrigerante.
- σ [barn] : Sección eficaz de captura.
- t_3 [mes] : Tiempo de funcionamiento del reactor.
- λ [$\frac{1}{S}$] : Constante de decaimiento del isótopo considerado.

4. PRODUCTOS DE ACTIVACION DE LOS MATERIALES ESTRUCTURALES (PRODUCTOS DE CORROSION)

Las paredes del circuito primario, constituidas por aceros austeníticos (caños, bombas, etc.), de aleaciones especiales: Zircalloy (tubos de los generadores de vapor) etc., reaccionan químicamente con el agua pesada, de acuerdo a



M = Metal

Los óxidos OM pasan en solución al medio refrigerante y con el mismo atraviesan la zona de flujo neutrónico, donde se activan en "pases" sucesivos a través del núcleo. También se produce liberación de metal de las paredes por abrasión del medio refrigerante.

En el cálculo se suelen dividir los productos de activación en dos grandes grupos:

- a) Productos de corrosión no activos arrancados del sistema primario. De ellos se activa una parte al atravesar la zona de fisión. En su generación tiene actuación decisiva la totalidad de la "superficie mojada" con D_2O .
- b) Productos que se arrancan del material que se activa en la zona de irradiación. En su generación tiene actuación solamente la "superficie mojada" por D_2O en la zona de flujo neutrónico.

Para el cálculo de estos productos valen las leyes generales de activación, habiéndose calculado para la C.N.A. con las siguientes expresiones:

a)

$$A_1(\infty) = 5,16 \times 10^5 \times \frac{Ga}{V} \lambda t_{ef} \sum_j C_j F_j \bar{\phi} \alpha_j \rightarrow$$

$$\rightarrow \circ \left(\frac{1 - R_1 t_2}{R_1 + \sigma_a \frac{\phi t_1}{t_2}} + \frac{t_1}{2} \right) \cdot \frac{1}{R_1 t_2 + \lambda t_2 + \sigma \phi_c t_1} \left[\frac{C_i}{m^3} \right] \quad (2)$$

b)

$$A_2(t_3) = 5,16 \times 10^5 \frac{\sigma_a}{v} t_2 \sum_j C_j F_j \phi_j \alpha_j \cdot$$

$$\circ \frac{1}{R_1 t_2 + \lambda t_2 + \sigma \phi_c t_1} \left[1 - \frac{(R_1 t_2 + \lambda t_2 + \sigma \phi_c t_1) e^{-\lambda t_3}}{R_1 t_2 + \sigma \phi_c t_1} \right] \quad (3)$$

En la tabla III se presentan los productos de activación del material estructural más importantes.

NOMENCLATURA SECCION 5

A_o [Ci/m³] : Concentración de Ar-41 en el local del reactor.

V [m³] : Volumen del local del reactor.

A_1 [Ci/h] : Actividad proveniente de la fosa del reactor.

V_1 [m³] : Volumen irradiado en la fosa del reactor.

Q_1 [m³/h] : Caudal de remoción de aire en la fosa del reactor.

A_{CH} [Ci/h] : Emisión de actividad de Ar-41 por la chimenea.

Q_2 [m³/h] : Caudal de depresión del local del reactor.

λ [1/h] : Constante de decaimiento del Ar-41.

$$\tau [h] = \frac{V_1}{Q_1}$$

N [$\frac{\text{Atomos}}{m^3}$] = Densidad de átomos de Ar-40 en el aire.

σ_a [cm²] = Sección eficaz de activación.

ϕ [$-\frac{1}{cm^2s}$] = Flujo de activación del Ar-40.

5. PRODUCTOS DE ACTIVACION DEL AIRE DE REFRIGERANCION DEL REACTOR

Como ya se dijo el que reviste importancia radiológica es el Ar-41, cuyos datos se presentan en la Tabla IV.

En este caso interesa calcular la concentración de Ar-41 en el edificio del reactor y eventualmente la cantidad horaria de este radionucleído, emitido por chimenea. Se calcula para equilibrio (el cual se alcanza rápidamente, algunas horas) y para operación normal del reactor.

A los efectos de ilustrar el mecanismo de cálculo, se utilizará el esquema de la fig. 10 y su correspondiente modelo de la fig. 11.

La concentración de Ar-41 en el local del reactor A_o Ci/m³ estará dada por la ecuación diferencial (1)

$$\frac{dA_o}{dt} = \frac{dA_1}{Vdt} - \frac{Q_1}{V} A_o - \frac{Q_2}{V} A_o - A_o \lambda \quad (1)$$

Por otra parte, el aporte de actividad por unidad de tiempo $\frac{dA_1}{dt}$ [Ci/h] de Ar-41 proveniente de la fosa del reactor, estará dada por la (2).

$$\frac{dA_1}{dt} = \frac{N \sigma_a \phi Q_1}{3,7 \times 10^{10}} (1 - e^{-\lambda \tau}) + Q_1 A_o(t) e^{-\lambda \tau} \quad (2)$$

Resolviendo la (1) para equilibrio y reemplazando $\frac{dA_1}{dt}$ dado por la (2) se tiene:

$$A_o \left[\frac{\text{Ci}}{\text{m}^3} \right] = \frac{N \sigma_a \phi Q_1}{V \times 3,7 \times 10^{10}} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda \tau})}{\frac{Q_1}{V}(1 - e^{-\lambda \tau}) + \frac{Q_2}{V} + \lambda}$$

$$\text{con } \tau = \frac{V}{Q_1}$$

La cantidad emitida por chimenea será:

$$A_{CH} [Ci/h] = A_o \left[\frac{Ci}{m^3} \right] \times Q_2 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Para un valor típico de la instalación ($Q_2 = 1000 \text{ m}^3/h$) se obtuvo:

$$A_o = 3,42 \times 10^{-5} \frac{Ci}{m^3} \quad A_{CH} = 3,42 \times 10^{-2} Ci/h$$

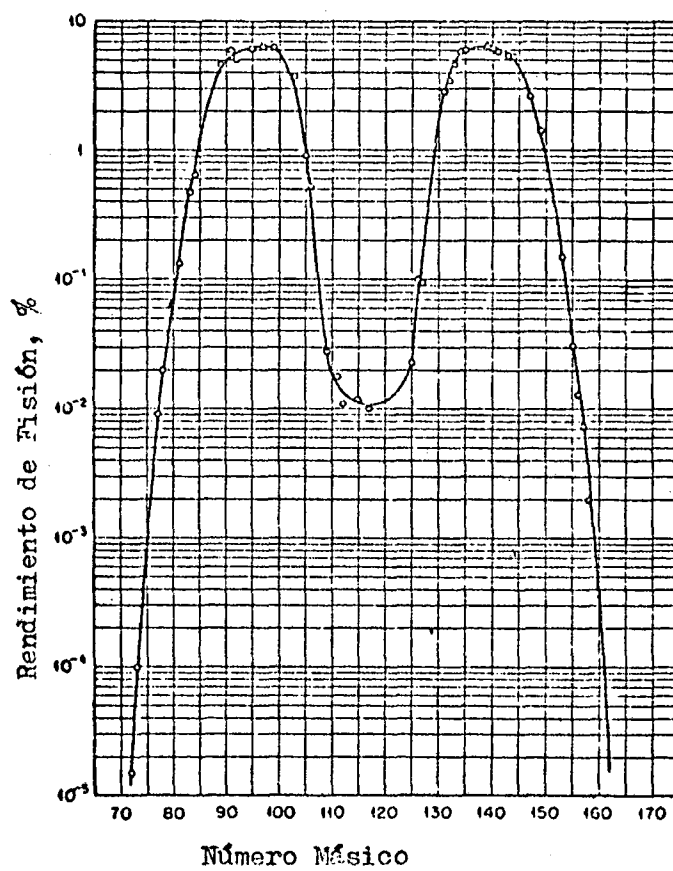


FIG. 1

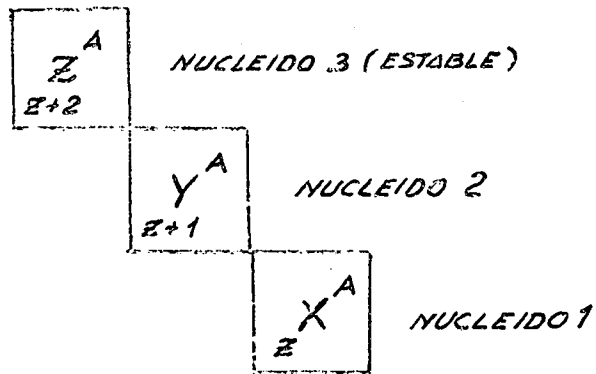


Fig. 2

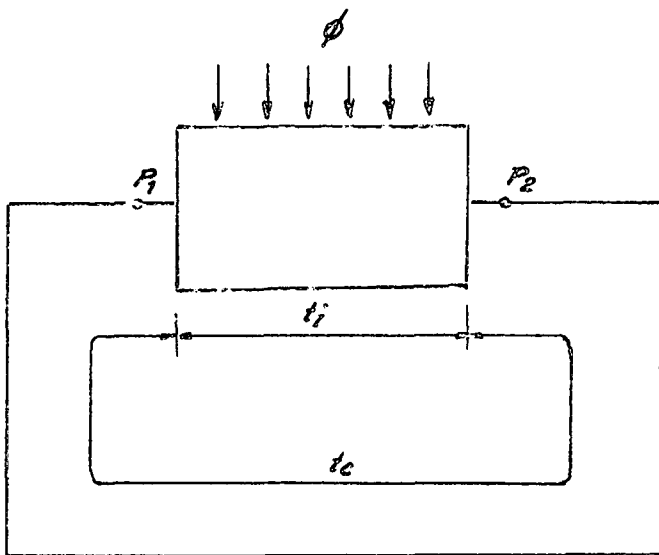


Fig. 3

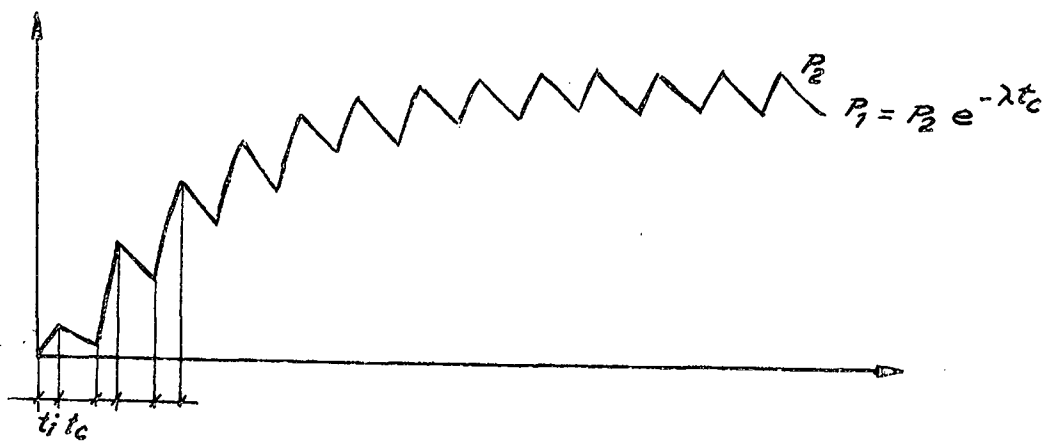


Fig. 4

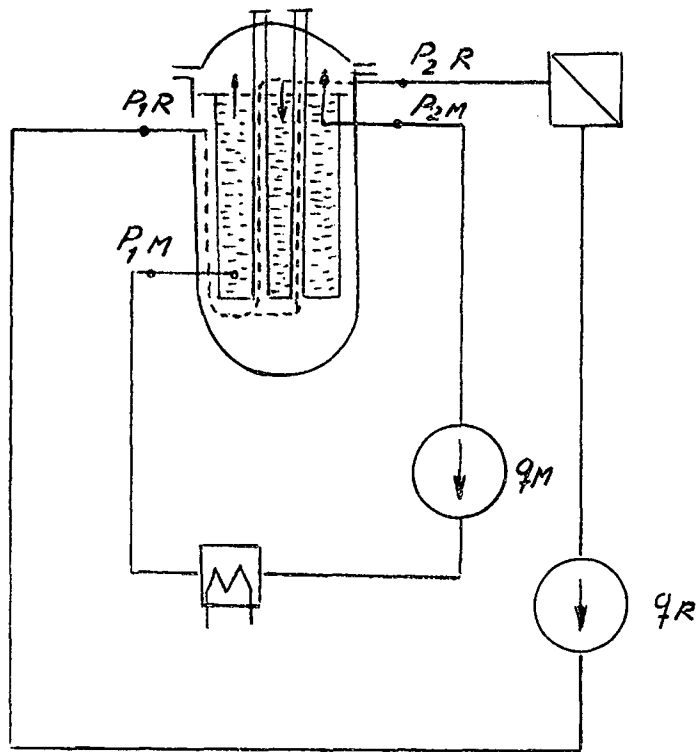


Fig. 5

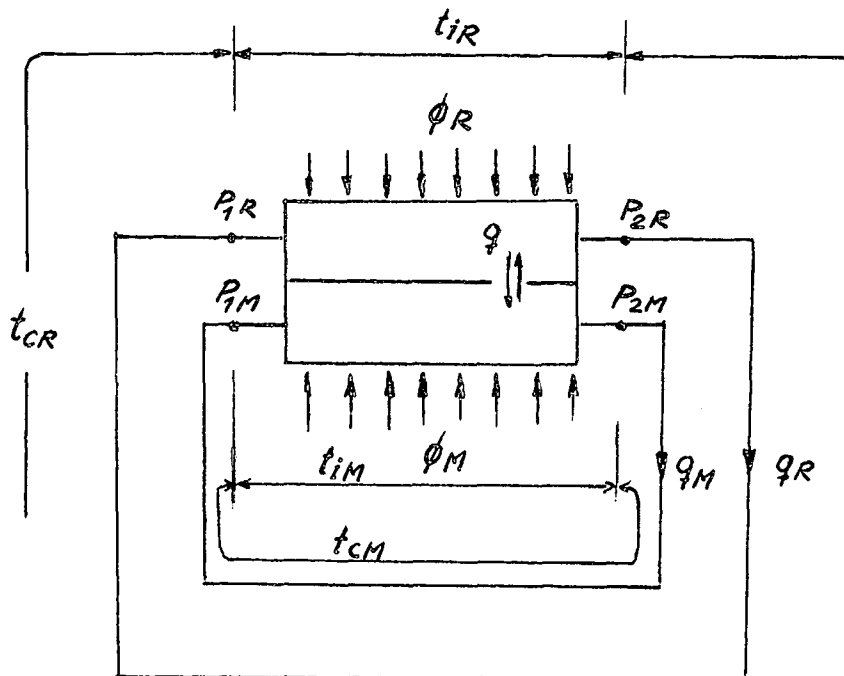


Fig. 6

Evolución de la actividad de tritio en el circuito primario

(0 a 365 días de plena potencia)

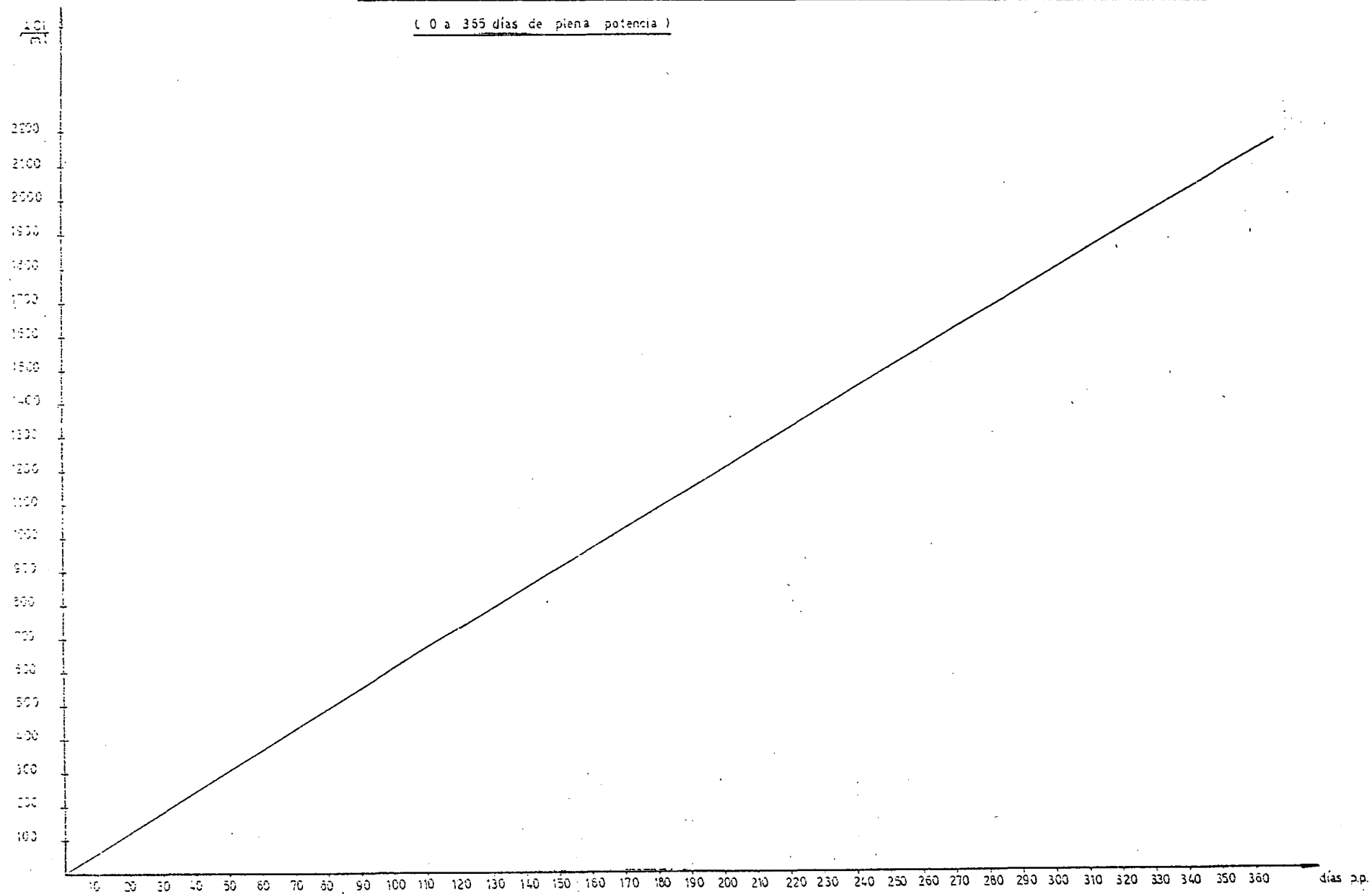


Fig. 7

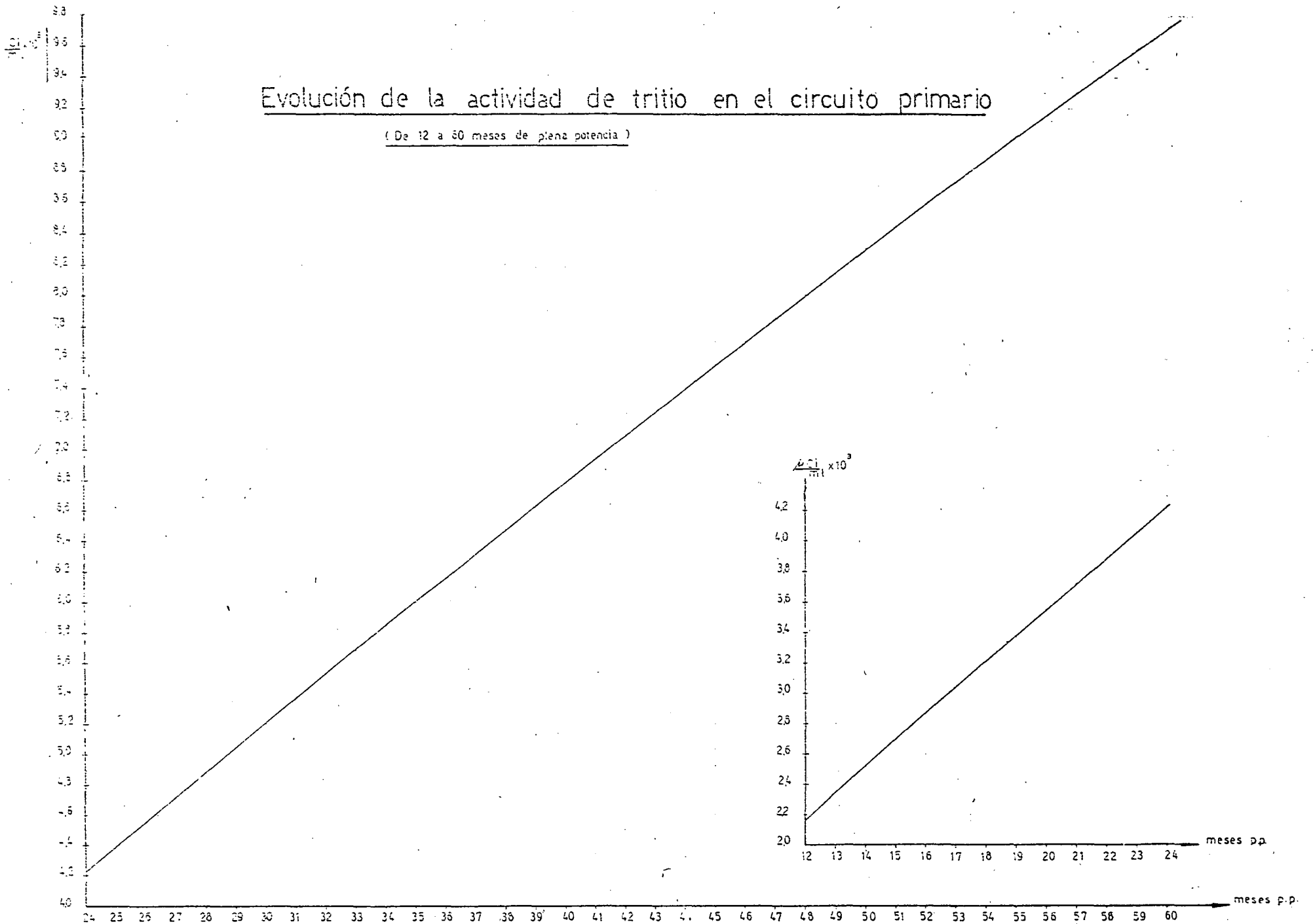


Fig. 8

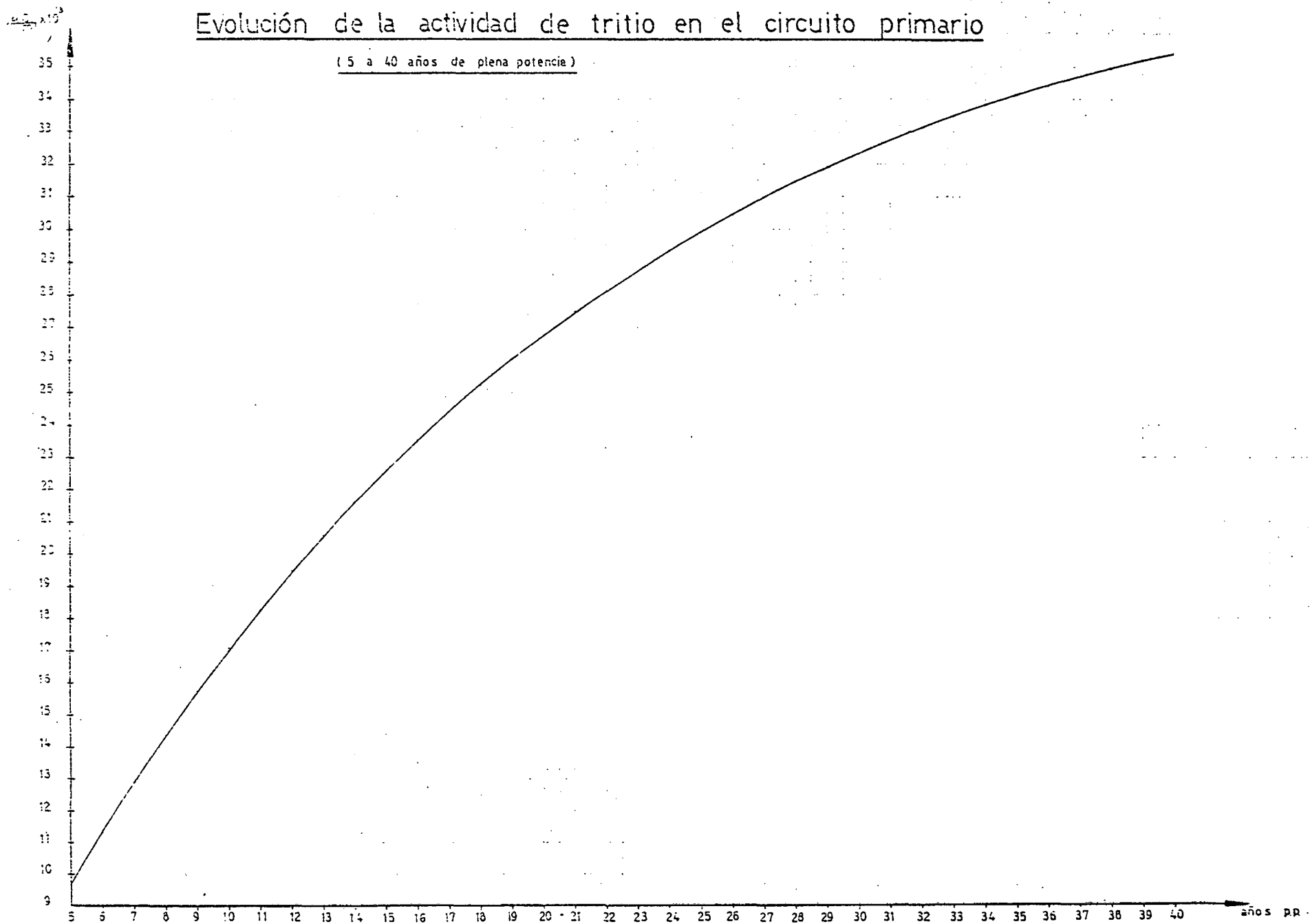


Fig. 9

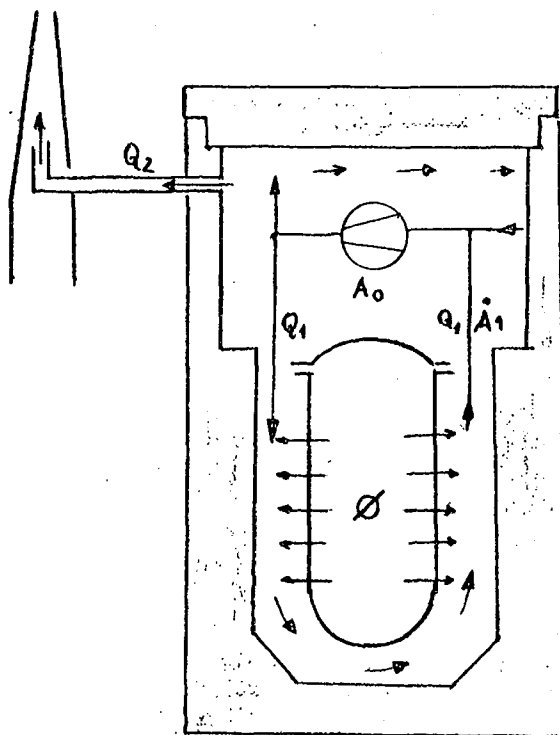


Fig. 10

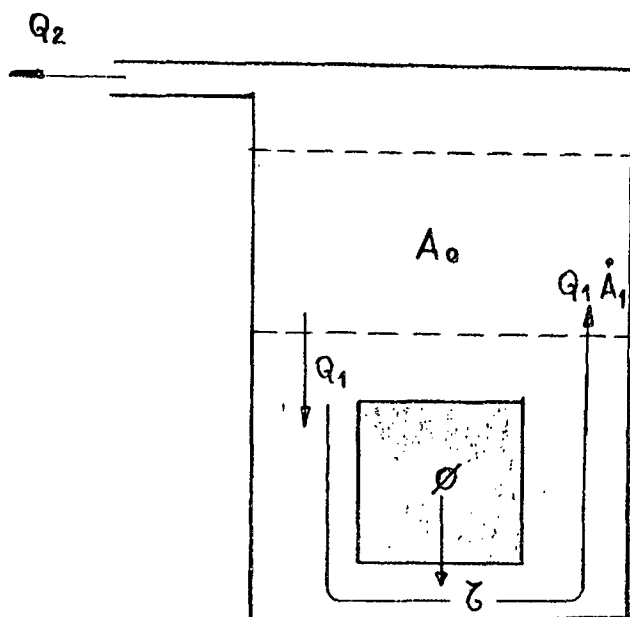


Fig. 11

TABLA I

INVENTARIO PRINCIPALES PRODUCTOS DE FISION

NUCLEO CENTRAL NUCLEAR ATUCHA.

Radionucleido	Semiperiodo	Rendimiento de fisión η_c (%)	(ci) para tiempo irradiación	
			150 d = 0,41 a	250 d = 0,685 a
Kr 85	10,76 a	1,3	$3,12 \times 10^5$	$5,16 \times 10^5$
Kr. 87	76 min	2,53	$2,34 \times 10^7$	$2,34 \times 10^7$
Kr 88	2,80 h	3,56	$3,29 \times 10^7$	$3,29 \times 10^7$
Xe 133	5,65 d	6,70	$6,19 \times 10^7$	$6,19 \times 10^7$
Xe 135	9,20 h	6,30	$5,82 \times 10^7$	$5,82 \times 10^7$
I 131	8,05 d	2,91	$2,68 \times 10^7$	$2,68 \times 10^7$
I 132	2.28 h	4,26	$3,94 \times 10^7$	$3,94 \times 10^7$
I 133	21 h	6,69	$6,18 \times 10^7$	$6,18 \times 10^7$
I 134	52 min	7,8	$7,21 \times 10^7$	$7,21 \times 10^7$

Tabla I (cont.)

Radionucleido	Semiperíodo	Rendimiento de fisión η_c (%)	(Ci) para tiempo irradiación	
			150 d = 0,41 a	250 d = 0,685 a
I 135	6,7 h	6,17	$5,7 \times 10^7$	$5,7 \times 10^7$
Cs 137	30,2 a	6,20	$5,67 \times 10^5$	$8,99 \times 10^5$
Zr 97	16,8 h	5,90	$5,45 \times 10^7$	$5,45 \times 10^7$
Ru 105	4,43 h	0,90	$8,31 \times 10^6$	$8,31 \times 10^6$
Ce 141	32,4 d	6,10	$5,64 \times 10^7$	$5,64 \times 10^7$
Sr 90	28,8 a	5,83	$5,3 \times 10^5$	$8,83 \times 10^5$

TABLA I'

PRODUCTOS DE FISION

RADIO NUCLEIDO	SEMI-PERIODO	ENERGIA γ (Mev)	ENERGIA β MAX (Mev)	RENDIMIENTO DE FISION η (%)	COEF. DE ESCAPE λ (1/S)
Kr 85	10,76 años	-	0,7	1,3	$1,3 \times 10^{-8}$
Kr 87	76 min	0,40;2,57;0,85	3,5;3,9	2	$1,3 \times 10^{-8}$
Kr 88	2,80 horas	0,19;2,40;0,85	0,5;2,8	3,5	3×10^{-8}
Xe 133	5,65 días	0,08	0,3	6,8	8×10^{-9}
Xe 135	9,15 horas	0,25	0,9	0,92	$1,4 \times 10^{-8}$
I 131	8,05 días	0,36;0,64;0,28	0,6;0,8	3,1	2×10^{-9}
I 132	2,4 horas	0,67;0,77;0,95	2,1	4,7	$1,3 \times 10^{-8}$
I 135	6,7 horas	1,14;1,28;1,72	1,0;1,4	6,10	$1,4 \times 10^{-8}$
Cs 137	30 años	—	0,5;1,2	6,15	$1,3 \times 10^{-8}$
Zr 97	16,8 horas	0,51;1,15;0,36	1,9	5,9	$1,6 \times 10^{-12}$
Ru 105	4,4 horas	0,73;0,47;0,68	1,2;1,9	0,9	$1,6 \times 10^{-12}$
Ce 141	32,5 días	0,15	0,4;0,6	6,4	$1,6 \times 10^{-12}$

TABLA II

PRODUCTOS DE ACTIVACION DEL MEDIO REFRIGERANTE

RADIONUCLEIDO	SEMI-PERIODO	ENERGIA γ (Mev)	ENERGIA β MAX (Mev)	ELEMENTO ORIGINAL	REACCION	SECCION EFICAZ ACTIVACION
N - 16	7,4 seg.	6,0;6,1;7,1	10,3;1,3;3,8	O - 16	n, p (+)	20 μ barn
H - 3 (2)	12 años	—	0,018	Li - 6	n, α	945
Li - 8 (1)	0,9 seg.	—	(13,6,3)	Li - 7	n, γ	33
Na - 24 (3)	15 horas	1,38;2,76	1,4	Na - 23	n, γ	0,6 barn
H - 3	12 años	—	0,018	H - 2	n, γ	0,57 mb
N - 17	4,14 seg.	—	3,7	O, 17	n, p	33 mb
Li - 7 (4)	estable	—	—	B - 10	n, α	2624 barn
O - 19	29 seg.	0,19;1,37	—	O - 18	n, γ	—
F - 17	66 seg.	0,511	β^+ (aniquil)	O - 16	(d, p)	—

(+) neutrones con más de 9 Mev

(1) del agregado al D₂O de OHLi⁷ para alcalinizar el medio

(2) de la regeneración de las resinas aniónicas para extracción boro (regeneración con Linat = 7,52% Li-6 y 92,48% Li-7)

(3) de regeneración de resinas aniónicas para extracción boro al comienzo de la operación

(4) de la utilización de boro natural para control de reactividad B nat. = (19,61% B-10 ; 80,39% B - 11)

TABLA III

PRODUCTOS DE CORROSION DEL MATERIAL ESTRUCTURAL

RADIONUCLEIDO	SEMIPERIDO	ENERGIA γ (Mev)	ENERGIA β MAX (Mev)	PRECURSOR	REACCION	SECCION EFICAZ ACTIVACION
Co- 60	5,27 años	1,17;1,33	0,3;1,5	Co - 59	n, γ	36 barn
Co -58	72 días	0,81	$\beta + 1,3$	Ni - 58	n,p	0,15 barn
Fe -59	45 días	1,10;1,29	0,5;1,6	Fe - 58	n, γ	0,98 barn
Mn -54	314 días	0,835	-	Fe - 54	n,p	0,054 barn 37
Zn -65	245 días	1,115	$\beta + 0,3$	Zn - 64	n, γ	0,47 barn
Cr -51	27 días	0,32	-	Cr - 50	n, γ	13,5 barn
Mn -56	2,6 horas	0,85;1,81;2,11	2,9	Fe - 56	n,p	$9,5 \times 10^{-4}$ barn

TABLA IV

PRODUCTOS DE ACTIVACION DEL AIRE DE REFRIGERACION DEL RECIPIENTE DE PRESION

RADIO NUCLEIDO	SEMIPERODO	ENERGIA γ (Mev)	ENERGIA β MAX (Mev)	PRECURSOR	REACCION	SECCION ACTIVACION
Ar- 41	109 min	1,29	1,2 ; 2,5	A - 40	n, γ	0,61 barn