

08.74.09

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
1	1974

CNA/I-2

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

CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

DETECCION DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES DAÑADOS
EN LA CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

Ing. E. Díaz

Buenos Aires-Argentina

-1974-

- I) INTRODUCCION
- II) RELACION DE DISCRIMINACION
- III) CONCENTRACIONES EN EL MEDIO REFRIGERANTE
- IV) RELACIONES DE CONCENTRACION $I-131/I-133$
EN EL MEDIO REFRIGERANTE
- V) APENDICE

I- INTRODUCCION

En la Central Nuclear en Atucha se encuentra próximo a ser puesto en servicio un sistema de detección y localización de elementos combustibles dañados.

La investigación se lleva a cabo durante la operación del reactor y permitirá a partir de la medición de la concentración de algunos radionucleídos indicadores de la aparición de fallas en las vainas del combustible, localizar los defectuosos.

El sistema consta fundamentalmente (fig. 1) de una toma de refrigerante por "loop", el cual puede ser medido en estado líquido o bien luego de pasar por desgasificador mediante los gases no condensables.

La medición (γ) se lleva a cabo mediante la utilización de un detector de germanio-litio y un analizador multi-canal con salida por impresora.

Una vez que se tiene la certeza de la existencia de fallas en el combustible, el circuito puede ser conmutado y mediante una válvula multicanal tomar un flujo continuo de refrigerante proveniente de un par determinado de canales de refrigeración. En forma sucesiva se van analizando de a pares los canales de refrigeración hasta determinar en que grupo se encuentra la falla.

Para ello se hace necesario determinar la relación "señal/ruido", entendiéndose por señal la concentración de un determinado producto de fisión en el refrigerante cuando existe una determinada fuga desde el interior de la vaina. "Ruido" se denomina al "fondo" existente en el refrigerante debido a la fisión de la contaminación de uranio en la superficie de las vainas.

La descripción del sistema (NX) se detalla en "Systembeschreibung für Hüllrohrüberwachung NX" Capítulo 2.8 del manual de operaciones de la CNA, Agosto 1974.

El objeto del presente trabajo es determinar esta relación "señal-ruido" para distintos radionucleídos, denominada "relación de discriminación". Este valor permite como su nombre lo indica, establecer cuantas veces supera el "fondo" la concentración en el canal de refrigeración con fallas (localización). En la segunda parte del trabajo, se calculan las concentraciones en el refrigerante con y sin falla de elementos combustibles, para el caso en que se realicen medi-

ciones de concentración en el medio refrigerante (detección).

Se han tenido en cuenta entre otros, los trabajos de D.H. Brine "An introduction to activity monitoring" University of Waterloo y R.H. Rodríguez Pasqués "La detección y localización de elementos de combustible "fallados" dentro de un reactor nuclear" CNEA TE 24/93 Buenos Aires 1972. Este trabajo se considera un elemento de base para fijar criterios de elección de isótopos detectores y límites de confianza al diagnosticar la existencia de fallas. Sin embargo, será posible, una vez que se posea experiencia operativa del sistema, efectuar modificaciones y ajustes de los modelos utilizados en la derivación de las expresiones analíticas aquí obtenidas.

II- RELACION DE DISCRIMINACION

En la figura 2 se ilustra en forma esquemática el circuito primario de la Central Nuclear en Atucha. En el recipiente del moderador se encuentran alojados los canales de refrigeración dentro de los cuales se alojan los elementos combustibles. El caudal del refrigerante primario es F [cm^3/s] mientras que el caudal del canal analizado es de f [cm^3/s].

Al producirse una avería en un elemento combustible, si se supone que de un determinado radionucleído salen de la vaina R átomos por segundo, la contaminación del medio refrigerante se desarrollará como se indica en la línea de puntos, dependiendo de la "subsistencia" del mismo en el circuito, la contaminación de los restantes canales.

La concentración de átomos por unidad de volumen en el canal averiado, es para nucleídos de baja "subsistencia":

$$S = \frac{R}{f} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right] \quad 1)$$

Fondo de medición:

Si se supone que los elementos combustibles no poseen contaminación superficial de uranio y que se produce una avería simple en un elemento combustible y que la fracción o coeficiente de supervivencia del radionucleído en el refrigerante es:

$$a = \frac{E \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right]_i}{S \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right]_i} \quad 2)$$

E [$\text{átomos}/\text{cm}^3$] = concentración del radionucleído i a la entrada del reactor;

S [$\text{átomos}/\text{cm}^3$] = ídem a la salida;

será posible calcular la concentración del mismo en equilibrio para el medio refrigerante. Para ello se recurre al modelo de la figura 3.

Para $t=0$ se produce la avería en un elemento combustible. Como referencia de tiempo se toma la entrada al reactor

instantes antes de que se produzca la avería.

Si se tabulan las sucesivas actividades específicas en función del número de circuitos completos n o del tiempo, se tiene la tabla I lo que da lugar para $t \rightarrow \infty$ a la suma de los términos de una serie de potencias cuyo primer término es $\frac{R}{F_L}$ y cuya razón es a :

TABLA I

Nº de vueltas	Tiempo	Actividad Específica
$n=0$	$t=0$	$A(t) = A_E (0) = 0$
$n=1$	$t=t_1$	$A(t) = A_E (1) = \frac{R}{F_L} \cdot a$
$n=2$	$t=2 t_1$	$A(t) = A_E (2) = \left(\frac{R}{F_L} a + \frac{R}{F_L} \right) \cdot a = \frac{R}{F_L} \cdot a^2 + \frac{R}{F_L} \cdot a$
$n=3$	$t=3 t_1$	$A(t) = A_E (3) = \left(\frac{R}{F_L} \cdot a^2 + \frac{R}{F_L} a + \frac{R}{F_L} \right) \cdot a =$ $= \frac{R}{F_L} \cdot a^3 + \frac{R}{F_L} \cdot a^2 + \frac{R}{F_L} \cdot a$
$n=n$	$t=nt_1$	$A(t) = A_E (n) = \frac{R}{F_L} a^n + \frac{R}{F_L} a^{n-1} + \dots + \frac{R}{F_L} a$

Para $n \rightarrow \infty$ $t \rightarrow \infty$

$$A(t) \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right] = A_E (\infty) = \frac{R}{F_L} \cdot a \cdot \frac{1}{1-a} \quad 3)$$

Puede verse que si el radionucleído no desaparece (por decaimiento, deposición, limpieza, desgasificación, etc.) $a=1$ y $A_E (\infty) \rightarrow \infty$. Esto es para el caso en que se considere R como fuente infinita. Este será el fondo que aparecerá en todos los canales de refrigeración. De ahí que para bajar el fondo conviene utilizar un radionucleído de semiperíodo muy corto (5 o 10 veces más corto que t_1). En esas con-

diciones

$$A(t) = B_D = 0 \quad 4)$$

Relación de discriminación máxima teórica

En régimen estacionario, en el canal de refrigeración que aloja el elemento combustible averiado, existirá una concentración específica $S = \frac{K}{f}$ más el fondo $A_E(\infty)$, mientras que en el resto de los canales habrá una concentración igual al fondo $A_E(\infty)$ (fig. 4).

Se define como "relación de discriminación máxima teórica" a la relación entre la concentración a la salida del canal averiado y la concentración a la salida de un canal intacto:

$$R_D = \frac{S + A_E(\infty)}{A_E(\infty)} = 1 + \frac{S}{A_E(\infty)} = 1 + \frac{\frac{R}{f}}{\frac{R}{F_L} \cdot \frac{a}{1-a}}$$

$$R_D = 1 + \frac{1}{\frac{f}{F_L} \cdot \frac{a}{1-a}} \quad 5)$$

De la expresión 5) puede concluirse que la relación de discriminación máxima teórica R_D no depende del rate de emisión de productos de fisión de la pérdida sino del factor de dilución f/F_L y del coeficiente de subsistencia a , función de la química de los productos de fisión y de su semiperíodo. Existirá por lo tanto un mismo valor de R_D para cada producto de fisión y para cada reactor.

Elección de radionucleídos de detección

Productos de fisión gaseosos

Estos decaen en el refrigerante, de manera especial los gases nobles. (Se desprecia la cuota de desgaso). El coeficiente de subsistencia será entonces:

$$a = \frac{A_E}{A_S} = \frac{A_S e^{-\lambda T}}{A_S} = e^{-\lambda T}$$

$$R_D = 1 + \frac{1}{\frac{f}{F_L} \frac{e^{-\lambda T}}{1 - e^{-\lambda T}}}$$

6)

En la tabla II se dan los valores de R_D para algunos gases. Se consideran aceptables valores de $R_D > 2$. Con esta condición puede despejarse el valor de λ y por lo tanto elegir el nucleído de detección.

Halógenos (Iodos, Bromos)

Son retirados del sistema, por decaimiento y por retención de las resinas.

Puede analizarse en este caso el coeficiente de subsistencia a y por consiguiente el R_D con el siguiente modelo de la figura 5.

El factor que afectará a la concentración de salida, por efecto de la limpieza en las resinas será:

$$K_R = \frac{F_L - q \cdot \eta_R}{F_L} = 1 - \frac{q}{F_L} \cdot \eta_R$$

$$A_E = A_S \cdot K \cdot e^{-\lambda T} = A_S \left(1 - \frac{q}{F_L} \eta_R\right) e^{-\lambda T}$$

$$a = \frac{A_E}{A_S} = \left(1 - \frac{q}{F_L} \eta_R\right) e^{-\lambda T}$$

$$a = \left(1 - \frac{q}{F_L} \eta_R\right) e^{-\lambda T}$$

7)

Generalmente $\frac{q \eta_R}{F_L}$ es mucho menor que 1:

TABLA II

RELACION DE DISCRIMINACION. VAINAS SIN CONTAMINACION. PERDIDA EN UN CANAL*

Radionucleido Radionucleido	Constante de decaimiento λ [1/s]	Semiperíodo $T_{\frac{1}{2}}$	$\lambda \cdot T$	$e^{-\lambda T}$	$1 - e^{-\lambda T}$	RD
Xe-133	$1,53 \times 10^{-6}$	5,24 d	$1,989 \times 10^{-5}$	$9,999802 \times 10^{-1}$	$1,989 \times 10^{-5}$	1,0051
Xe-135	$2,90 \times 10^{-5}$	6,64 h	$3,770 \times 10^{-4}$	$9,99623 \times 10^{-1}$	$3,77 \times 10^{-4}$	1,098
Xe-137	$2,96 \times 10^{-3}$	3,9 min	$3,849 \times 10^{-2}$	$9,615 \times 10^{-1}$	$3,849 \times 10^{-2}$	11,44
Xe-138	$6,8 \times 10^{-4}$	17 min	$8,830 \times 10^{-3}$	$9,911 \times 10^{-1}$	$8,830 \times 10^{-3}$	3,32
Xe-139	$1,69 \times 10^{-2}$	41 seg	$2,197 \times 10^{-1}$	$8,040 \times 10^{-1}$	0,196	64,58
Kr-85 m	$4,45 \times 10^{-5}$	4,32 h	$5,785 \times 10^{-4}$	$9,9942 \times 10^{-1}$	$5,785 \times 10^{-4}$	1,1509
Kr-87	$1,49 \times 10^{-4}$	1,29 h	$1,937 \times 10^{-3}$	$9,9806 \times 10^{-1}$	$1,937 \times 10^{-3}$	1,5061
Kr-88	7×10^{-5}	2,75 h	$9,1 \times 10^{-4}$	$9,99907 \times 10^{-1}$	$9,1 \times 10^{-4}$	1,2375
Kr-89	$3,60 \times 10^{-3}$	3,2 min	$4,69 \times 10^{-2}$	$9,5308 \times 10^{-1}$	$4,69 \times 10^{-2}$	13,83

* Se desprecia efecto de desgasado.

$$\therefore a = e^{-\lambda T}$$

encontrándose que la expresión del R_D es igual a la de los gases nobles.

Influencia de la contaminación superficial de uranio en las vainas

El uranio que inevitablemente queda durante la fabricación del combustible sobre las vainas, fisiona en presencia del flujo neutrónico aportando un fondo de actividad a todos los canales aún en el caso en que no existan averías.

El aporte de actividad R' de cada canal será, analizando la figura 6:

$$R' \left[\frac{\text{atom}}{\text{seg}} \right] = k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x \quad (\text{Ver V.c}) \quad 8)$$

y la concentración a la salida de cada canal será

$$\frac{R'}{f} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right] = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \quad 9)$$

Para $t=0$, comienza la fisión. Una cantidad de átomos por segundo aporta al agua de cada canal, de manera que para $t=t_s$, el agua sale (punto s) con la concentración indicada en la 9).

La 9) puede también obtenerse suponiendo que cada canal aporta una actividad en el tiempo de:

$$R' \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right] \quad , \text{ en total, para } n \text{ canales}$$

$$nR' \left[\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right]$$

La concentración a la salida ($t=t_s$) será

$$\frac{nR'}{F_L} = \frac{nR'}{nf} = \frac{R'}{f} \left[\text{átomos/cm}^3 \right]$$

La concentración a la entrada será: $\frac{R'}{f}$. a. Esta concentración se irá incrementando con el tiempo de acuerdo al detalle de la tabla III:

TABLA III

Nº de vueltas	Tiempo [S]	Actividad específica [átomo/cm ³] a la entrada (punto E)
n=0	t=0	0
n=1	t=t ₁	$\frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot a$
n=2	t=2 t ₁	$\left(\frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot a + \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \right) a =$ $= \left(\frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} a^2 + \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} a \right)$
n=3	t=3 t ₁	$\left(\frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x a^2}{f} + \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x a}{f} + \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \right) a =$ $= \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x a}{f} (1 + a + a^2)$
n=n	t=nt ₁	$\frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x a}{f} (1 + a + a^2 + \dots + a^{n-1})$

para $t \rightarrow \infty$ tendremos la suma de las infinitas actividades específicas:

$$B_T = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x \cdot a}{f} \left(\frac{1}{1-a} \right) \quad \text{punto E} \quad 10)$$

y a la salida

$$B_T = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{1-a} \quad \text{punto S} \quad 11)$$

La 11) será el fondo debido a la contaminación superficial de las vainas. A este fondo B_T habrá que sumar el fondo debido a la supervivencia del radionucleído cuando

existe alguna falla en el combustible $A_E(\infty)$, ya calculado en 3).

Para calcular la relación de discriminación habrá que hacer el cociente entre la actividad específica a la salida del canal averiado y la actividad específica a la salida del canal intacto (ver apéndice V.b).

Fondo

$$B_T \text{ salida} + A_E \infty = \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \cdot \frac{1}{1-a} + \frac{R}{F_L} \cdot \frac{a}{1-a} \quad 12)$$

Esta es la concentración a la salida del canal intacto.

En el canal dañado habrá que sumar el caudal de pérdidas:

$$\frac{k \bar{\phi} A x}{f} \cdot \frac{1}{1-a} + \frac{R}{F_L} \cdot \frac{a}{1-a} + \frac{R}{f} \quad 13)$$

haciendo el cociente entre 13 y 12:

$$R_D = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{k \bar{\phi} A x}{R}} \quad 14)$$

La pérdida R puede expresarse como (ver "Evaluación de la concentración de productos de fisión en el medio refrigerante primario" CNA Depto. Seguridad y Radioprotección, Lima, Mayo 1974):

$$R \left[\frac{\text{átomos}}{s} \right] = \mathcal{D} N \quad 15)$$

siendo $\mathcal{D}$ el factor de escape del producto de fisión $\left[\frac{1}{5} \right]$;
 N [átomos] : número de átomos del producto de fisión dentro del elemento combustible.

$$N = \frac{\sigma_f \cdot N_o \cdot \bar{\phi} \cdot \eta \cdot z}{\lambda} \quad 16)$$

σ_f [cm²] : sección eficaz de fisión de U235.

$N_o \left[\frac{\text{átomos}}{\text{g U235}} \right]$: numero de átomos de U235 por gramo de U235.

$\bar{\phi} \left[\frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}} \right]$: flujo neutrónico medio.

$\eta \left[- \right]$: rendimiento de fisión.

$z \left[\text{g} \right]$: masa de U235 en el interior de las vainas de un elemento combustible.

$\lambda \left[\frac{1}{\text{s}} \right]$: constante de decaimiento del producto de fisión considerado.

Sabiendo que $k = \eta \cdot \bar{\nu} \cdot N_o \left(\frac{\text{átomo producto fisión}}{\text{seg x unidad flujo x g U235}} \right)$

La 16 será:

$$N = \frac{k' \bar{\phi} z}{\lambda} \quad (17)$$

Reemplazando 17) en 15)

$$R \left[\frac{\text{at}}{\text{s}} \right] = \frac{k' \nu \bar{\phi} z}{\lambda} \quad (18)$$

pero, tal como se explica en el trabajo citado:

$$K = \frac{\nu}{\sqrt{\lambda}} \quad \therefore \nu = K \sqrt{\lambda}$$

reemplazando ν en 18)

$$R \left[\frac{\text{at}}{\text{s}} \right] = \frac{k \cdot K \cdot \sqrt{\lambda} \cdot \bar{\phi} z}{\lambda} = \frac{k \cdot K \cdot \bar{\phi} z}{\sqrt{\lambda}} \quad (19)$$

Reemplazando 19) en 14) y sabiendo que $b = \frac{k}{k'} = 6,16 \times 10^{-3}$

$$RD = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{K \bar{\phi} A \cdot \sqrt{\lambda} \cdot b}{K \cdot K \cdot \bar{\phi} \cdot z}} \quad (20)$$

$$RD = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{A \cdot \sqrt{\lambda} \cdot b}{K \cdot z}}$$

Si la 20 se quiere expresar en función de $\bar{v}$

$$R_D = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{\lambda b}{\bar{v} \bar{z}} A \times} \quad (21)$$

Si la falla tiene lugar en un canal donde el flujo de operación es $\bar{\phi} \neq \bar{\phi}$, la 19) se transforma en:

$$R \left[\frac{\text{at}}{\text{seg}} \right] = \frac{k' K \bar{\phi} A \cdot x}{\sqrt{\lambda}}$$

reemplazando en la 14)

$$R_D = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{K \bar{\phi} A \times \sqrt{\lambda}}{K K \bar{\phi} \cdot \bar{z}} b}$$

$$R_D = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{\bar{\phi}}{\bar{\phi}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda}}{K} \frac{A \times b}{\bar{z}}}$$

$$\text{ó} \quad R_D = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{\bar{\phi}}{\bar{\phi}} \cdot \frac{\lambda}{\bar{v}} \frac{A \times b}{\bar{z}}}$$

En forma análoga, si el caudal en el canal averiado es $f' \neq f$

$$R_D = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{\bar{\phi}}{\bar{\phi}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda}}{K} \frac{f' A \times b}{f \bar{z}}}$$

$$\text{ó} \quad R_D = 1 + \frac{1}{\frac{a}{1-a} \cdot \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{\bar{\phi}}{\bar{\phi}} \cdot \frac{\lambda}{\bar{v}} \frac{f' A \times b}{f \bar{z}}}$$

En la tabla IV se presentan los valores de R_D para los posibles radionucleídos a utilizar en la localización (marcados con (+)). En cambio aquellos que presentan valores de R_D inferiores a 2 no resultan recomendables para ello, aunque pueden ser usados en la detección (evidencia de que existe una pérdida aunque se desconozca de que elemento combustible proviene, por ejemplo puede citarse el caso del Xe133).

III- CONCENTRACIONES EN EL MEDIO REFRIGERANTE

Mediante el análisis de la concentración de uno o varios nucleidos en el medio refrigerante se puede detectar la existencia de daños en las vainas. Resulta importante derivar las expresiones que da la concentración de productos de fisión en el refrigerante, cuando ésta es debida a la fisión del uranio que inevitablemente queda como contaminación durante la fabricación del elemento combustible, o bien cuando la concentración se ve afectada por la aparición de una falla en la vaina.

III.1- Concentración en regimen permanente en el medio refrigerante, debida a la contaminación de las vainas

Se calcula a partir de las expresiones 11 y 12

A la entrada del reactor:

$$B_{TE} = \frac{k \bar{\phi} A x a}{f} \left(\frac{1}{1-a} \right)$$

A la salida del reactor:

$$B_{TS} = \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \cdot \frac{1}{(1-a)}$$

Con limpieza:

$$a = \left(1 - \frac{q}{F_L} \right) \eta(R) e^{-\lambda T}$$

Sin limpieza:

$$a = e^{-\lambda T}$$

Concentración de I-131 en el refrigerante

III.1.a- Sin limpieza

A la entrada del reactor

$$B_{TE} = \frac{k_2 \bar{\phi} A x a_2}{f} \left(\frac{1}{1-a_2} \right) \approx \frac{k_2 \bar{\phi} A x}{f} \cdot \frac{1}{\lambda_2 T}$$

$$\lambda_2 = 10^{-6} \frac{1}{s} \quad T = 13s$$

TABLA IV

RELACION DE DISCRIMINACION. VAINAS CONTAMINADAS + PERDIDA EN UN CANAL

Radionucleido	Constante decaimiento 1/s	Semiperiodo $T_{1/2}$	Coef. de escape λ [1/s]	$\frac{\lambda}{S}$	a	RD
Xe-133	$1,53 \times 10^{-6}$	5,24 d	2×10^{-8}	76,5	0,99998	1,00
Xe-135	$2,9 \times 10^{-5}$	6,64 h	$1,3 \times 10^{-8}$	2230,7	0,99962	1,09
Xe-137	$2,96 \times 10^{-3}$	3,9 min	$1,5 \times 10^{-8*}$	$1,9733 \times 10^5$	0,9615	9,55 +
Xe-138	$6,8 \times 10^{-4}$	17 min.	$1,5 \times 10^{-8*}$	$4,5333 \times 10^4$	0,9911	3,23 +
Xe-139	$1,69 \times 10^{-2}$	41 seg	$1,5 \times 10^{-8*}$	$1,1266 \times 10^6$	0,7803	29,80
Kr-85 m	$4,45 \times 10^{-5}$	4,32 h	$1,3 \times 10^{-8}$	$3,42 \times 10^3$	0,99942	1,15
Kr-87	$1,49 \times 10^{-4}$	1,29 h	$1,3 \times 10^{-8}$	$1,14 \times 10^4$	0,99806	1,50
Kr-88	7×10^{-5}	2,75 h	3×10^{-8}	$2,33 \times 10^3$	0,99909	1,23
Kr-89	$3,60 \times 10^{-3}$	3,2 min	$1,5 \times 10^{-8*}$	$2,4 \times 10^5$	0,9532	11,08 +

* Valor estimado

$$\lambda_2 T = 13 \times 10^{-6}$$

$$\eta_2 = 2,9\%$$

$$B_{TE} = \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 2,9 \times 2 \times 10^{14} \times 7,13 \times 10^4 \times 10^{-8}}{0,0213 \times 0,9 \times 100}$$

$$\frac{1}{13 \times 10^{-6}} = 1,513 \times 10^{14} \frac{\text{at } 1131}{\text{m}^3}$$

$$B_{TE} \left[\frac{\text{Ci } 1131}{\text{m}^3} \right] = 1,513 \times 10^{14} \frac{1}{\text{m}^3} \times 10^{-6} \frac{1}{\text{s}} \times \frac{1}{3,7 \times 10^{10} \frac{1}{\text{s Ci}}} =$$

$$= 4,089 \times 10^{-3} \text{ Ci/m}^3$$

$$B_{TE} = 4,089 \times 10^{-3} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

III.1.b- A la salida del reactor:

$$B_{TS} = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{1-a} = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\lambda_2 T}} =$$

para $\lambda_2 T \ll 1$ como en este caso ($\lambda T = 13 \times 10^{-6}$)

$$1 - e^{-\lambda_2 T} = \lambda_2 T$$

$$\therefore B_{TS} = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{\lambda_2 T}$$

Puede verse que $B_{TE} \cong B_{TS}$.

Con limpieza:

III.1.c- A la entrada del reactor:

$$B_{TS} = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{(1 - \frac{\eta}{F_L} \eta_R) e^{-\lambda_2 T}}{1 - [(1 - \frac{\eta}{F_L} \eta_R) e^{-\lambda_2 T}]}, \quad \begin{array}{l} \text{si:} \\ B = 1 - \frac{\eta}{F_L} \\ \text{y } \eta_R = 1 \\ e^{-\lambda_2 T} \cong 1 \end{array}$$

$$B_{TE} \cong \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{B}{1-B} =$$

$$= \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{14} \times 2,9 \times 7,13 \times 10^4 \times 10^{-8}}{0,0213 \times 0,9 \times 100} .$$

$$\cdot \frac{(1 - 1,1 \times 10^{-3})}{1 - [(1 - 1,1 \times 10^{-3})]} = 1,967 \times 10^9 \times \frac{9,989 \times 10^{-1}}{1,1 \times 10^{-3}} =$$

$$= 1,967 \times 10^9 \times 9,08 \times 10^2 = 1,7862 \times 10^{12} \frac{\text{átomos I131}}{\text{m}^3}$$

$$B_{TE} = 1,7862 \times 10^{12} \frac{\text{at}}{\text{m}^3} \times 10^{-6} \frac{1}{\cancel{S}} \cdot \frac{1}{3,7 \times 10^{10} \frac{\text{at}}{\cancel{S} \text{ Ci}}} =$$

$$= 4,827 \times 10^{-5} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

$$B_{TE} \left[\frac{\text{Ci}}{\text{m}^3} \right] = 4,827 \times 10^{-5}$$

III.1.d- A la salida del reactor:

$$B_{TS} = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{1 - (1 - \frac{2}{F_L} \eta) e^{-\lambda \tau}} =$$

$$= \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 2,9 \times 2 \times 10^{14} \times 7,13 \times 10^4 \times 10^{-8}}{0,0213 \times 0,9 \times 100} .$$

$$\cdot \frac{1}{1 - [(1 - 1,1 \times 10^{-3})]} = 1,79 \times 10^{12} \frac{\text{atom I131}}{\text{m}^3}$$

$$B_{TS} = 1,79 \times 10^{12} \times 10^{-6} \frac{1}{3,7 \times 10^{10}} = 4,833 \times 10^{-5} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

$$B_{TS} \left[\frac{\text{Ci}}{\text{m}^3} \right] = 4,833 \times 10^{-5}$$

Concentración de I-133 en el refrigerante

III.1.e- Sin limpieza:

A la entrada del reactor

$$B_{TE} = \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \left(\frac{a_1}{1-a_1} \right) \cong \frac{k \bar{\phi} A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{\lambda_1 T}$$

$$\lambda_1 = 9,2 \times 10^{-6} \frac{1}{s}, \quad T = 135$$

$$\lambda_1 T = 9,2 \times 10^{-6} \times 135 = 1,196 \times 10^{-4}$$

$$\eta_1 = 6,5\%$$

$$B_{TE} \cong \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{14} \times 6,5 \times 7,13 \times 10^4 \times 10^{-8}}{0,0213 \times 0,9 \times 100} \cdot$$

$$\cdot \frac{1}{1,196 \times 10^{-4}} = 3,68 \times 10^{13} \frac{\text{at}}{\text{m}^3} \text{ I33}$$

$$B_{TE} \left[\frac{\text{Ci}}{\text{m}^3} \right] = 3,68 \times 10^{13} \frac{1}{\text{m}^3} \cdot \frac{1}{3,7 \times 10^{10} \frac{1}{\text{S Ci}}} \cdot 9,2 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{S}} =$$

$$= 9,15 \times 10^{-3} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

$$B_{TE} = 9,15 \times 10^{-3} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

III.1.f- A la salida del reactor:

Por lo demostrado en III.1.b

$$B_{TS} \cong 9,15 \times 10^{-3} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

III.1.g- Con limpieza

A la entrada del reactor

$$B_{TE} = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{(1 - \frac{q}{F_L} \eta_R) e^{-\lambda_1 T}}{1 - [(1 - \frac{q}{F_L} \eta_R) e^{-\lambda_1 T}]}$$

$$\text{si } B = 1 - \frac{q}{F_L} = 0,9989; \quad \frac{B}{1-B} = \frac{0,9989}{1-0,9989} = 9,08 \times 10^2$$

$$\eta_1 = 1$$

$$e^{-\lambda_1 T} \cong 1$$

$$B_{TE} = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{B}{1-B}$$

$$B_{TE} = \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 6,5 \times 2 \times 10^{14} \times 7,13 \times 10^4 \times 10^{-8}}{0,0213 \times 0,9 \times 100} \times$$

$$\times 9,08 \times 10^2 = 4 \times 10^{12} \frac{\text{átomos I-133}}{\text{m}^3}$$

$$B_{TE} \left[\frac{\text{Ci}}{\text{m}^3} \right] = 4 \times 10^{12} \frac{1}{\text{m}^3} \times 9,2 \times 10^{-6} \frac{1}{\text{s}} \frac{1}{3,7 \times 10^{10} \frac{1}{\text{Ci} \cdot \text{s}}}$$

$$B_{TE} = 9,95 \times 10^{-4} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

$$B_{TE} = 9,95 \times 10^{-4} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

A la salida del reactor:

$$B_{TS} = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{1 - [(1 - \frac{q}{F_L} \eta) e^{-\lambda T}]} \cong$$

$$\cong \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{\frac{q}{F_L}} =$$

$$= \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 6,5 \times 2 \times 10^{14} \times 7,13 \times 10^4 \times 10^8}{0,0213 \times 0,9 \times 100} \quad 9,09 \times 10^2$$

$$= 4 \times 10^{12} \frac{\text{átomos I 133}}{m^3}$$

$$B_{TS} \left[\frac{Ci}{m^3} \right] = 4 \times 10^{12} \times 9,2 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3,7 \times 10^{10}} =$$

$$= 9,96 \times 10^{-4} \frac{Ci}{m^3}$$

$$B_{TS} = 9,96 \times 10^{-4} \frac{Ci}{m^3}$$

IV- RELACIONES DE CONCENTRACION I-133/I-131 EN EL REFRIGERANTE PRIMARIO

IV.1- Análisis de la relación a la salida del reactor.

IV.1.a- Sin limpieza del medio refrigerante

De la expresión 11)

$$B_T \left[\frac{\text{átomos}}{m^3} \right] = \frac{k \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{1-a}$$

Para I-133:

$$B_{T133} = \frac{k_1 \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\lambda_1 T}} \approx \frac{k_1 \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{\lambda_1 T}$$

dado que $\lambda_1 T \ll 1$

Para I-131:

$$B_{T131} = \frac{k_2 \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\lambda_2 T}} \approx \frac{k_2 \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f} \cdot \frac{1}{\lambda_2 T}$$

dado que $\lambda_2 T \ll 1$

De la expresión definida en V.c

$$k_1 = \eta_1 \sigma_F N_0 \quad k_2 = \eta_2 \sigma_F N_0$$

reemplazando en las expresiones de B_{T133} y B_{T131} y efectuando el cociente:

$$\begin{aligned} \frac{B_{T133}}{B_{T131}} &= \frac{\frac{k_1 \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f \lambda_1 T}}{\frac{k_2 \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f \lambda_2 T}} = \frac{\frac{k_1}{\lambda_1}}{\frac{k_2}{\lambda_2}} = \frac{\frac{\eta_1 \cdot \sigma_F \cdot N_0}{\lambda_1}}{\frac{\eta_2 \cdot \sigma_F \cdot N_0}{\lambda_2}} = \frac{\frac{\eta_1}{\lambda_1}}{\frac{\eta_2}{\lambda_2}} \\ &= \frac{\frac{6,62}{9,2 \times 10^{-6}}}{\frac{2,9}{1 \times 10^{-6}}} = \frac{7,195 \times 10^5}{2,9 \times 10^6} = 0,248 \end{aligned}$$

La expresión anterior da la relación entre los átomos de I-133 por m^3 de refrigerante y los átomos de I-131 por m^3 de refrigerante, cuando estas concentraciones se encuentran en equilibrio y son solo debidas a la contaminación de las vainas. Resulta más práctico expresar la relación de concentraciones en C_i/m^3 :

$$\frac{B_{T133}}{B_{T131}} \left[\frac{Ci/m^3}{Ci/m^3} \right] = \frac{\eta_1}{\eta_2}$$

Reemplazando los rendimientos de fisión por sus valores:

$$\boxed{\frac{B_{T133}}{B_{T131}} \frac{[Ci/m^3]}{[Ci/m^3]} = \frac{6,5}{2,9} = 2,24} \quad \text{ó} \quad \boxed{\frac{B_{T131}}{B_{T133}} \frac{[Ci/m^3]}{[Ci/m^3]} = 0,446}$$

1)

IV.1.b- Con limpieza del medio refrigerante

Procediendo en forma similar con la expresión 11) pero ahora teniendo en cuenta que según la 7)

$$\alpha = \left(1 - \frac{q}{FL} \eta_R \right) e^{-\lambda T} \quad \eta_R \approx 1$$

$$\frac{B_{T133}}{B_{T131}} \frac{[at/m^3]}{[at/m^3]} = \frac{\frac{k_1 \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f}}{\frac{k_2 \bar{\phi} \cdot A \cdot x}{f}} \frac{\frac{1}{1 - [(1 - q/FL) e^{-\lambda_1 T}]}}{\frac{1}{1 - [(1 - q/FL) e^{-\lambda_2 T}]}} =$$

$$= \frac{\frac{k_1}{[1 - e^{-\lambda_1 T} + q/FL e^{-\lambda_1 T}]}}{\frac{k_2}{[1 - e^{-\lambda_2 T} + q/FL e^{-\lambda_2 T}]}} = \frac{\frac{k_1}{\lambda_1 T + q/FL e^{-\lambda_2 T}}}{\frac{k_2}{\lambda_2 T + q/FL e^{-\lambda_2 T}}}$$

$$\frac{B_{T133}}{B_{T131}} \frac{[at/m^3]}{[at/m^3]} = \frac{\frac{\eta_1}{1 - e^{-\lambda_2 T} + q/FL e^{-\lambda_1 T}}}{\frac{\eta_2}{1 - e^{-\lambda_2 T} + q/FL e^{-\lambda_2 T}}}$$

$$\boxed{\frac{B_{T133} [at/m^3]}{B_{T131} [at/m^3]} = \frac{\frac{\eta_1}{1 - e^{-\lambda_1 T} + q/FL e^{-\lambda_1 T}}}{\frac{\eta_2}{1 - e^{-\lambda_2 T} + q/FL e^{-\lambda_2 T}}}}$$

o bien:

$$\boxed{\frac{B_{T133} [Ci/m^3]}{B_{T131} [Ci/m^3]} = \frac{\frac{\eta_1 \lambda_1}{1 - e^{-\lambda_1 T} + q/FL e^{-\lambda_1 T}}}{\frac{\eta_2 \lambda_2}{1 - e^{-\lambda_2 T} + q/FL e^{-\lambda_2 T}}}} \quad 2)$$

Simplificación de las expresiones:

Se trabajará con la relación de actividades específicas $[Ci/m^3]$ por ser unidades de aplicación directa luego de efectuar mediciones en el refrigerante.

a) Si se supone $e^{-\lambda_1 T} \cong 1$; $e^{-\lambda_2 T} \cong 1$

$$(\lambda_1 T = 1,99 \times 10^{-4} ; \lambda_2 T = 1,3 \times 10^{-5})$$

La expresión 2) se transforma en:

$$\frac{B_T I_{133}}{B_T I_{131}} \frac{[Ci/m^3]}{[Ci/m^3]} = \frac{\frac{\eta_1 \lambda_1}{q/FL}}{\frac{\eta_2 \lambda_2}{q/FL}} = \frac{\eta_1 \lambda_1}{\eta_2 \lambda_2}$$

$$\boxed{\frac{B_T I_{133}}{B_T I_{131}} = \frac{[Ci/m^3]}{[Ci/m^3]} = 20,62}$$

3)

b) La 2) puede también escribirse:

$$\frac{B_T I_{133}}{B_T I_{131}} = \frac{\frac{\eta_1 \lambda_1}{\lambda_1 T + q/FL (1 - \lambda_1 T)}}{\frac{\eta_2 \lambda_2}{\lambda_2 T + q/FL (1 - \lambda_2 T)}}$$

desarrollando y dividiendo por T

$$\boxed{\frac{B_T I_{133}}{B_T I_{131}} = \frac{\frac{\eta_1 \lambda_1}{\lambda_1 + q/FL \cdot T - q\lambda_1/FL}}{\frac{\eta_2 \lambda_2}{\lambda_2 + q/FL \cdot T - q\lambda_2/FL}}}$$

reemplazando valores:

$$\frac{B_T I_{133}}{B_T I_{131}} \frac{[Ci/m^3]}{[Ci/m^3]} = 18,81 \quad 4)$$

c) Cohen P. "Water Cooland Technology of Power Reactors" Gordon and Breach Sc. Pub. 1969, presenta para el caso aquí tratado la expresión

$$\frac{B_T I_{133}}{B_T I_{131}} \frac{[Ci/m^3]}{[Ci/m^3]} = \frac{\frac{\eta_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \beta}}{\frac{\eta_2 \lambda_2}{\lambda_2 + \beta}} \quad 5)$$

Si se denomina $V [m^3]$ al volumen del circuito primario, se define la cuota de limpieza del sistema $\beta = \frac{q}{\delta \cdot V}$

q es el caudal de limpieza y δ es la densidad del D_2O

η_1 : rendimiento de fisión para el I-133

η_2 : rendimiento de fisión para el I-131

λ_1 : constante de decaimiento del I-133

λ_2 : constante del decaimiento del I-131

Entendemos que esta expresión proviene de un modelo más simple, tal como el representado en la figura 7..

Se supone todo el volumen (V) estático y solo se mueve agua con destino al sistema de limpieza y el regreso del mismo. De esta forma el refrigerante decae dentro del contenedor ideal de todo el volumen V sin que en este proceso figure un tiempo fijo en que el refrigerante se halla fuera del núcleo. Evidentemente que a su ingreso, el agua posee una cantidad de actividad menor que a su egreso, dada por el factor de supervivencia "a".

La variación de actividad en el tiempo para el I-133 y para el I-131 estará dada por las ecuaciones:

$$\frac{dB_{T \text{ I-133}}}{dt} = \frac{\eta_1 \sigma_F N_0 \bar{\phi} \lambda_1 \gamma_U}{3,7 \times 10^{10}} - \lambda_1 B_{T1} - \frac{\gamma}{\gamma_V} B_{T1}$$

$$\frac{dB_{T \text{ I-131}}}{dt} = \frac{\eta_2 \sigma_F N_0 \bar{\phi} \lambda_2 \gamma_U}{3,7 \times 10^{10}} - \lambda_2 B_{T2} - \frac{\gamma}{\gamma_V} B_{T2}$$

donde B_{T1} es equivalente a B_T I-133. En forma análoga B_{T2} respecto de B_T I-131.

En régimen estacionario:

$$\frac{dB_{T \text{ I-133}}}{dt} = 0 \quad \frac{dB_{T \text{ I-131}}}{dt} = 0$$

$$B_{T1} = \frac{\eta_1 \sigma_F N_0 \bar{\phi} \lambda_1 \gamma_U}{(\lambda_1 + \frac{\gamma \gamma}{V}) 3,7 \times 10^{10}} \quad B_{T2} = \frac{\eta_2 \sigma_F N_0 \bar{\phi} \lambda_2 \gamma_U}{(\lambda_2 + \frac{\gamma \gamma}{V}) 3,7 \times 10^{10}}$$

$$\frac{B_{T1}}{B_{T2}} \left[\frac{\text{Ci/m}^3}{\text{Ci/m}^3} \right] = \frac{\frac{\eta_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \gamma \gamma / V}}{\frac{\eta_2 \lambda_2}{\lambda_2 + \gamma \gamma / V}} = \frac{\frac{\eta_1 \lambda_1}{\lambda_1 + \beta}}{\frac{\eta_2 \lambda_2}{\lambda_2 + \beta}}$$

para el caso de Atucha:

$$\begin{aligned} \frac{B_{T1} [\text{Ci/m}^3]}{B_{T2} [\text{Ci/m}^3]} &= \frac{\frac{5,98 \times 10^{-5}}{9,2 \times 10^{-6} + 2,26 \times 10^{-5}}}{\frac{2,9 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-6} + 2,26 \times 10^{-5}}} = \frac{1,8805}{1,2238 \times 10^{-1}} = \\ &= \underline{\underline{15,30}} \end{aligned}$$

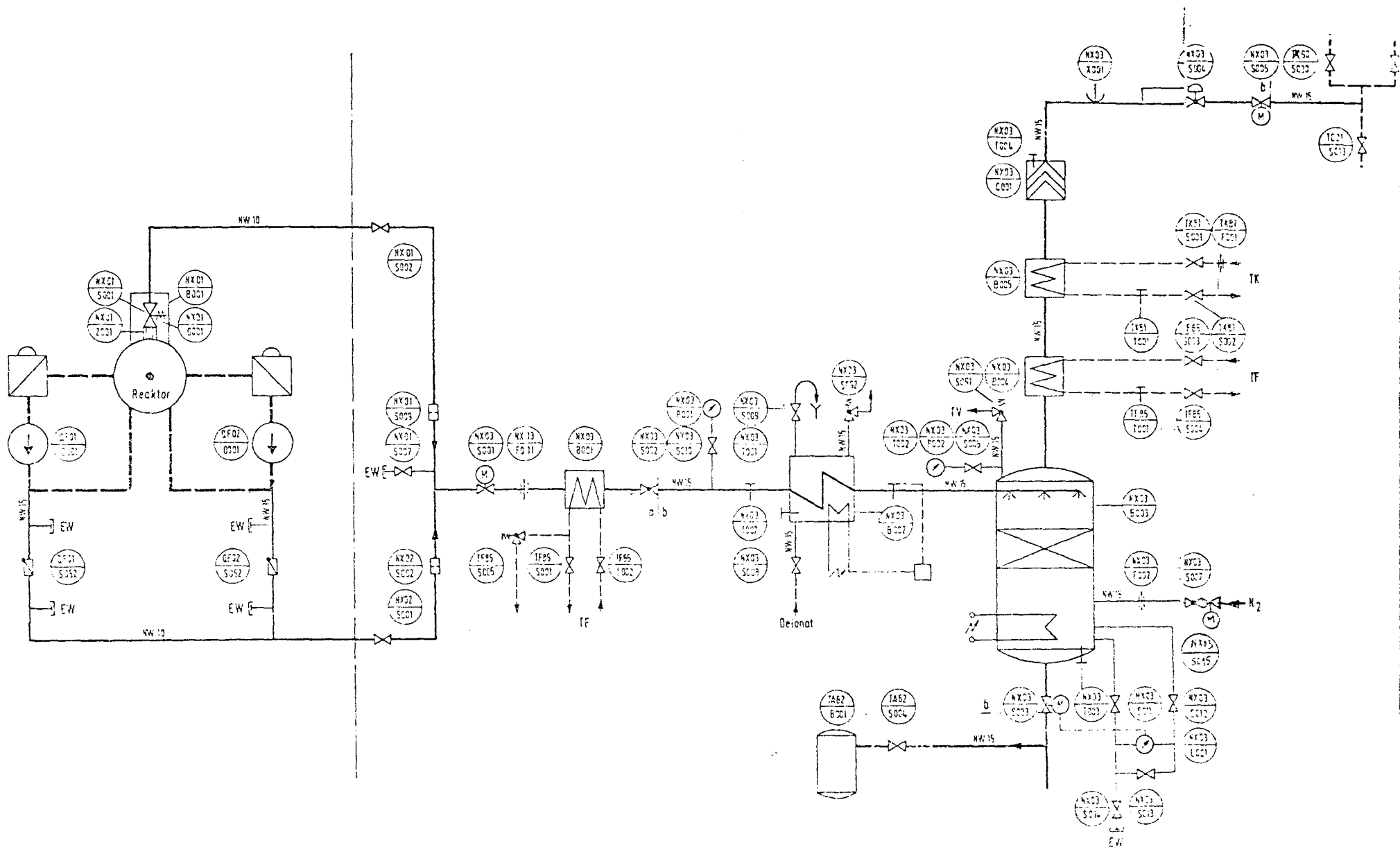


Fig.1

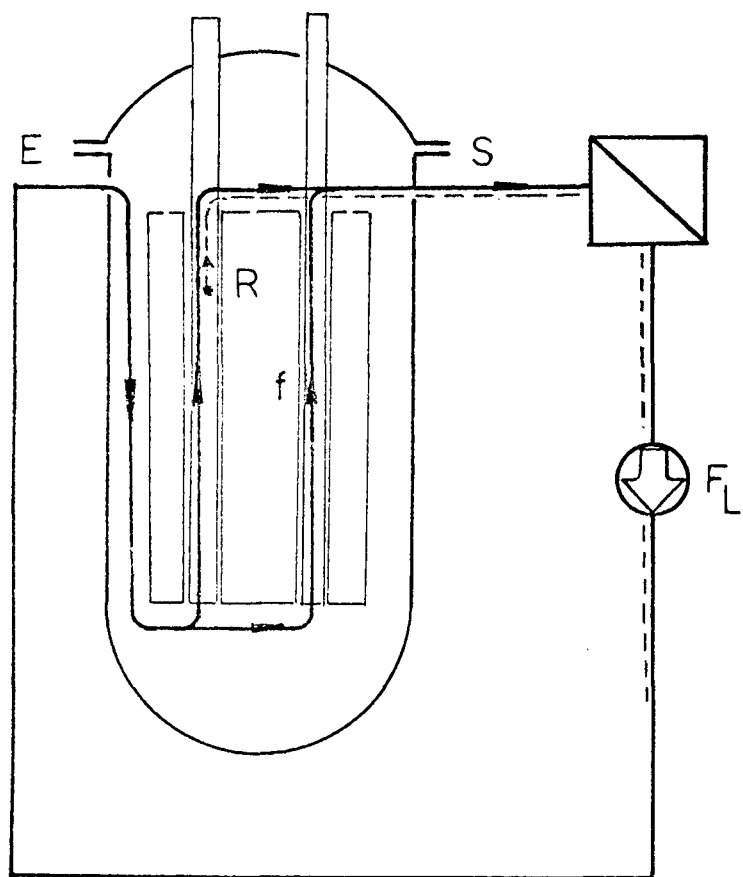


FIG. 2

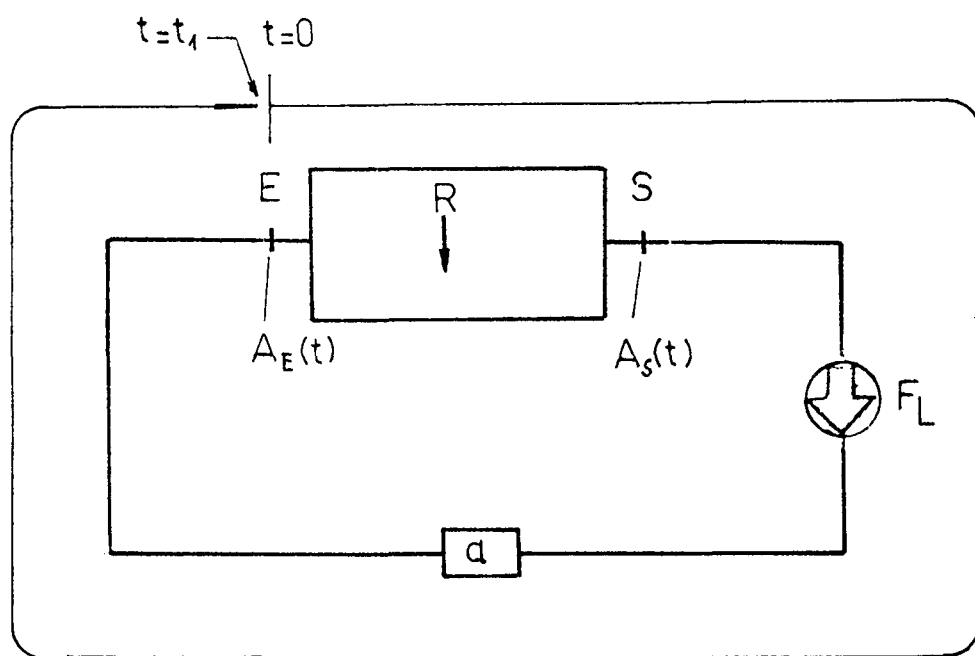


FIG. 3

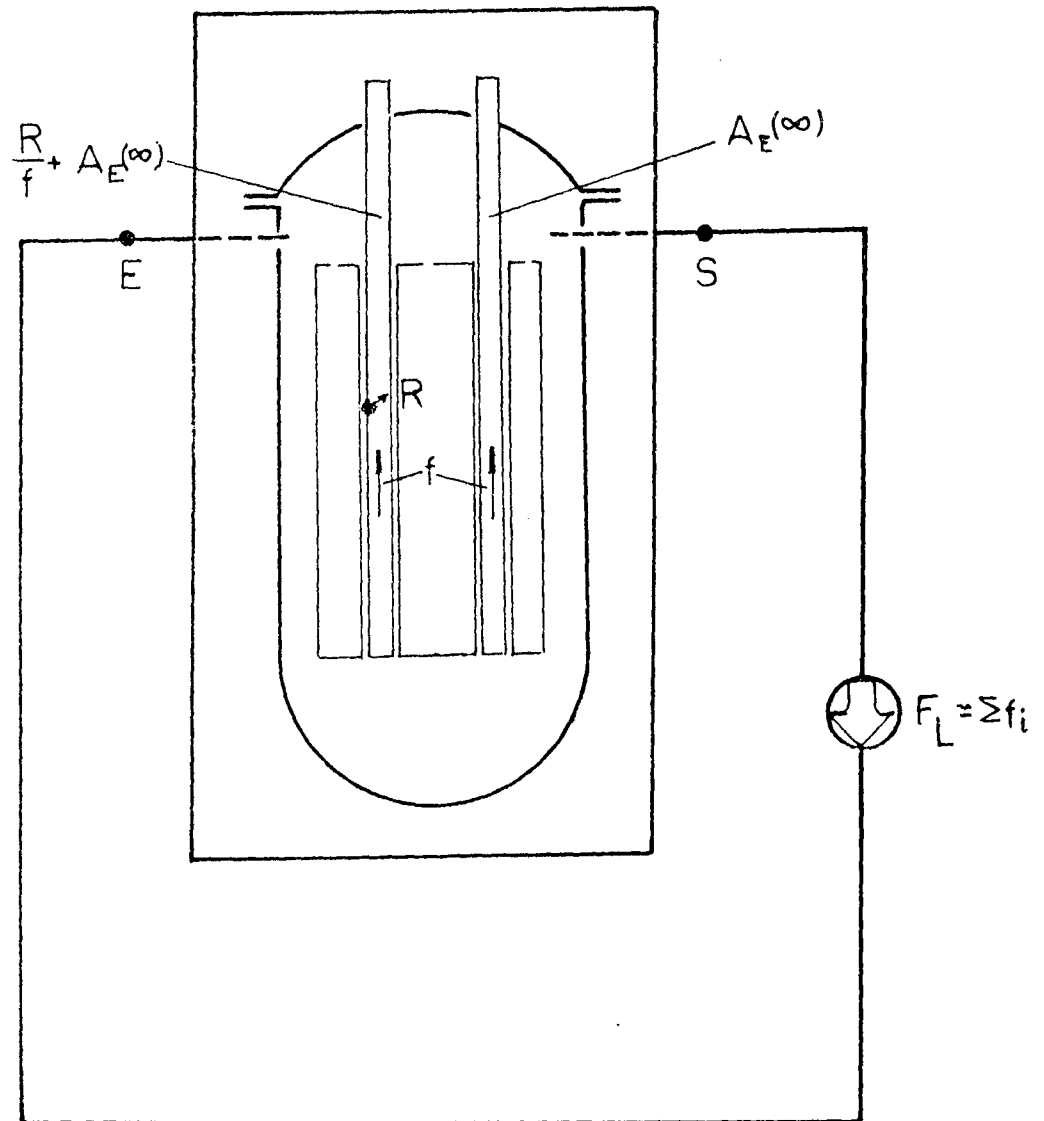
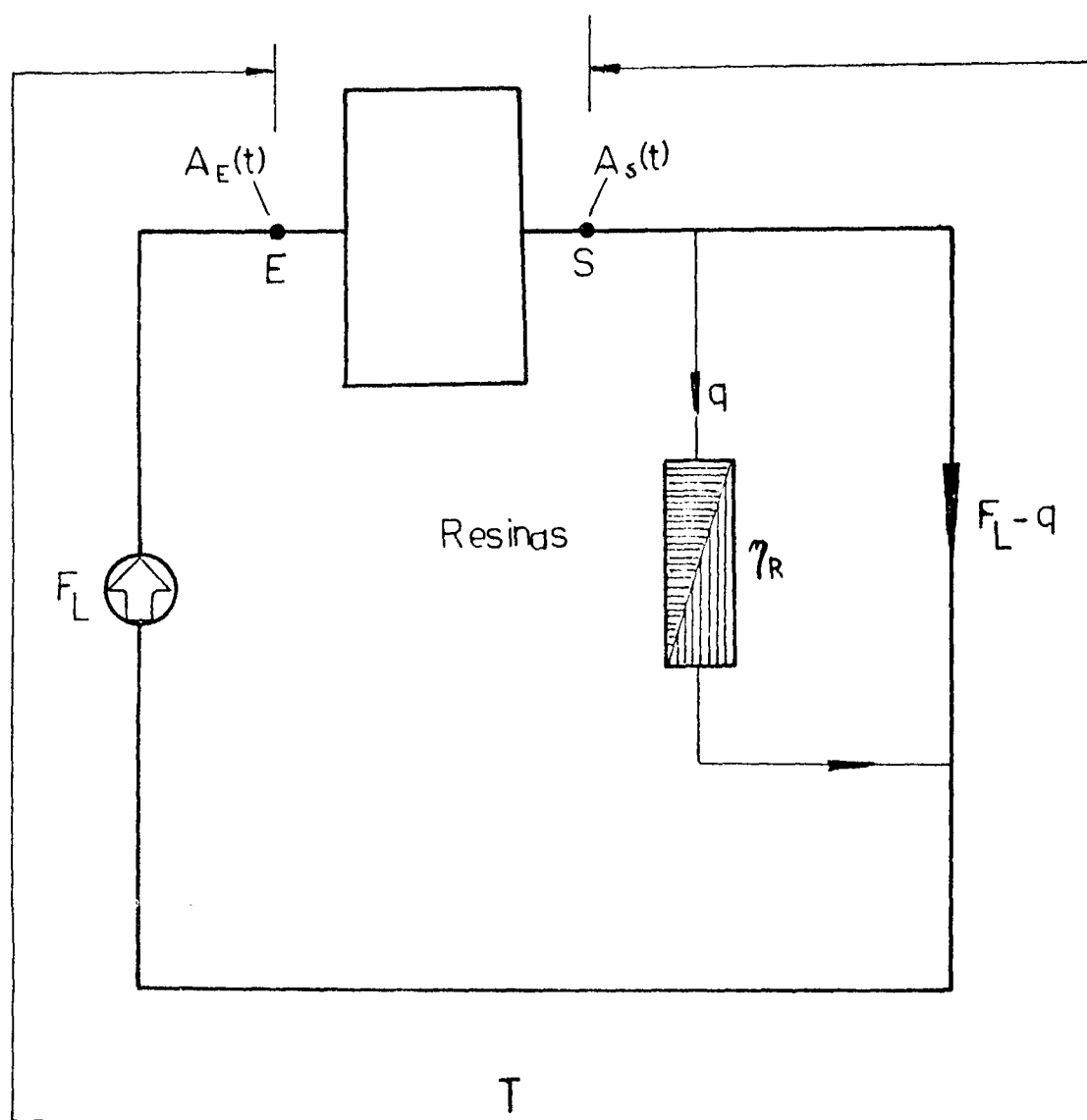


FIG. 4



FIG,5

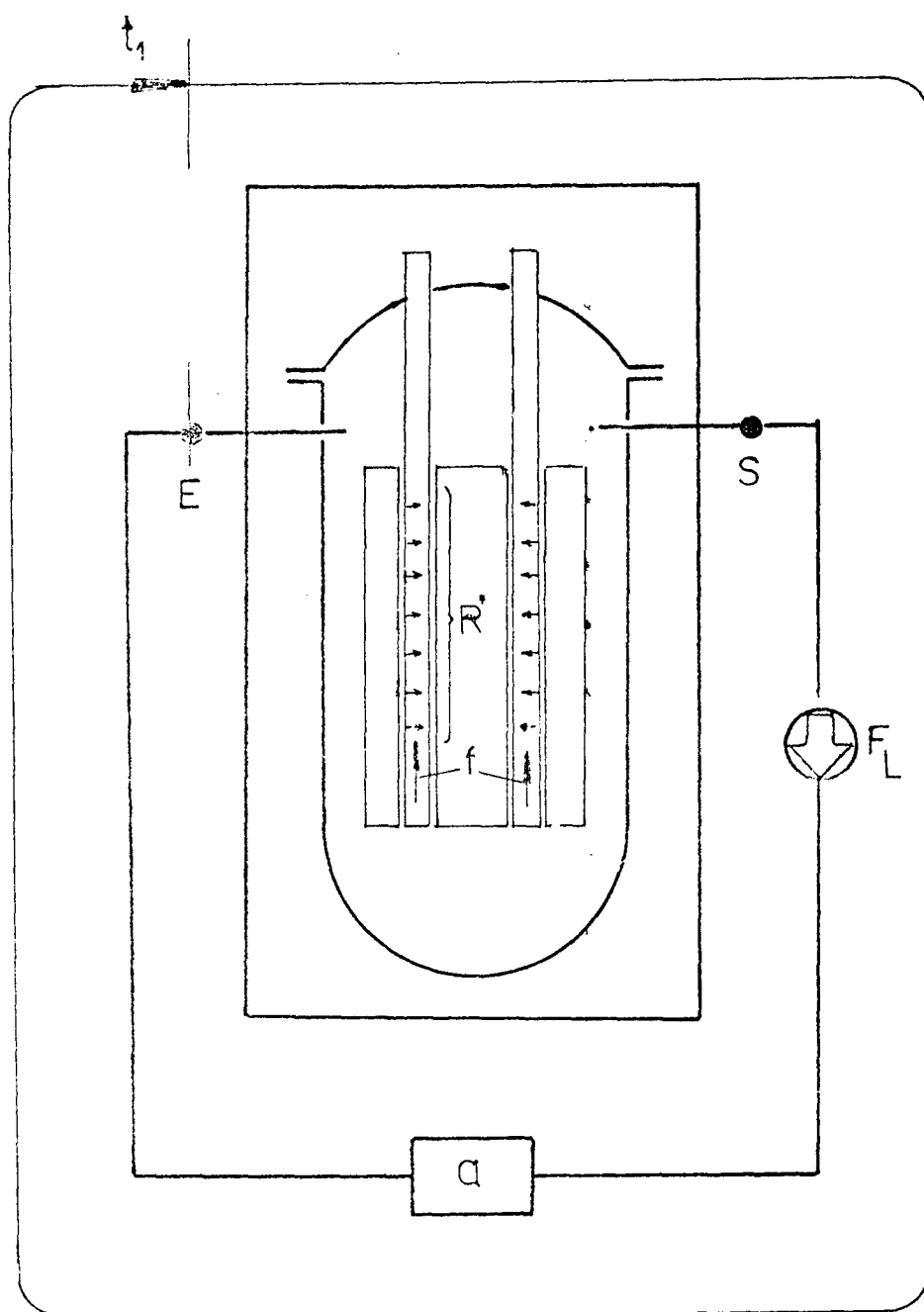


FIG. 6

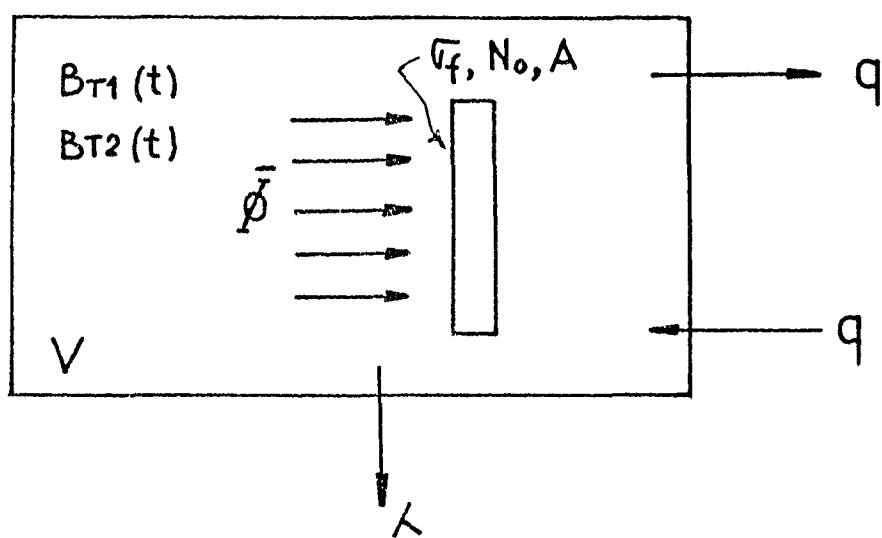


FIG. 7

V- APENDICE

- a) RD sin contaminación superficial de uranio en las vainas.
- b) RD con contaminación superficial de uranio en las vainas.
- c) Determinación de k.
- d) Datos de la Central Nuclear en Atucha a los efectos de la aplicación de las expresiones deducidas.

a) RD sin contaminación superficial de uranio en las vainas
(ver figura a.1)

Analizando la figura, se ve que en el canal intacto, el "fondo" será: $A_E (\infty) = \frac{R}{F_L} \frac{a}{1-a}$ (concentración igual a la entrada y a la salida del canal de refrigeración).

La concentración a la salida del canal averiado será:

$$(C [\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3}]):$$

$$C = \frac{R}{f} + A_E (\infty) = \frac{R}{F_L} \cdot \frac{a}{1-a} + \frac{R}{f} = \frac{R}{f} \left(\frac{f}{F_L} \frac{a}{1-a} + 1 \right)$$

$$R_D = \frac{\text{concentración actividad canal con avería}}{\text{concentración actividad canal intacto}}$$

$$R_D = \frac{\frac{R}{f} \left(\frac{f}{F_L} \frac{a}{1-a} + 1 \right)}{\frac{R}{F_L} \frac{a}{1-a}} = 1 + \frac{\frac{R}{f}}{\frac{R}{F_L} \frac{a}{1-a}}$$

$$R_D = 1 + \frac{\frac{R}{F_L}}{\frac{R}{F_L} \frac{a}{1-a}}$$

al)

b) RD con contaminación superficial de uranio en las vainas
(ver figura b1)

Analizando la figura, se ve que en el canal intacto, el "fondo" será:

$$A_E (\infty) + \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \cdot \frac{a}{1-a} + k \bar{\phi} A x = \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \left(1 + \frac{a}{1-a} \right) +$$

$$+ A_E (\infty) = \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \left(\frac{1}{1-a} \right) + \frac{R}{F_L} \frac{a}{1-a}$$

En el canal averiado, la concentración a la salida será:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{en}} &= B_T + A_E \left(\infty + \frac{R}{f} \right) = \\
 &= \frac{k \bar{\phi} A x \left(\frac{1}{1-a} \right)}{f} + \frac{R}{F_L} \frac{a}{1-a} + \frac{R}{f} \\
 R_D &= \frac{K_{\text{en}}}{B_T + A_E (\infty)} = \frac{\frac{1}{1-a} \left(\frac{R \cdot a}{F_L} + \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \right) + \frac{R}{f}}{\frac{1}{1-a} \left(\frac{R \cdot a}{F_L} + \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \right)} = \\
 &= 1 + \frac{R/f}{\frac{1}{1-a} \left(\frac{a \cdot f}{F_L} + \frac{k \bar{\phi} A x}{f} \right)} = \\
 &= 1 + \frac{1}{\frac{1}{1-a} \left(\frac{a \cdot f}{F_L} + \frac{k \bar{\phi} A x}{R} \right)}
 \end{aligned}$$

$$R_D = \frac{1}{\frac{a}{1-a} \frac{f}{F_L} + \frac{1}{1-a} \cdot \frac{k \bar{\phi} A x}{R}} \quad \text{b1}$$

c) Determinación de k

Si se designa con:

$\lambda \left[\frac{1}{s} \right]$: constante de decaimiento del producto de fisión considerado.

$\bar{\phi} \text{ [cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{]}$: flujo neutrónico térmico medio.

σ_f [cm^2] : sección eficaz de fisión

$\text{No} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{g U235}} \right]$: número de átomos de U235 por gramo de U235.

El rate de fisión será:

$$\eta \sigma_f \text{No} \cdot \bar{\phi} \frac{\text{átomo}}{\text{g U235}} \times \text{cm}^2 \times \frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}} \quad \text{c1)}$$

siendo η el rendimiento de fisión (valor absoluto).

$$\text{No} \cong \frac{6,03 \times 10^{23} \text{ at/mol}}{235 \text{ g/mol}} = 2,57 \times 10^{21} \frac{\text{átomos}}{\text{g de U235}}$$

El valor de k se calcula a partir de 1)

$$k = \eta \sigma_f \text{No} = \frac{\eta \sigma_f + 6,03 \times 10^{23}}{\text{Pa} [\text{g/mol}]}$$

siendo Pa el peso atómico del U235.

$$k' \left[\frac{\text{átomos}}{\text{s.g U235} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}}} \right] \cong \frac{\eta \times 580 \times 10^{-24} \times 6,03 \times 10^{23}}{235}$$

$$k \left[\frac{\text{átomos}}{\text{s.g U235} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}}} \right] = 1,48 \eta$$

c2)

Valor de k para uranio natural

Sabiendo que 1 g de U nat contiene 0,007 de U235, se tiene que:

1 g de U235 equivale a 142,85 g de U nat.

Reemplazando en la c2)

$$k \left[\frac{\text{átomos}}{\text{g Unat} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}}} \right] = \eta \times \frac{1,48}{142,85} = 0,01036 \eta$$

$$\therefore k \left[\frac{\text{átomo}}{\text{g Unat} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}}} \right] = 1,036 \times 10^{-2} \times \eta \quad \text{c3)}$$

Valor de k para el UO_2

Es en realidad este o el valor anterior de k los que interesan para reemplazar en la expresión 14*.

Se sabe que hay $\frac{0,88 \text{ g U nat}}{\text{g UO}_2}$ $\therefore 1 \text{ g U nat} = 1,1363 \text{ g UO}_2$

Reemplazando en la c3)

$$k \left[\frac{\text{átomos}}{\text{S} \cdot \text{g UO}_2 \frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}}} \right] = \frac{1,036 \times 10^{-2}}{1,1363} \eta = 9,1173 \times 10^{-3} \eta$$

$$k \left[\frac{\text{átomos}}{\text{S} \cdot \text{g UO}_2 \frac{1}{\text{cm}^2 \text{S}}} \right] = 9,1173 \times 10^{-3} \eta$$

* Según que la contaminación se exprese en g Unat/cm^2 o $\text{g UO}_2/\text{cm}^2$

d) Datos del combustible y del refrigerante

$$\bar{\phi} = 2 \times 10^{14} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{S}}$$

$$q = 22 \text{ t/h} \approx 20 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$F_L = 20.000 \text{ t/h} = 5,56 \text{ t/s} \approx 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\eta_R \approx 1$$

$$\bar{f} = \frac{19.400 \text{ t/h}}{253 \text{ canales}} = 76,68 \text{ t/h} = 0,0213 \text{ t/s}$$

$$T = 13 \text{ S}$$

$$X = 10^{-8} \text{ g UO}_2/\text{cm}^2$$

$$A = \pi \cdot d \cdot L \cdot n = 3,14 \times 1,19 \text{ cm} \times 530 \text{ cm} \times 36 = 7,13 \times 10^4 \text{ cm}^2$$

$$z = (38,6 \text{ t}/253) 0,007 = 1,067 \text{ Kg U235/elemento}$$

$$n = 36 \text{ barras/elemento combustible}$$

$$d = 1,19 \text{ cm (diámetro barra)}$$

$$L = 530 \text{ cm (longitud activa del elemento combustible)}$$

$$\sigma_{f_{\text{U235}}} = 580 \text{ barn} = 580 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

$$N_0 = \frac{6,03 \times 10^{23} \text{ at/mol}}{235 \text{ g/mol}} = 2,57 \times 10^{21} \text{ at/gr U235}$$

$$b = \frac{K}{K'} = 6,16 \times 10^{-3} \frac{\text{gU235}}{\text{g UO}_2}$$

$$V = 240 \text{ m}^3 \cong 270 \text{ t}$$

$$\beta = \frac{q}{V} = \frac{22 \text{ t/h}}{270 \text{ t}} = 0,0814 \text{ 1/h} = 2,26 \times 10^{-5} \frac{1}{s}$$

$$\delta \cong 1,125 \text{ t/m}^3$$

$$\frac{A.x.b}{z} = \frac{7.13 \times 10^{-4}}{1067} \cdot 6.16 \times 10^3 = 4,12 \times 10^{-9}$$

Datos de cálculo

$$\frac{q}{F_L} = 1,1 \times 10^{-3}$$

$$\eta_1 = 6,5\% \text{ (I-133)}$$

$$\eta_2 = 2,9\% \text{ (I-131)}$$

$$\lambda_1 = 9,2 \times 10^{-6} \frac{1}{s}$$

$$\lambda_2 = 1 \times 10^{-6} \frac{1}{s}$$

$$\lambda_1^T = 1,196 \times 10^{-4}$$

$$\lambda_2^T = 1,3 \times 10^{-5}$$

$$\frac{q}{F_L^T} = 8,46 \times 10^{-5} \frac{1}{s}$$

$$\eta_1 \lambda_1 = 5,98 \times 10^{-5} \frac{1}{s} \%$$

$$\eta_2 \lambda_2 = 2,9 \times 10^{-6} \frac{1}{s} \%$$

$$k = 9,1173 \eta$$

$$k_1 = 9,1173 \times 6,5 \times 10^{-3} = 5,93 \times 10^{-2} \frac{\text{at I-133}}{\text{s.g. UO}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ S}^{-1}}$$

$$k_2 = 9,1173 \times 2,9 \times 10^{-3} = 2,64 \times 10^{-2} \frac{\text{at I-131}}{\text{s.g. UO}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ S}^{-1}}$$

$$a_1 = \left(1 - \frac{q}{F_L}\right) e^{-\lambda_1 T} \cong (1 - 1,1 \times 10^{-3}) \cdot e^{-1,196 \times 10^{-4}} =$$

$$= 9,987805 \times 10^{-1}$$

$$a_2 = \left(1 - \frac{q}{F_L}\right) e^{-\lambda_2 T} \cong (1 - 1,1 \times 10^{-3}) \cdot e^{-1,3 \times 10^{-5}} =$$

$$= 9,988870 \times 10^{-1}$$

$$\frac{k_1 \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x \cdot \lambda_1}{f \cdot 3,7 \times 10^{10} \times 100} = \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 6,5 \times 7,13 \times 10^4 \times 9,2 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{14} \times 10^{-8}}{0,0213 \times 0,9 \times 3,7 \times 10^{10} \times 100}$$

$$= 1,09 \times 10^{-6}$$

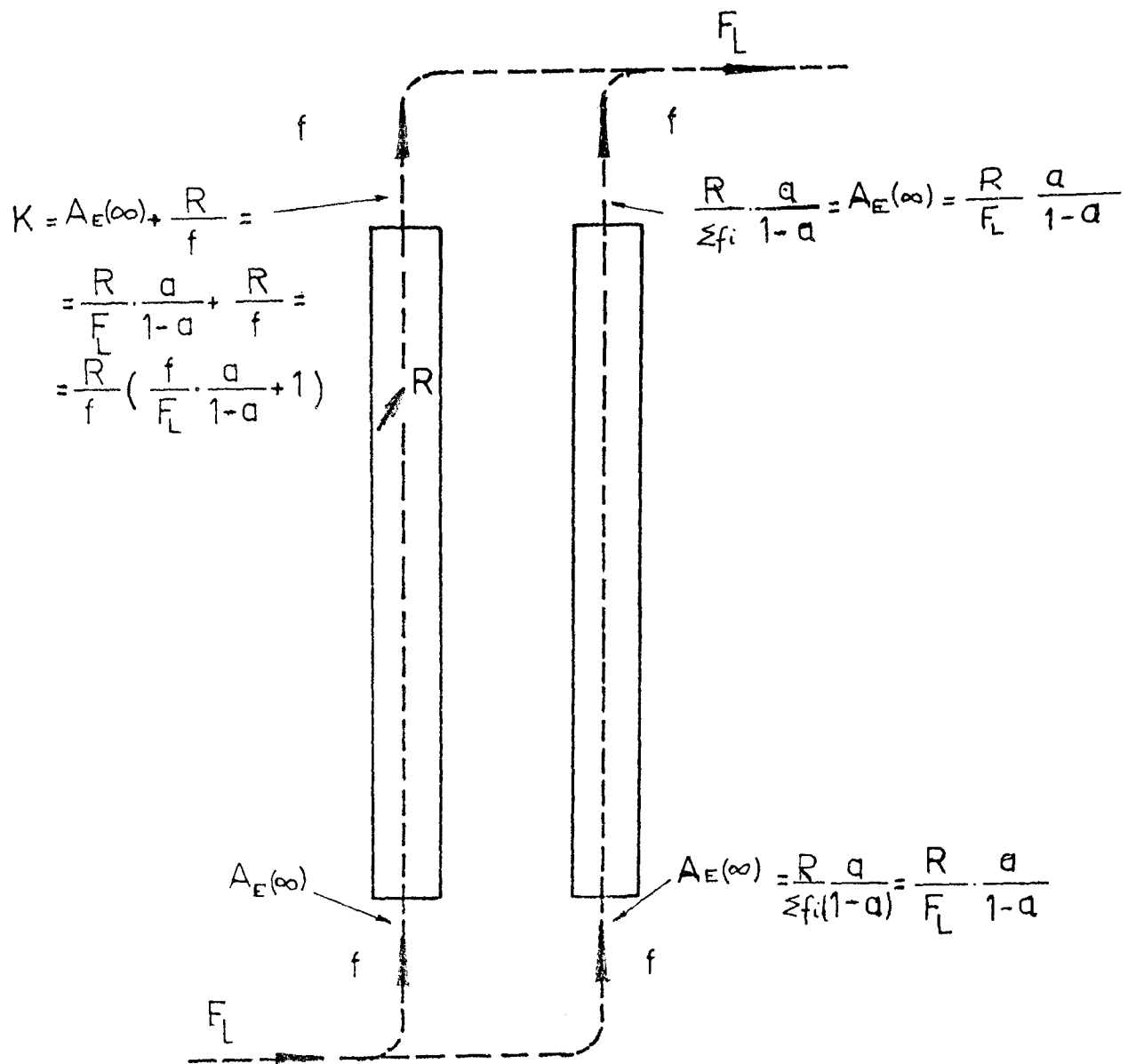
$$\frac{k_1 \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x \cdot \lambda_1 \cdot a_1}{f \cdot 3,7 \times 10^{10} \times 100} = 1,09 \times 10^2 \times (1 - 1,196 \times 10^{-4}) = 1,089 \times 10^{-6}$$

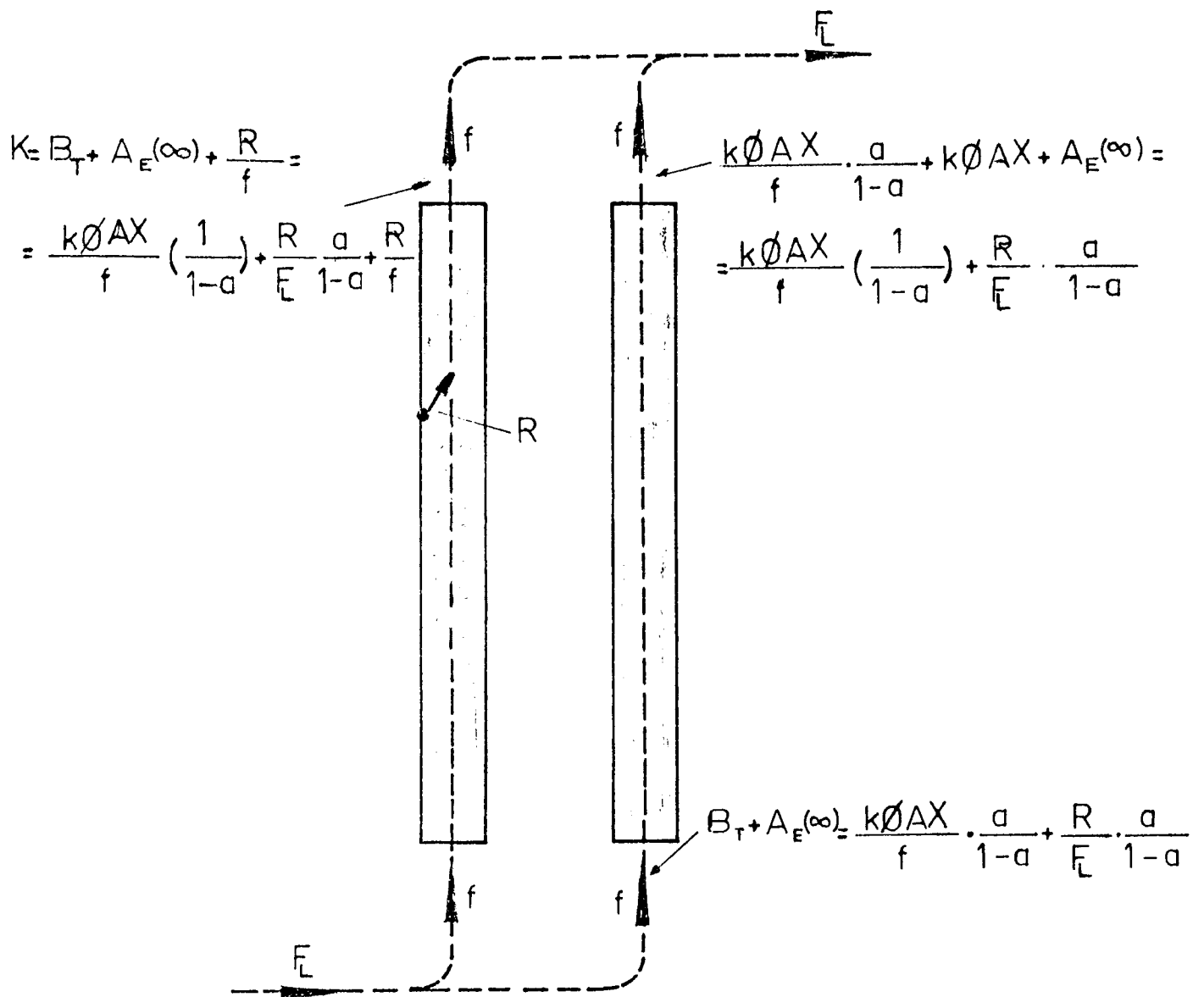
$$\frac{k_2 \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x \cdot \lambda_2}{f \cdot 3,7 \times 10^{10} \times 100} = \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 2,9 \times 7,13 \times 10^4 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{14} \times 10^{-8}}{0,0213 \times 0,9 \times 3,7 \times 10^{10} \times 100} =$$

$$= 5,317 \times 10^{-8} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{k_2 \cdot \bar{\phi} \cdot A \cdot x \cdot \lambda_2 \cdot a_2}{f \cdot 3,7 \times 10^{10} \times 100} = \frac{9,12 \times 10^{-3} \times 2,9 \times 2 \times 10^{14} \times 7,13 \times 10^4 \times 10^{-8}}{0,0213 \times 0,9 \times 3,7 \times 10^{10} \times 100}$$

$$\times 10^{-6} \times 9,988 \times 10^{-1} = 5,3108 \times 10^{-8} \frac{\text{Ci}}{\text{m}^3}$$

FIG. a₁

FIG. b₁