

Análisis del accidente ocurrido en el conjunto crítico RA-2

POR DORVAL, E.L.; LESTANI, H.A.; MÁRQUEZ DAMIÁN J.I.

Protección Radiológica - Instituto Balseiro

31/05/2004

Resumen

Se ha llevado a cabo un trabajo de análisis global sobre el accidente ocurrido en el Conjunto Crítico RA-2 del Centro Atómico Constituyentes en el año 1983, que culminó con la muerte de un operador y la exposición y la irradiación externa de otros 8 operarios más. Se desarrollan los aspectos fundamentales del incidente desde el punto de vista de la Protección Radiológica: descripción de los eventos; dosis involucradas; evolución de los afectados; acciones implementadas al respecto; lecciones aprendidas.

INTRODUCCIÓN

El 23 de Setiembre de 1983, mientras se llevaba a cabo un cambio en la configuración del núcleo en el conjunto crítico RA-2 (en el Centro Atómico Constituyentes) tuvo lugar un accidente de criticidad. Este accidente causó la muerte del operador por sobreexposición y dosis menores a las personas que se encontraban en la sala de control y en los laboratorios circundantes.

DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES

El reactor RA-2 es un arreglo crítico de configuración variable con elementos combustibles tipo MTR de uranio enriquecido al 90%; utiliza agua liviana como moderador y grafito y agua liviana como reflector, y tiene una potencia nominal de 0.1 W. El control se realiza mediante el movimiento de elementos combustibles en los que 4 de sus 19 placas combustibles fueron reemplazadas por 2 placas de cadmio. Se encuentra ubicado en un contenedor de aluminio cilíndrico de 2 m de diámetro y una altura de 1.50 m, con su superficie superior libre para permitir el acceso al núcleo para las operaciones de modificación de la configuración.

DESCRIPCIÓN DEL ACCIDENTE

La tarde del viernes 23 de Setiembre de 1983 se había planeado modificar la configuración para llevar a cabo un experimento con una técnica de fuente pulsada. Las figuras 1 y 2 muestran la configuración inicial y la que se deseaba obtener.

De acuerdo con el procedimiento de la operación era necesario evacuar totalmente el moderador, pero esto se había hecho parcialmente. Luego, mientras se realizaban las operaciones de modificación en el arreglo ocurrió una excursión de criticidad.

Análisis del accidente

Las causas básicas del accidente, según las conclusiones de la comisión de investigación formada en la CNEA fueron las siguientes [2]:

- El moderador no había sido removido en su totalidad antes de llevar a cabo el cambio en la configuración.
- Dos elementos combustibles que debían haber sido removidos fueron dejados dentro del reactor, en contacto con el reflector de grafito.
- Las secuencias en los cambios de posición se llevaron a cabo reduciendo la subcriticidad del sistema.

	G	G	G	G	G	G	G		
	G	C	C	BC	C	C	G		
	G	C	C	C	C	C	G		
	G	C	C	C	C	C	G		
	G	C	C	BC	C	C	G		
	G	G	G	G	G	G	G		

Figura 1. Configuración previa del núcleo [1].

	G	G	G	G	G	G	G		
	G	BC	C	C	C	BC	G		
	G	C	C	C	C	C	G		
	G	C	C	C	C	C	G		
	G	BC	C	C	C	BC	G		
	G	G	G	G	G	G	G		

Figura 2. Configuración buscada [1].

- d) Dos elementos combustibles con 15 placas fueron insertados sin sus correspondientes placas de cadmio. El segundo elemento se encontraba introducido sólo parcialmente y se considera que durante esta inserción se produjo el accidente.
- e) Todas las operaciones se llevaron a cabo en ausencia del oficial de seguridad y del supervisor de las operaciones.

DOSIMETRÍA [3]

La evaluación dosimétrica del personal debió realizarse por métodos indirectos ya que ninguna de las 13 personas presentes portaba un dosímetro personal (éstos se encontraban colgados en su panel).

Los datos fueron obtenidos de la actividad inducida de Na^{24} en muestras de sangre y tejido, de P^{32} en muestras de pelo y la activación de efectos personales (anillos, cadenas, llaves, ropa, etc); y de mediciones de dosímetros personales (marcado 3 en la figura 3) y dosímetros de área (marcados 1 y 2 en la figura 3).

La metodología utilizada para estimar la dosis absorbida, consistió en el uso de distintos métodos de evaluación basados en:

1. el uso de los valores de activación en la sangre y de azufre en el pelo y las características de la facilidad crítica;
2. el conocimiento de las componentes térmicas, epitérmicas y rápidas de la fluencia de neutrones y la aplicación de factores de conversión en tejido equivalente;
3. la aplicación de un AERE-R 74787;

4. el uso de la relación entre dosis absorbida de gammas y neutrones;
5. la determinación del factor de dureza (R) de mediciones de P^{32} en pelo y Na^{24} en tejido:

$$R = \frac{D_{\text{térmica}} + D_{\text{epitérmica}}}{D_{\text{rápida}}}$$

6. la medición del ritmo de dosis absorbida gamma, estimando los componentes de dosis gamma debidos a productos de fisión y radiación prompt, incluyendo en ésta última la radiación gamma proveniente de las capturas neutrónicas radiativas;
7. el modelado de una fuente cilíndrica homogénea basada en la configuración accidental del núcleo;
8. la definición de un factor de transferencia: la relación entre la dosis absorbida gamma medida en un determinado lugar del laboratorio y la dosis medida en un lugar del núcleo.

Estimación de la dosis absorbida por las personas involucradas y en los alrededores de la facilidad

Para evaluar la dosis absorbida por el operador (A en la figura 3), se aplicaron todas las metodologías anteriormente mencionadas. La dosis absorbida total en todo el cuerpo se obtuvo sumando las componentes de gamma y neutrones. La componente debida a neutrones se estimó en 22 Gy y la debida a gamma en 21 Gy, por lo que la dosis total absorbida en todo el cuerpo se estimó en 43 Gy. Este valor de dosis corresponde al promedio de los diferentes métodos aplicados, con una dispersión máxima del 30%.

La distribución de la dosis absorbida de neutrones se muestra en la tabla 1.

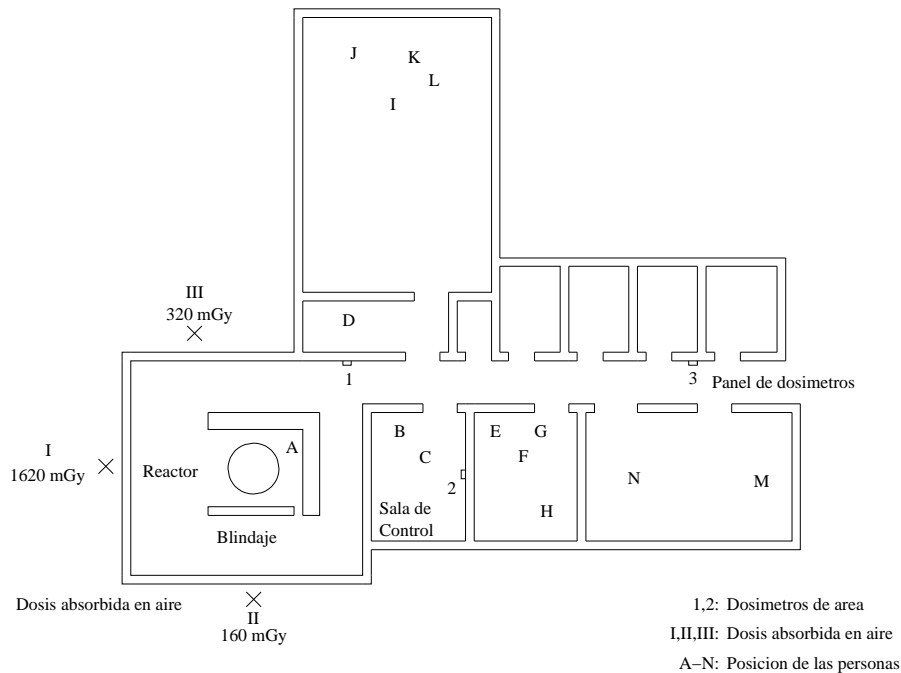


Figura 3. Facilidad RA-2.

Área	Dosis absorbida [Gy]
Bigote	22
Cabeza, lado derecho	23
Cabeza, lado izquierdo	18
Nuca	5
Tronco	26
Axila derecha	16
Axila izquierda	8
Pubis	8

Tabla 1. Dosis absorbida de neutrones en la superficie del cuerpo.

Órgano	Dosis absorbida [Gy]
Pulmón derecho	20
Pulmón izquierdo	6
Médula ósea	8
Gónada	4

Tabla 2. Dosis absorbida de neutrones en órganos.

Persona	Componente gamma [mGy]	Componente de neutrones [mGy]	Dosis total [mGy]
B	130	147	277
C	124	124	248
D	96	83	179
E	100	96	196
F	82	63	145
G	90	81	171
H	90	81	171
I	5	6	11
J	3	3	6
K	3	3	6
M	1	1	2
N	1	1	2

Tabla 3. Dosis absorbida por el resto del personal.

La dosis en los diferentes órganos, resultado de aplicar los factores de conversión de fluencia en aire a dosis en órganos también se estimó, obteniéndose los valores que se muestran en la tabla 2.

Las dosis absorbida en el cuerpo entero por las otras personas involucradas se muestran en la tabla 3.

Los valores de dosis absorbida en aire en los alrededores de la facilidad se muestran en la figura 3.

EFFECTOS SOMÁTICOS Y MITIGACIÓN

Intervención médica primaria [4]

El pulso de criticidad liberó un campo mixto neutrones/gamma.

La evaluación médica fue de tipo clínico, hematológico y citogenético, por análisis de aberraciones cromosómicas. Esta evaluación tenía por objeto la detección de efectos no estocásticos.

30 minutos:

Náuseas, vómitos y diarreas. Eritema facial y de la mano derecha y postración.

2 horas:

El recuento de linfocitos mostró una reducción al 46% de los valores mínimos normales. Los síntomas mostrados hasta entonces permitieron diagnosticar Síndrome Agudo de Radiación con Síndrome Neurovegetativo en evolución severa. Dosis estimada en todo el cuerpo: 15 Gy. Referencia: dosis supraletal mínima: 6 Gy.

Planificación de la atención médica

- Hospitalización en estapa Prodromal del Síndrome Agudo de Radiación, con lesiones en piel y control ambulatorio del personal restante sin evidencia de efectos no estocásticos localizados (debido a la ausencia de manifestaciones clínicas ni hematológicas).

Evolución clínica

A las 2 horas de la irradiación, los vómitos con dolor que no respondían a la medicación permitieron descartar las manifestaciones psicológicas accidentales que suele producir el Síndrome General de Adaptación. Durante este período, se detectaron efectos no estocásticos como hiperaemia conjuncional y eritema en la mano derecha. El dolor de la faringe se puede relacionar con el edema observado más tarde.

Entre las 2 y 26 horas siguientes, se observó la fase de latencia, sin manifestaciones clínicas generales. Se detectaron algunos de los primeros efectos sobre las membranas celulares, la muerte en interfase de los linfocitos de la sangre periférica y un notable aumento de los leucocitos neutrófilos. Esta reducción en el número de linfocitos ha impedido realizar la estimación de dosis mediante el análisis cromosómico. En este lapso, se incrementaron las lesiones en faringe, antebrazo y mano derecha. Además, apareció eritema en la parte derecha del pecho.

Entre las 26 y 29 horas aparecen signos del Síndrome Cardiovascular.

A las 29 horas un vómito con sangre denota una lesión gastrointestinal producida por una dosis medio abdominal superior a los 13 Gy.

Luego de las 32 horas, y hasta las 38 horas, el paciente se sentía ansioso y exaltado. Su respiración tenía un ritmo de 44 l/min y la dificultad para respirar se iba incrementando. Se produce una radioneumonitis derecha, otro indicador de la inhomogeneidad de la dosis: la dosimetría física mostró que la dosis recibida en el pulmón derecho fue de 20 Gy, en tanto que la recibida en el izquierdo, de 6 Gy.

A partir de las 38 horas, se pone de manifiesto la fase de crisis del Síndrome Neurológico, probablemente debida a lesiones vasculares.

Una vez transcurridas 48 horas, el paciente no respondía a estímulos de dolor y no presentaba dilatación pupilar ante los estímulos de luz. Comenzaron convulsiones, y el paciente entró en estado de coma. Se produjeron tres paros cardiorrespiratorios, que culminaron con la muerte del paciente. El último ECG (Electrocardiograma) efectuado evidencia ausencia de la repolarización ventricular, daño asociado a la destrucción de un sistema de transporte de iones.

El paciente falleció a las 48 horas 25 minutos de producido el pulso de criticidad por la Enfermedad Aguda de Radiación, con Síndromes Neurológicos y Cardiovasculares con fuerte sobreexposición en la mitad superior derecha del cuerpo, sin ninguna posibilidad terapéutica.

La reconstrucción realizada por dosimetría física estima una dosis corporal total de 43 Gy; 21 por radiación gamma y 22 por neutrones.

Evolución clínica del resto del personal [5]

Los resultados de las evaluaciones dosimétricas en las 8 personas restantes involucradas permiten estimar una dosis en todo el cuerpo inferior a los 1 Gy, y ausencia de efectos no estocásticos localizados. Todas estas personas recibieron control ambulatorio. El seguimiento se extendió durante 120 días. Con el fin de resolver la urgencia dosimétrica (problema prioritario en todo caso de irradiación externa), se realizaron estudios clínicos, hematológicos, bioquímicos e instrumentales.

No se observaron durante el período de seguimiento manifestaciones clínicas asociadas al daño por irradiación. Durante los primeros días se investigó la presencia de los eventos clínicos que caracterizan la irradiación aguda en todo el cuerpo. En 4 de los 8 accidentados se diagnosticaron, durante las 3 primeras semanas, manifestaciones de stress psicológico tales como tensiones musculares, ansiedad, sensaciones displacenteras que simulan cuadros orgánicos, depresión. Son reacciones psicológicas independientes del daño físico.

La evolución del recuento de linfocitos y leucocitos neutrófilos en función del tiempo no mostró los cambios esperados para dosis superiores a 500 mGy. En todos los casos se realizó un análisis cromosómico de linfocitos de sangre periférica para estimar la dosis en todo el cuerpo.

En un estudio complementario se determinó el número de intercambio entre cromátidas hermanas cuyos valores medios no se correlacionan con las dosis físicas estimadas. Por la suma de los resultados de los estudios realizados se diagnosticó la ausencia de efectos no estocásticos.

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Conclusiones obtenidas por la comisión de investigación de CNEA:

- Se estima que la magnitud de la energía liberada durante la excursión fue de 10 MJ, que es equivalente a $\sim 3 \cdot 10^{17}$ fisiones y su duración fue de algunas decenas de milisegundo.

- La comisión identificó deficiencias en la instalación y en los procedimientos así como en la forma en que se obtenía la aprobación y era llevada a cabo la inspección de los experimentos. Estos defectos se debían en parte a la antigüedad de la instalación y en parte a que la excesiva confianza alcanzada durante durante años de operación llevó en forma inadvertida a debilitar el apoyo a las instalaciones menores al atender las demandas más urgentes del programa nuclear.

Acciones correctivas

- Emisión de normas regulatorias para el diseño de Conjuntos Críticos (GUIA AR 7)[6], las cuales establecen condiciones para:
 1. Sistemas de Apagado,
 2. Exceso de reactividad,
 3. Tasa de inserción de reactividad,
 4. Reactividad para experimentos,
 5. Blindajes;
- Mayor control regulatorio;
- Responsabilidades y supervisión de la organización o entidad responsable;
- Mejora en los procedimientos;
- Mayor atención al desarrollo de una *Cultura de la Seguridad*;
- Mayor atención al sistema de entrenamiento de los operadores (GUIA AR 10)[7];
- Los cambios en la configuración del núcleo y en el manejo de los elementos combustibles deberán ser aprobados por el jefe del reactor;
- Mejora en la asignación de responsabilidades.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Report of the Accident which occurred in the critical RA-2 unit on September 23, 1983**, CNEA, 1983.
- [2] **Fatality at Argentine critical facility - Information Notice N° 83-66, Supplement 1**, US NRC, 1984.
- [3] **Accident in a critical facility: physical dosimetry**, Bomben *et al*, Seventh International Congress of the International Radiation Protection Association, 1988.
- [4] **Evolution of an acute radiation syndrome in a criticality accident**, Gimenez, J.C, Seventh International Congress of the International Radiation Protection Association, 1988.
- [5] **Evaluación médica del personal involucrado en un accidente de criticidad**, Gimenez J.C. *et al*, CNEA.
- [6] **Diseño de conjuntos críticos - Guía AR 7 Rev. 0**, ARN, 2003.
- [7] **Programas de formación especializada y capacitación específica para el licenciamiento de instalaciones radiactivas Clase I - Guía AR 10 Rev. 0**, ARN, 2004.