

XVII REUNION ANUAL SNE
Palma de Mallorca. Octubre 1991

18.09 INFLUENCIA DE LA VENTILACION EN LAS CONSECUENCIAS RADIOLOGICAS DE UN ACCIDENTE DE CRITICIDAD.

J. Guillermo Sánchez
Carolina Alvaro
Félix Recio

ENUSA, FABRICA DE JUZBADO
Apdo de correos 328
37080 SALAMANCA
FAX nº 923-314369

0. INTRODUCCION

En las operaciones con material fisiónable existe la posibilidad de que se produzca una reacción en cadena incontrolada, situación que se denomina accidente de criticidad. Un accidente de estas características no afectaría significativamente al público pero sí a las personas que se encontrasen a pocos metros del accidente. No tendría consecuencias destructivas para las instalaciones (la energía calorífica liberada en un accidente tipo es la equivalente a evaporar unos 10 litros de agua entre varios minutos y unas horas).

ENUSA realizó hace algunos años (ref. 1) un estudio sobre las consecuencias de un accidente de estas características en la Fábrica de Juzbado. Recientemente ha realizado una nueva evaluación aplicando una metodología mejorada, cuya principal característica es el dar crédito a la influencia del sistema de extracción de aire del área donde se postula que ocurre el accidente. Si bien el estudio está realizado para la Fábrica de Juzbado la metodología es aplicable a cualquier instalación donde se manipule material fisiónable.

El estudio desarrolla una metodología de cálculo que permite evaluar las dosis por inmersión en la nube en el recinto donde se produce el accidente teniendo en cuenta el caudal de extracción, el tiempo de retención de los isótopos en el recinto y las condiciones meteorológicas. Todo ello permitiría reducir apreciablemente la dosis al exterior actuando sobre el sistema de extracción.

1. CARACTERISTICAS GENERALES DE UN ACCIDENTE DE CRITICIDAD: DATOS DE PARTIDA

Según la bibliografía, (ref. 2 y 3) un accidente de criticidad con uranio de bajo enriquecimiento tendría las siguientes características radiológicas:

a) Fisiones producidas: En un primer instante se produciría una excursión nuclear que generaría el mayor número de fisiones (típicamente el 10% de las totales), seguida de excursiones sucesivas de menor intensidad pero que en el conjunto de todo el accidente supondrían el 90% de las fisiones totales. Los valores adoptados son los de la ref. 2 que da 10^{18} fisiones para una 1ª excursión seguida de 47 excursiones cada 10 minutos cada una de las cuales produciría $1,915 \times 10^{17}$ fisiones.

b) Productos de fisión generados: Se han utilizado los valores de la Tabla 1. Estos se han supuesto, de acuerdo con la ref. 2, constantes en cada uno de los dos intervalos considerados (de 0 a 0,5 horas y de 0,5 a 8 horas).

2. CONSECUENCIAS RADIOLOGICAS EN EL EXTERIOR E INTERIOR DE LA NAVE DE FABRICACION

Para el cálculo de la exposición a la irradiación directa siguen siendo aplicables los descritos en las ref. 1 y 2. En lo que sigue nos referiremos exclusivamente a la exposición a la nube. Para determinar la dosis por exposición a la nube se han supuesto tres periodos de emisión. En el APENDICE A se deducen las fórmulas empleadas.

1er Período. Corresponde al intervalo 0 - 0,5 horas

En este período la concentración en el recinto es debida al aporte continuo con una tasa de emisión cte., \dot{q}_{11} , de productos de fisión desde el elemento fuente menos la disminución de estos productos de fisión en el recinto por decaimiento radiactivo y por renovación del aire.

TABLA 1
 ACTIVIDADES (Ci) DE LOS NUCLEIDOS MAS IMPORTANTES
 EMITIDOS EN UN ACCIDENTE DE CRITICIDAD (Ref. 2)

| NUCLEIDO | SEMIPERODO | 0-0.5 H. | 0.5-8 H. | TOTAL |
|----------|------------|----------|----------|--------|
| Kr-83 m | 1.8 h. | 2.2E+1 | 1.4E+2 | 1.6E+2 |
| Kr-85 m | 4.5 h. | 2.1E+1 | 1.3E+2 | 1.5E+2 |
| Kr-85 | 10.7 h. | 2.2E-4 | 1.4E-3 | 1.6E-3 |
| Kr-87 | 76.3 a. | 1.4E+2 | 8.5E+2 | 9.9E+2 |
| Kr-88 | 2.8 h. | 9.1E+1 | 5.6E+2 | 6.5E+2 |
| Kr-89 | 3.2 m. | 5.9E+3 | 3.6E+4 | 4.2E+4 |
| Xe-131 m | 11.9 d. | 1.1E-2 | 7.0E-2 | 8.2E-2 |
| Xe-133 m | 2.0 d. | 2.5E-1 | 1.6E+0 | 1.8E+0 |
| Xe-133 | 5.2 d. | 3.8E+0 | 2.3E+1 | 2.7E+1 |
| Xe-135 m | 15.6 m. | 3.1E+2 | 1.9E+3 | 2.2E+3 |
| Xe-135 | 9.1 h. | 5.0E+1 | 3.1E+2 | 3.6E+2 |
| Xe-137 | 3.8 m. | 6.9E+3 | 4.2E+4 | 4.9E+4 |
| Xe-138 | 14.2 m. | 1.8E+3 | 1.1E+4 | 1.3E+4 |
| I-131 | 8.0 d. | 1.2E+0 | 7.5E+0 | 8.7E+0 |
| I-132 | 2.3 h. | 1.5E+2 | 9.5E+2 | 1.1E+3 |
| I-133 | 20.8 h. | 2.2E+1 | 1.4E+2 | 1.6E+2 |
| I-134 | 52.6 m. | 6.3E+2 | 3.9E+3 | 4.5E+3 |
| I-135 | 6.6 h. | 6.6E+1 | 4.0E+2 | 4.7E+2 |

La concentración media de cada isótopo en este período está dada por

$$\bar{C}_{1j} = \frac{\dot{q}_{1j} / V}{t_1 h_{e1j}} \left[t_1 - \frac{1}{h_{e1j}} (1 - e^{-h_{e1j} t_1}) \right] \quad (1)$$

\dot{q}_{1j} = Tasa de emisión de productos de fisión hacia el recinto.

V = Volumen del recinto.

t_1 = Duración del primer período.

h_{e1j} = Cte. de decaimiento efectiva = $h_{rj} + h_{f1}$

h_{rj} = Cte. de decaimiento radiactivo del isótopo.

h_{f1} = Cte. de renovación del aire en el recinto = Q_1/V . Con Q_1 caudal de extracción y V volumen del recinto.

2º Período. Corresponde al intervalo 0,5 a 8 horas.

La concentración en el interior del recinto durante este período es debida al aporte continuo de nuevos productos de fisión, más la presencia de productos emitidos durante el primer período, menos la disminución de productos radiactivos por decaimiento radiactivo y por renovación del aire.

La concentración media de cada isótopo en este período está dada por:

$$\bar{C}_2 = \frac{\dot{q}_{2j} / V}{t_2 h_{e2j}} \left[t_2 - \frac{1}{h_{e2j}} (1 - e^{-h_{e2j} t_2}) \right] + \frac{\dot{q}_{1j} / V}{h_{e1j} h_{e2j} t_2} (1 - e^{-h_{e1j} t_1}) (1 - e^{-h_{e2j} t_2}) \quad (2)$$

\dot{q}_{2j} = Tasa de emisión durante este período.

t_2 = Duración del segundo período.

$h_{e2j} = h_{rj} + Q_2/V$

El significado de los restantes términos se ha especificado anteriormente.

3º Período. Corresponde al intervalo de 8 a 24 horas.

En este período no hay liberación de nuevos productos de fisión en el recinto pero persisten parte de los liberados en el 1º y 2º período que van disminuyendo por decaimiento radiactivo y por renovación del aire.

La concentración media de cada isótopo en este período está dada por:

$$\bar{C}_{3j} = \frac{\dot{q}_{1j}/V}{h_{e11} h_{e12} \cdot t_3} (1 - e^{-h_{e11} t_1}) e^{-h_{e12} t_2} (1 - e^{-h_{e13} t_3}) + \frac{\dot{q}_{2j}/V}{h_{e12} h_{e13} \cdot t_3} (1 - e^{-h_{e12} t_2}) (1 - e^{-h_{e13} t_3}) \quad (3)$$

$$h_{e13} = h_{1r} + Q_3/V$$

t_3 = Duración del tercer período.

El significado de los restantes términos se ha especificado anteriormente.

Conociendo las concentraciones medias en el interior del recinto a lo largo de cada período se calculan las tasas de emisión del modo siguiente:

$$\dot{q}_{ejk} = \bar{C}_{1jk} \cdot Q_k \quad (4)$$

\bar{C}_{1jk} = Concentración media del isótopo j en el interior de la dependencia donde se produce el accidente durante el período k .

Q_k = Caudal de extracción durante el período k .

Las concentraciones medias en exterior, \bar{C}_{ejk} , de la Nave de Fabricación se han estimado de acuerdo con la ecuación:

$$\bar{C}_{ejk}(t) = \dot{q}_{ejk} \cdot e^{-hr_j} \cdot t_r \cdot X/Q$$

\dot{q}_{ejk} = Tasa de emisión al exterior del isótopo j durante el período k

hr_j = cte de decaimiento radiactivo del isótopo j .

t_r = tiempo que tarda en recorrer el viento la distancia d que hay desde el punto de emisión hasta el punto de exposición.

X/Q = es el coeficiente de dilución en el punto de exposición. Por sencillez en el cálculo se ha empleado 10^{-3} s/m³, describiéndose posteriormente un método para obtener las concentraciones con otros valores de X/Q .

Conocidas las concentraciones y supuesta la permanencia de personas durante todo el tiempo del accidente en los puntos en los que se han calculado éstas, es fácil estimar las dosis por exposición a la nube, tanto en el interior como en el exterior.

3. CONCLUSIONES

Aplicando la metodología anterior a la Fábrica de Juzbado se han obtenido las conclusiones que a continuación se indican:

- a) La dosis por irradiación directa sería el camino de exposición más importante de las personas que estuviesen sin protección a pocos metros del accidente. (El cálculo de la irradiación directa no se incluye en la ponencia, la metodología de cálculo es una aplicación directa de la Ref. 2).
- b) El Sistema de detección del accidente no evitaría la dosis recibida durante la primera excursión crítica, pero sí la debida a las excursiones siguientes que suponen el 90% de la dosis total.
- c) Parar el sistema de extracción, de forma que los productos de fisión se retengan en el interior del edificio varias horas, reduciría apreciablemente las dosis potenciales a la población sin apenas influir en las dosis recibidas en el interior de la instalación, si la evacuación se hace rápidamente.

4. REFERENCIAS

1. Estudio de Seguridad de la Fábrica de Juzbado (rev. 5, Julio 1990)
2. R.G. 3.34 (rev. 1) "Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of Accidental Nuclear Criticality in a Uranium Fuel Fabrication Plant" (July 1979)
3. W.R. Stratton "Review of Criticality Incidents", La-3611, (Jan-1967)

APENDICE A

APENDICE A

DETERMINACION DE LA CONCENTRACION MEDIA DE ACTIVIDAD EXISTENTE EN EL RECINTO.

En este apéndice se describe como se ha determinado la concentración media de actividad existente en el recinto.

Las hipótesis utilizadas son las siguientes:

- El accidente se produce en un recinto con un volumen V (cm^3) y con un caudal de extracción (forzada o natural) Q (m^3/s), liberándose como consecuencia del mismo las cantidades de radionucleidos que se detallan en la tabla 1.

No se han considerado los descendientes de los isótopos indicados en la tabla 1 por los motivos siguientes:

- a) La mayoría de los isótopos padres pasan directamente a ser isótopos estables o poseen un período de semidesintegración muy largo comparado con la duración del accidente (24 horas) (P. ej. Kr-83m, Kr-85m, Kr-85, etc)
 - b) Los isótopos hijos son mucho más estables que los padres, por lo que su influencia relativa es escasa (P. ej. Xe-135, I-133, etc)
 - c) En los casos que no se cumpla a) o b) (Kr-88, Xe-138, I-135) tienen una contribución pequeña a la dosis total. El incluirlo en el cálculo habría complicado excesivamente éste sin que variase significativamente el resultado final. Sin duda su influencia sería mucho menor que otras incertidumbres incluidas en las hipótesis.
- Se supone que la emisión de radionucleidos desde el elemento fuente al interior del recinto se produce en tres períodos:

- 1^{er} período de 0 s. a 1800 s. (0,5 h), con tasa de emisión cte. \dot{q}_1

• 2º período de 1800 s. (0,5 h) a 28.800 s. (8 h), con tasa de emisión cte. Q_2 .

• 3º período de 28.800 s. (8 h) a 86.400 s. (24 h), no se produce ninguna emisión.

- Se da crédito al decaimiento radiactivo de los radioisótopos.

- Se tiene en cuenta que hay una renovación del aire en el recinto como consecuencia de la extracción (forzada o natural)

- El problema a efectos de cálculo se trata como dos problemas separados:

• Uno para las emisiones que se producen en el 1º período (0 a 0,5 h)

• Otro para las emisiones que se producen en el 2º período (0,5 a 8 h)

Se quiere calcular cual es la concentración de actividad $C_j(t)$ existente en el recinto en un instante de tiempo t . Como la concentración de actividad existente en el recinto es debida a las emisiones que se producen entre 0 y 0,5 horas y entre 0,5 y 8 horas vamos a dividir el problema en dos:

(1) Concentración de la Actividad debida a la emisión que se produce desde el elemento fuente al recinto en el 1º período (entre 0 y 0,5 horas)

(2) Concentración de la Actividad debida a la emisión que se produce desde el elemento fuente al recinto en el 2º período (entre 0,5 y 8 horas)

Evidentemente la actividad existente en el recinto será en cualquier instante t la suma de (1) y (2).

1. Evolución de la concentración de la actividad existente en el recinto debida a la emisión que se produce en el 1º periodo (entre 0 y 0,5 h)

Si llamamos :

V: Volumen del recinto (m³)

Q₁: Caudal de extracción (natural o forzada) (m³/s) entre 0 y 0,5 h.

Q₂: Caudal de extracción (natural o forzada) (m³/s) entre 0,5 y 8 h.

Q₃: Caudal de extracción (natural o forzada) (m³/s) entre 8 y 24 h.

C_{1j}(t): Concentración de actividad existente en el área en el instante de tiempo t (Bq/m³)

q̇_{1j}: Tasa de emisión del radioisótopo j entre 0 - 0,5 h (Bq/s)
(ver tabla 1)

hr_j: Cte. de decaimiento del radioisótopo j (1/s)

Tendríamos que:

a) De 0 a 0,5 horas

Variación de C_j(t) debida a la emisión desde el elemento fuente

$$C_j(t+dt) = C_j(t) + \frac{\dot{q}_{1j}}{V} dt$$

$$dC_j(t)/dt = \frac{\dot{q}_{1j}}{V}$$

Variación de C_j(t) debida al decaimiento radiactivo

$$C_j(t+dt) = C_j(t) - hr_j C_j(t) dt$$

$$dC_j(t)/dt = - hr_j C_j(t)$$

Variación de C_j(t) debida a las renovaciones de aire

$$C_j(t+dt) = C_j(t) - hr_1 C_j(t) dt$$

$$dC_j(t)/dt = - hr_1 C_j(t)$$

donde $hr_1 = Q_1/V = \text{cte. de renovación del aire en el recinto durante el 1º periodo.}$

Luego

$$dC_J(t)/dt = \frac{\dot{q}_{1J}}{V} - h_{rJ} C_J(t) dt - h_{f1} C_J(t) dt$$

$$dC_J(t)/dt = \frac{\dot{q}_{1J}}{V} - h_{eJ1} C_J(t)$$

donde $h_{eJ1} = h_{rJ} + h_{f1}$ que denominamos constante de decaimiento efectiva durante el primer periodo.

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$C_J(t) = \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1} V} + Cte. e^{-h_{eJ1}t}$$

$$\text{Como } C_J(0) = 0 \quad \rightarrow \quad Cte = - \frac{\dot{q}_{1J}}{V h_{eJ1}}$$

Luego la concentración de actividad entre 0 y 0,5 horas en el recinto en el que se produce el accidente es

$$C_J(t) = \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1} V} (1 - e^{-h_{eJ1}t})$$

b) De 0,5 a 8 horas

Variación de $C_J(t)$ debida a la emisión desde el elemento fuente

No hay variación de $C_J(t)$ porque no hay emisión.

Variación de $C_J(t)$ debida al decaimiento radiactivo

$$C_J(t+dt) = C_J(t) - h_{rJ} C_J(t)dt$$

$$dC_J(t)/dt = - h_{rJ} C_J(t)$$

Variación de $C_J(t)$ debida a las renovaciones de aire

$$C_J(t+dt) = C_J(t) - h_{f2} C_J(t) dt.$$

$$dC_J(t)/dt = - h_{f2} C_J(t)$$

donde $h_{F2} = Q_2/V = \text{cte.}$ de renovación del aire en el recinto durante el 2º período.

Luego

$$dC_J(t)/dt = -h_{rJ} C_J(t) - h_{F2} C_J(t)$$

$$dC_J(t)/dt = -h_{eJ2} C_J(t)$$

con $h_{eJ2} = h_{rJ} + h_{F2}$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$C_J(t) = e^{-h_{eJ2}t} \cdot \text{cte}$$

Para determinar cual es la cte. de integración basta recordar que en el instante inicial de esta etapa (1800 seg = 0,5 horas) la concentración en el área es (Ver apartado a).

$$C_J(t = 1800\text{seg}) = \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1V}} (1 - e^{-h_{eJ1} 1800})$$

y por tanto

$$\frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1V}} (1 - e^{-h_{eJ1} 1800}) = \text{cte.}$$

Luego la concentración de actividad entre 0,5 y 8 horas en el recinto en el que se produce el accidente, teniendo sólo en cuenta la emisión habida durante la primera media hora, es:

$$C_J(t) = \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1V}} (1 - e^{-h_{eJ1} 1800}) e^{-h_{eJ2}t}$$

c) de 8 a 24 horas.

Variación de $C_J(t)$ debida a la emisión desde el elemento fuente.

No hay variación de $C_J(t)$ porque no hay emisión.

Variación de $C_j(t)$ debida al decaimiento radiactivo.

$$C_j(t+dt) = C_j(t) - h_{rj} C_j(t)dt$$

$$dC_j(t)/dt = -h_{rj} C_j(t)$$

Variación de $C_j(t)$ debida a las renovaciones de aire.

$$C_j(t+dt) = C_j(t) - h_{r3} dt C_j(t)$$

$$dC_j(t)/dt = -h_{r3} C_j(t)$$

donde $h_{r3} = Q_3/V$: cte de renovación del aire en el recinto durante el 3^{er} período.

Luego: $dC_j(t)/dt = -h_{rj} C_j(t) - h_{r3} C_j(t)$

$$dC_j(t)/dt = -h_{ejs} C_j(t)$$

donde

$$h_{ejs} = h_{rj} + h_{r3}$$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$C_j(t) = \text{cte } e^{-h_{ejs} t}$$

Para determinar cual es la cte. de integración basta recordar que en el instante inicial de esta etapa [(28800 - 1800) seg] la concentración en el área es (ver apartado b):

$$C_j(27000 \text{ seg}) = \frac{\dot{q}_{1j}}{h_{ejs} V} (1 - e^{-h_{ejs} 1800}) e^{-h_{ejs} 27000}$$

Luego la actividad entre 8 y 24 horas en el recinto en el que se produce el accidente, teniendo en cuenta sólo la emisión habida durante la primera media hora, es:

$$C_j(t) = \frac{Q_{1j}}{h_{e1jV}} (1 - e^{-h_{e1j} 1800}) e^{-h_{e2j} 27000} e^{-h_{e3j} t}$$

2. Evolución de la concentración de la actividad existente en el recinto debida a la emisión que se produce en el 2º período (entre 0,5 y 8 horas)

Si llamamos:

V: Volumen del recinto (m^3)

Q_2 : Caudal de extracción (natural o forzado) (m^3/s) entre 0,5 y 8 h.

Q_3 : Caudal de extracción (natural o forzado) (m^3/s) entre 8 y 24 h.

$C_j(t)$: Concentración de actividad existente en el área en el instante de tiempo t (Bq/m^3)

\dot{q}_{2j} : Tasa de emisión del radioisótopo j entre 0,5 y 8 horas (Bq/s)
(ver tabla 1)

h_{rj} : Cte de decaimiento del radioisótopo j ($1/s$)

Tendremos que:

a) De 0,5 a 8 horas

Variación de $C_j(t)$ debida a la emisión desde el elemento fuente

$$C_j(t + dt) = C_j(t) + \frac{\dot{q}_{2j}}{V} dt$$
$$dC_j(t)/dt = \dot{q}_{2j}/V$$

Variación de $C_j(t)$ debida al decaimiento radiactivo.

$$C_j(t+dt) = C_j(t) - h_{rj} C_j(t) dt$$

$$dC_j(t)/dt = -h_{rj} C_j(t)$$

Variación de $C_j(t)$ debida a las renovaciones de aire.

$$C_j(t+dt) = C_j(t) - h_{r2} C_j(t) dt$$

$$dC_j(t)/dt = -h_{r2} C_j(t)$$

donde h_{r2} : Q_2/V : Cte. de renovación del aire en el recinto durante el 2º período.

Luego

$$dC_J(t)/dt = \dot{q}_{2J}/V - h_{rJ} C_J(t) - h_{f2} C_J(t)$$

$$dC_J(t)/dt = \dot{q}_{2J}/V - h_{eJ2} C_J(t)$$

$$\text{con } h_{eJ2} = h_{rJ} + h_{f2}$$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$C_J(t) = \frac{\dot{q}_{2J}}{h_{eJ2} V} + \text{cte. } e^{-h_{eJ2} t}$$

$$\text{Como } C_J(0) = 0 \Rightarrow \text{cte.} = - \frac{\dot{q}_{2J}}{h_{eJ2} V}$$

Luego entre 0,5 y 8 horas la concentración de actividad en el recinto, ocasionada por la emisión habida durante el citado período es:

$$C_J(t) = \frac{\dot{q}_{2J}}{h_{eJ2} V} (1 - e^{-h_{eJ2} t})$$

b) De 8 a 24 horas

Variación de $C_J(t)$ debida a la emisión desde el elemento fuente.

No hay variación de $C_J(t)$ porque no hay emisión.

Variación de $C_J(t)$ debida al decaimiento radiactivo.

$$C_J(t+dt) = C_J(t) - h_{rJ} C_J(t) dt$$

$$dC_J(t)/dt = -h_{rJ} C_J(t)$$

Variación de $C_J(t)$ debida a las renovaciones de aire.

$$C_J(t+dt) = C_J(t) - h_{f2} C_J(t) dt$$

$$dC_J(t)/dt = -h_{f2} C_J(t)$$

donde h_{f2} : Q_3/V : cte. de renovación del aire en el recinto durante el 3^{er} período.

Luego

$$dC_j(t)/dt = -hr_j C_j(t) - hr_3 C_j(t)$$

$$dC_j(t)/dt = -he_{j3} C_j(t)$$

donde $he_{j3} = hr_j + hr_3$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$C_j(t) = e^{-he_{j3} t} \cdot \text{cte.}$$

Como en el instante inicial de esta etapa la concentración en el área es (ver apartado a):

$$C_j([28800 - 1800] \text{ seg}) = \frac{\dot{q}_{2j}}{he_{j2} V} (1 - e^{-he_{j2} 27000})$$

$$\text{cte} = \frac{\dot{q}_{2j}}{he_{j2} V} (1 - e^{-he_{j2} 27000})$$

Luego entre 8 y 24 horas la actividad en el recinto debida a la emisión habida entre 0,5 y 8 horas es:

$$C_j(t) = \frac{\dot{q}_{2j}}{he_{j2} V} (1 - e^{-he_{j2} 27000}) e^{-he_{j3} t}$$

3. Concentración de actividades en el interior del recinto

A partir de las ecuaciones recogidas en los apartados 1 y 2 se pueden calcular fácilmente las concentraciones de actividad en el área en los distintos periodos sin más que sumar las debidas a la emisión habida entre 0 y 0,5 horas (ver apartado 1) y las debidas a la emisión habida entre 0,5 y 8 horas (ver apartado 2).

1) Concentración de actividad en el área entre 0 y 0,5 horas.

$$C_J(t) = \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1}V} (1 - e^{-h_{eJ1}t})$$

2) Concentración de actividad en el área entre 0,5 y 8 horas.

$$C_J(t) = \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1}V} (1 - e^{-h_{eJ1} 1800}) e^{-h_{eJ2}t} \\ + \frac{\dot{q}_{2J}}{h_{eJ2}V} (1 - e^{-h_{eJ2}t})$$

3) Concentración de actividad en el área entre 8 y 24 horas:

$$C_J(t) = \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1}V} (1 - e^{-h_{eJ1} 1800}) e^{-h_{eJ2} 2700} e^{-h_{eJ3}t} \\ + \frac{\dot{q}_{2J}}{h_{eJ2}V} (1 - e^{-h_{eJ2} 2700}) e^{-h_{eJ3}t}$$

4. Concentración media de actividad en el interior del recinto en los tres periodos

A partir de los resultados obtenidos para la concentración de actividad existente en el recinto en los tres periodos estudiados podemos calcular las concentraciones medias de actividad aplicando, a los periodos considerados, la ecuación:

$$\bar{C} = \frac{1}{T} \int_0^T C(t) dt$$

Concentración media de actividad en el 1^{er} periodo (\bar{C}_{1J})

$$\begin{aligned} & \int_0^{1800} \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1} V} (1 - e^{-h_{eJ1} t}) dt \\ &= \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1}} \frac{1}{V \times 1800} \left[1800 + \frac{1}{h_{eJ1}} e^{-h_{eJ1} \cdot 1800} - \frac{1}{h_{eJ1}} \right] \end{aligned}$$

$$\bar{C}_{1J} = \frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1} V 1800} \left[1800 + \frac{1}{h_{eJ1}} (1 - e^{-h_{eJ1} \cdot 1800}) \right]$$

Concentración media de actividad en el 2^o periodo (\bar{C}_{2J})

$$\begin{aligned} & \frac{1}{27000} \int_0^{27000} \left[\frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1} V} (1 - e^{-h_{eJ1} \cdot 1800}) e^{-h_{eJ1} \cdot 1800} e^{-h_{eJ2} t} + \frac{\dot{q}_{2J}}{h_{eJ2} V} (1 - e^{-h_{eJ2} t}) \right] dt = \\ &= \left[\frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1} V} (1 - e^{-h_{eJ1} \cdot 1800}) \frac{1}{h_{eJ2}} (1 - e^{-h_{eJ2} \cdot 27000}) \right. \\ & \left. + \frac{\dot{q}_{2J}}{h_{eJ2} V} \left(27000 + \frac{1}{h_{eJ2}} e^{-h_{eJ2} \cdot 27000} - \frac{1}{h_{eJ2}} \right) \right] \frac{1}{27000} \end{aligned}$$

$$\bar{C}_{2J} = \left[\frac{\dot{q}_{1J}}{h_{eJ1} h_{eJ2} V} (1 - e^{-h_{eJ1} \cdot 1800}) (1 - e^{-h_{eJ2} \cdot 27000}) + \frac{\dot{q}_{2J}}{h_{eJ2} V} \left[27000 + \frac{1}{h_{eJ2}} (1 - e^{-h_{eJ2} \cdot 27000}) \right] \right] \frac{1}{27000}$$

Concentración media de actividad en el 3^{er} período (\bar{C}_{3j})

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{57600} \int_0^{57600} \left[\frac{\dot{Q}_{1j}}{h_{ej1}V} (1 - e^{-h_{ej1} \cdot 1800}) e^{-h_{ej2} \cdot 27000} e^{-h_{ej3}t} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\dot{Q}_{2j}}{h_{ej2}V} (1 - e^{-h_{ej2} \cdot 27000}) e^{-h_{ej3}t} \right] dt \\
 &= \left[\frac{\dot{Q}_{1j}}{h_{ej1}V} (1 - e^{-h_{ej1} \cdot 1800}) e^{-h_{ej2} \cdot 27000} \frac{1}{h_{ej3}} (1 - e^{-h_{ej3} \cdot 57600}) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\dot{Q}_{2j}}{h_{ej2}V} (1 - e^{-h_{ej2} \cdot 27000}) \frac{1}{h_{ej3}V} (1 - e^{-h_{ej3} \cdot 57600}) \right] \frac{1}{57600}
 \end{aligned}$$

| |
|---|
| $ \bar{C}_{3j} = \left[\frac{\dot{Q}_{1j}}{h_{ej1} h_{ej3} V} (1 - e^{-h_{ej1} \cdot 1800}) e^{-h_{ej2} \cdot 2700} (1 - e^{-h_{ej3} \cdot 57600}) \right. $ $ \left. + \frac{\dot{Q}_{2j}}{h_{ej2} h_{ej3} V} (1 - e^{-h_{ej2} \cdot 27000}) (1 - e^{-h_{ej3} \cdot 57600}) \right] \frac{1}{57600} $ |
|---|

18-09

**INFLUENCIA DE LA VENTILACION
EN LAS CONSECUENCIAS RADIOLOGICAS
DE UN ACCIDENTE DE CRITICIDAD**

J. G. SANCHEZ, C. ALVARO y F. RECIO

ENUSA, FABRICA DE JUZBADO

INTRODUCCION

En las operaciones con material fisiónable existe la posibilidad de que se produzca una reacción en cadena incontrolada, situación que se denomina **accidente de criticidad**. Un accidente de estas características no afectaría significativamente al público, pero sí al que se encontrase a pocos metros del accidente. No tendría consecuencias destructivas para las instalaciones (la energía calorífica liberada en un accidente tipo es la equivalente a evaporar unos 10 l. de agua entre varios minutos y unas horas).

ENUSA realizó hace algunos años (1) un estudio sobre las consecuencias de un accidente de estas características en la Fábrica de Juzbado. Recientemente ha realizado una nueva evaluación aplicando una metodología mejorada, cuya principal característica es el dar crédito a la influencia del sistema de extracción de aire del área donde se postula que ocurre el accidente. Si bien el estudio está realizado para la Fábrica de Juzbado la metodología es aplicable a cualquier instalación donde se manipule material fisiónable.

El estudio ha demostrado que utilizando apropiadamente el sistema de extracción, las emisiones radiactivas al exterior de la Instalación pueden reducirse apreciablemente sin apenas aumentar la dosis en el interior del recinto.

**CARACTERISTICAS GENERALES DE UN ACCIDENTE
DE CRITICIDAD: DATOS DE PARTIDA**

Según la bibliografía (2 y 3), un accidente de criticidad con uranio de bajo enriquecimiento tendría las siguientes características radiológicas:

- a) **Fisiones producidas:** En un primer instante se produciría una excursión nuclear que generaría el mayor número de

fisiones (típicamente el 10% de las totales), seguida de excursiones sucesivas de menor intensidad, pero que en el conjunto de todo el accidente supondrían el 90% de las fisiones totales. Los valores adoptados son los de la referencia 2, que da 10^8 fisiones para una primera excursión, seguida de 47 excursiones cada 10 minutos, cada una de las cuales produciría $1,915 \times 10^{17}$ fisiones.

- b) **Productos de fisión generados:** Se han utilizado los valores de la tabla 1. Estos se han supuesto, de acuerdo con la referencia 2, constantes en cada uno de los dos intervalos considerados (de 0 a 0,5 horas y de 0,5 a 8 horas).

TABLA 1
Actividades (Ci) de los nucleidos más importantes emitidos en un accidente de criticidad (2)

| Nucleido | Semiperíodo | 0-0,5 h. | 0,5-8 h. | Total |
|-----------|-------------|----------|----------|--------|
| Kr-83 m. | 1,8 h. | 2,2E+1 | 1,4E+2 | 1,6E+2 |
| Kr-85 m. | 4,5 h. | 2,1E+1 | 1,3E+2 | 1,5E+2 |
| Kr-85 | 10,7 h. | 2,2E-4 | 1,4E-3 | 1,6E-3 |
| Kr-87 | 76,3 a. | 1,4E+2 | 8,5E+2 | 9,9E+2 |
| Kr-88 | 2,8 h. | 9,1E+1 | 5,6E+2 | 6,5E+2 |
| Kr-89 | 3,2 m. | 5,9E+3 | 3,6E+4 | 4,2E+4 |
| Xe-131 m. | 11,9 d. | 1,1E-2 | 7,0E-2 | 8,2E-2 |
| Xe-133 m. | 2,0 d. | 2,5E-1 | 1,6E+0 | 1,8E+0 |
| Xe-133 | 5,2 d. | 3,8E+0 | 2,3E+1 | 2,7E+1 |
| Xe-135 m. | 15,6 m. | 3,1E+2 | 1,9E+3 | 2,2E+3 |
| Xe-135 | 9,1 h. | 5,0E+1 | 3,1E+2 | 3,6E+2 |
| Xe-137 | 3,8 m. | 6,9E+3 | 4,2E+4 | 4,9E+4 |
| Xe-138 | 14,2 m. | 1,8E+3 | 1,1E+4 | 1,3E+4 |
| I-131 | 8,0 d. | 1,2E+0 | 7,5E+0 | 8,7E+0 |
| I-132 | 2,3 h. | 1,5E+2 | 9,5E+2 | 1,1E+3 |
| I-133 | 20,8 h. | 2,2E+1 | 1,4E+2 | 1,6E+2 |
| I-134 | 52,6 m. | 6,3E+2 | 3,9E+3 | 4,5E+3 |
| I-135 | 6,6 h. | 6,6E+1 | 4,0E+2 | 4,7E+2 |

CONSECUENCIAS RADIOLOGICAS EN EL EXTERIOR E INTERIOR DE LA NAVE DE FABRICACION

Para el cálculo de la exposición a la irradiación directa siguen siendo aplicables los descritos en las referencias 1 y 2. En lo que sigue nos referimos exclusivamente a la exposición a la nube. Para determinar las dosis por exposición a la nube se han supuesto tres períodos de emisión:

Primer período. Corresponde al intervalo 0-0,5 horas

En este período, la concentración en el recinto es debida al aporte continuo con una tasa de emisión cte. q_{i1} de productos de fisión desde el elemento fuente menos la disminución de estos productos de fisión en el recinto por decaimiento radiactivo y por renovación del aire. La concentración media de cada isótopo en este período está dada por

$$\bar{C}_{i1} = \frac{q_{i1}/V}{t_1 h_{e1}} \left[t_1 - \frac{1}{h_{e1}} (1 - e^{-h_{e1} t_1}) \right] \quad (1)$$

q_{i1} = Tasa de emisión de productos de fisión hacia el recinto.
 V = Volumen del recinto.
 t_1 = Duración de la emisión durante este período.
 h_{e1} = Cte. de decaimiento efectiva = $h_{i1} + h_{r1}$.
 h_{i1} = Cte. de decaimiento radiactivo del isótopo.
 h_{r1} = Cte. de renovación del aire en el recinto = Q_1/V . Con Q_1 caudal de extracción y V volumen del recinto.

Segundo período. Corresponde al intervalo 0,5 a 8 horas

La concentración en el interior del recinto durante este período es debida al aporte continuo de nuevos productos de fisión más la presencia de productos emitidos durante el primer período menos la disminución de productos radiactivos por decaimiento radiactivo y por renovación del aire. La concentración media de cada isótopo en este período está dada por:

$$\bar{C}_{i2} = \frac{q_{i2}/V}{t_2 h_{e2}} \left[t_2 - \frac{1}{h_{e2}} (1 - e^{-h_{e2} t_2}) \right] + \frac{q_{i1}/V}{h_{e1} h_{e2} t_2} (1 - e^{-h_{e1} t_1}) (1 - e^{-h_{e2} t_2}) \quad (2)$$

q_{i2} = Tasa de emisión durante este período.
 t_2 = Duración del segundo período.
 $h_{e2} = h_{i2} + Q_2/V$.

El significado de los restantes términos se ha especificado anteriormente.

Tercer período. Corresponde al intervalo de 8 a 24 horas

En este período no hay liberación de nuevos productos de fisión en el recinto, pero persisten parte de los liberados en el primer y segundo período que van disminuyendo por decaimiento radiactivo y por renovación del aire. La concentración media de cada isótopo en este período está dada por:

$$\bar{C}_{i3} = \frac{q_{i1}/V}{h_{e1} h_{e3}} (1 - e^{-h_{e1} t_1}) e^{-h_{e2} t_2} (1 - e^{-h_{e3} t_3}) + \frac{q_{i2}/V}{h_{e2} h_{e3}} (1 - e^{-h_{e2} t_2}) (1 - e^{-h_{e3} t_3}) \quad (3)$$

$h_{e3} = h_{i3} + Q_3/V$.
 t_3 = Duración del tercer período.

El significado de los restantes términos se ha especificado anteriormente. Conociendo las concentraciones medias en el interior del recinto a lo largo de cada período se calculan las tasas de emisión del modo siguiente:

$$q_{ijk} = \bar{C}_{ijk} \cdot Q_k \quad (4)$$

\bar{C}_{ijk} = Concentración media del isótopo j en el interior de la dependencia donde se produce el accidente durante el período k .
 Q_k = Caudal de extracción durante el período k .

Las concentraciones medias en exterior (\bar{C}_{ijk}) de la Nave de Fabricación se han estimado de acuerdo con la ecuación:

$$\bar{C}_{ijk}(t) = q_{ijk} \cdot e^{-h_{i1} t} X/Q$$

q_{ijk} = Tasa de emisión al exterior del isótopo j durante el período k .
 h_{i1} = Cte. de decaimiento radiactivo del isótopo j .
 t = Tiempo que tarda en recorrer el viento la distancia d que hay desde el punto de emisión hasta el punto de exposición.
 X/Q = Es el coeficiente de dilución en el punto de exposición.

Las concentraciones así obtenidas, y supuesta la permanencia de personas durante todo el tiempo del accidente en los

puntos en los que se han calculado éstas, es fácil estimar las dosis por exposición a la nube, tanto en el interior como en el exterior.

CONCLUSIONES

Las conclusiones más importantes que se sacan de este estudio son:

- a) La dosis por irradiación directa sería el camino de exposición más importante de las personas que estuviesen sin protección a pocos metros del accidente.
- b) El sistema de detección del accidente no evitaría la dosis recibida durante la primera excursión crítica, pero sí la debida a las excursiones siguientes, que suponen el 90% de la dosis total.
- c) Para el sistema de extracción, de forma que los productos de fisión se retengan en el interior del edificio varias horas, reduciría apreciablemente las dosis potenciales a la población sin apenas influir en las dosis recibidas en el interior de la instalación, si la evacuación se hace rápidamente.

REFERENCIAS

- (1) "Consecuencias radiológicas de un accidente de criticidad". XII Reunión SNE, 1986.
- (2) R. G. 3.34 (rev. 1). "Assumptions Used for Evaluating the Potential Radiological Consequences of Accidental Nuclear Criticality in a Uranium Fuel Fabrication Plant". July 1979.
- (3) W. R. STRATTON: "Review of Criticality Incidents". LA-3611, January 1967.