

Fukushima: energía nuclear y medio ambiente

León Garzón Ruipérez y Angeles Cavero.

Grupo de procesos biológicos de desarrollo.
Universidad de Oviedo.
C/Independencia 13-33004- Oviedo

E-mail: garzonio7@yahoo.es;
radonwww@yahoo.es

Resumen

La información de los multimedia ha permitido seguir los eventos de los grupos nucleares del sitio Fukushima 1, a partir de la cual se han estimado las concentraciones de los radionucleidos incorporados al medio ambiente. El resultado muestra que la situación es análoga a la que se produjo en Chernobil.

Palabras clave: Circonio, dosis absorbida, hidrógeno, óxido de uranio, reactor BWR, refrigerante.

Fukushima: nuclear energy and environment

Abstract

The information obtained from the multimedia network allow us to describe the nuclear units (belonging to the Fukushima 1 site) disastrous events. From these data an evaluation of the environment radionuclides concentrations have been obtained. As a result we show that the situation is analogous to that of the Chernobil reactor accident.

Keywords: Circonium, absorbed doses, hydrogen, uranium oxides, boiling reactor, coolant.

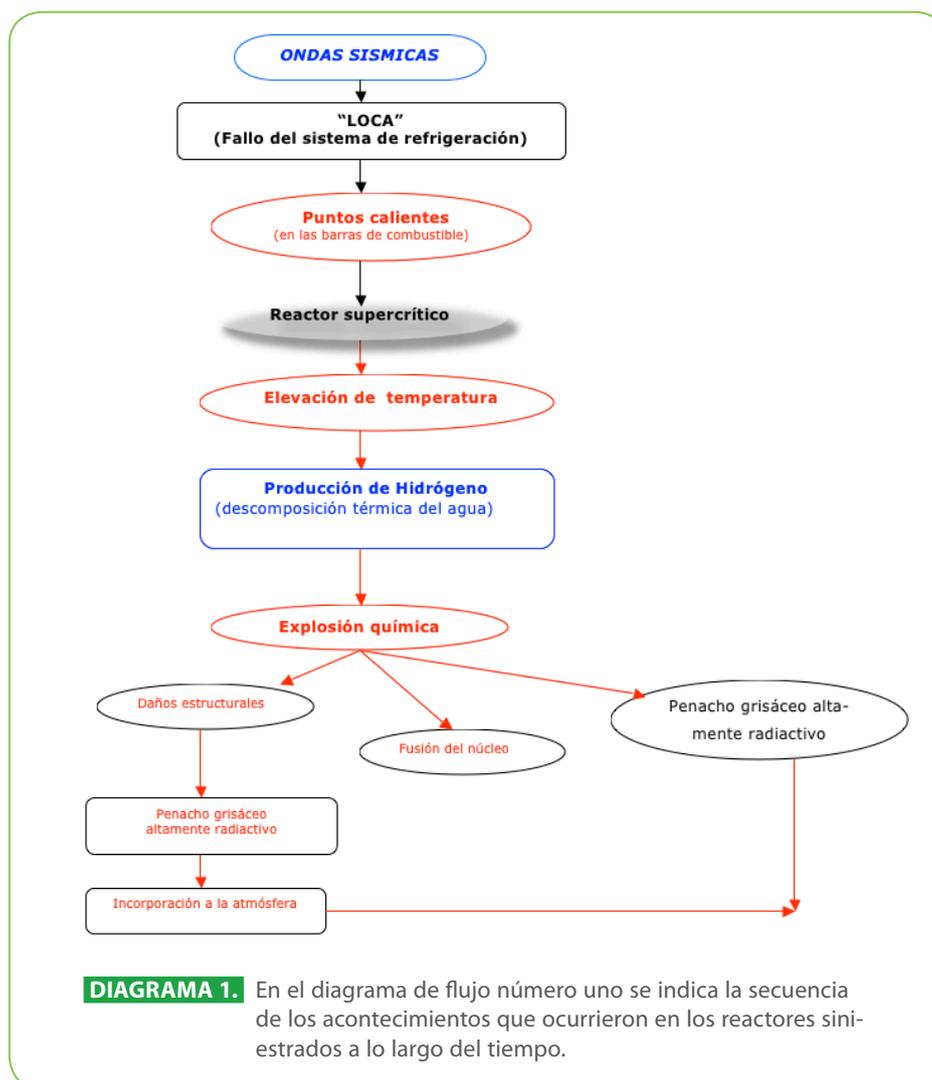
Introducción

La fisión nuclear consiste en la escisión de un núcleo masivo, como por ejemplo los núcleos del Uranio, con la producción de dos núcleos de tamaños comparables, llamados productos de fisión, de uno a tres neutrones, y de radiación gamma. La energía desprendida es del orden de 200 Mev por cada fisión, es decir, millones de veces superior a cualquier típica reacción química. En promedio el número de neutrones es de 2.5, de modo que descontando un neutrón necesario para automantener la reacción, quedan todavía 1.5 neutrones disponibles. Con una elección adecuada de materiales es posible sobren neutrones. En el seno de un reactor nuclear las concentraciones de los diferentes nucleidos presentes, se ajustan de manera que al final de cada ciclo neutrónico, el número de neutrones sea ligeramente superior a la unidad. De los neutrones emitidos, unos son inmediatos y el resto, aproximadamente un 1%, son diferidos; estos últimos se forman en la desintegración de ciertos productos de fisión que se llaman, por ello precursores.

Quiere decirse que si mediante la utilización de absorbentes de neutrones conseguimos detener la reacción nuclear, queda un 6% de la potencia total procedente de las fisiones de los neutrones diferidos. Veremos más adelante la importancia que tuvo esta circunstancia en el desastre de Fukushima.

El desastre ocurrido en los grupos de agua en ebullición (BWR) situados en Fukushima 1, tiene como antecedentes próximos el accidente de Harrisburg (1979), un reactor de agua a presión (PWR), y el de Chernobil (1986), un diseño especial carente de edificio de contención. En ambos casos ocurrió la fusión del núcleo y la radiactividad quedó confinada en el primer caso, e incorporada al medio ambiente en el segundo. Ambos desastres se debieron al accidente *LOCA*, esto es, a la pérdida del refrigerante.

Empíricamente, no existen o son escasas, las experiencias realizadas sobre el accidente *LOCA*, aunque los ensayos de explosiones nucleares (aéreas y subterráneas) sean aceptables referencias.



A pesar de que se ha dedicado un gran esfuerzo a las cuestiones de seguridad de los reactores nucleares, subsisten sin embargo, factores de riesgo muy importantes, como son el "factor humano" [1], y en general, la falta de una adecuada preparación científico-técnica, difícil de alcanzar, dada la complejidad de los sistemas involucrados.

Resultados y discusión

El esquema global que vamos a seguir en la exposición viene dictado precisamente por la complejidad citada que se acrecienta en los sistemas nucleares de producción de energía, en operación anormal, por lo que nos ha parecido conveniente utilizar métodos analógicos tomando como referencias casos sencillos conocidos, sin pérdida del rigor científico.

Considerando primero los posibles efectos globales o de gran radio de acción, el desastre nuclear puede compararse formalmente con el del volcán Krakatoa (1883) [2,3,4], en cuya última erupción la isla del mismo nombre saltó por los aires en

pedazos, reduciéndose en gran parte, a materia particulada, la fracción más fina de la cual, al alcanzar mayor altura, se extendió por toda la atmósfera, lo que dio lugar a la ausencia de verano en dos años consecutivos. Al considerar que si en lugar del Krakatoa hubieran explotado muchas bombas nucleares, la materia particulada, invadiendo la estratosfera, tendría un efecto análogo al del Krakatoa, pero mucho más severo y duradero. Estas analogías permitieron hacer una extrapolación para el caso nuclear, naciendo así el concepto de *invierno nuclear*.

Como ha sucedido con otros títulos, tal es el de agujero negro, el anterior fue, en el mismo sentido, muy oportuno, lo que es una ventaja para nosotros, puesto que su consideración nos obliga a introducir los principales protagonistas de los desastres ocurridos. Al comparar los accidentes de los reactores nucleares con las explosiones nucleares, ocurre que se trata de fenómenos esencialmente equivalentes aunque con escalas temporales y modos de operación diferentes.

Limitándonos a los resultados, se hicieron familiares diversos conceptos, con sus correspondientes términos, como *lluvia*

Aunque ocurrió hace unos 2000 millones de años y por consiguiente en un planeta yermo, su estudio proporciona información acerca de la naturaleza y comportamiento de los reactores nucleares, siendo además uno de los fenómenos más curiosos de la Geología. Resulta pertinente indicar aquí que más allá de nuestro planeta, concretamente en el Sol y en las estrellas, existen gigantescos sistemas termonucleares perfectamente autoregulados [19].

Descendiendo al planeta Tierra, hace unos dos mil millones de años existió en la localidad anteriormente mencionada (en el Gabón) un reactor nuclear natural gracias a la coincidencia de una serie de circunstancias que permitieron la acumulación de óxidos de uranio, de concentración química elevada y con un enriquecimiento natural en el isótopo fisiónable uranio-235, del orden del 4%, que es aproximadamente el mismo enriquecimiento que se utiliza en los combustibles de las centrales nucleares. Dicho enriquecimiento se explica porque el periodo del isótopo fisiónable es inferior al del uranio-238, lo que permite calcular la variación temporal del enriquecimiento isotópico. Oklo es el único ejemplar terrestre de reactor nuclear fosilizado, que guarda el testimonio de los cambios producidos a lo largo de su funcionamiento, que se ha estimado en medio millón de años. Se ha demostrado que se autocontroló con el agua presente en el terreno y quizá también con la intervención de ciertos minerales como el berilio. Si el coeficiente de multiplicación se hacía mayor que uno, el calor desprendido evaporaba agua con lo cual el reactor se hacía subcrítico; disminuía la temperatura, el agua condensaba y volvía a la condición inicial, repitiéndose el ciclo. En la época de este reactor, la concentración atmosférica de oxígeno era muy pequeña, lo cual se tradujo en una menor dispersión del uranio contenido en forma de óxido en sus proximidades. El sitio donde tuvieron lugar estos acontecimientos era una "cubeta" natural (un zócalo cristalino) en el que se acumuló el mineral evitando así su dispersión terráquea.

Lugares similares a Oklo se encuentran en otras zonas de la tierra, las cuales pueden verse en la figura número 1, entre ellas, las de la bahía de los tiburones en la costa occidental australiana, las de los grandes lagos canadienses, Escandinavia y la región del Kaapvaal, en África del sur.

Las tierras emergidas más antiguas son los cratones [20] poseyendo rasgos análogos derivados de su origen común que es el magma terrestre. Contienen uranio, más dispersado que en el caso del Gabón. En el sitio de Oklo, hubo 16 núcleos, cada uno de gran volumen y elevada concentración de Uranio y con absorbentes de neutrones como los minerales de berilio. Con volúmenes mucho más pequeños pero con gran pureza química y sin grandes absorbentes, tendríamos una situación equivalente. Serían los agregados a los que se ha achacado el origen de la vida [21].

En Chernobil el incidente que originó el desastre fue un experimento que se hizo para ver el comportamiento del reactor, ocurriendo que inmediatamente la potencia alcanzó valores

tales que provocaron una excursión nuclear, la fusión del núcleo y el desprendimiento catastrófico de radiactividad, que se incorporó al medio ambiente puesto que este tipo de reactor carecía de edificio de contención, lo que no ocurrió en el caso de Harrisburg.

En cambio, en el caso actual los fenómenos comunes son las explosiones, pero explosiones químicas, no nucleares, consistentes en la combustión del hidrógeno con el oxígeno disponible, bien el del vapor de agua descompuesta, o bien el existente en el ambiente. El hidrógeno procede de una reacción entre la materia del reactor y el agua, que es conocida desde los tiempos de Thénard (1777-1857), discípulo de Gay-Lussac (1778-1850), quien clasificó los metales según su facilidad para descomponer el agua. En general se habla de la descomposición térmica del agua [22,23].

Estas explosiones son o representan el estado inicial visible del desastre nuclear, que consiste en el desprendimiento de material altamente radiactivo.

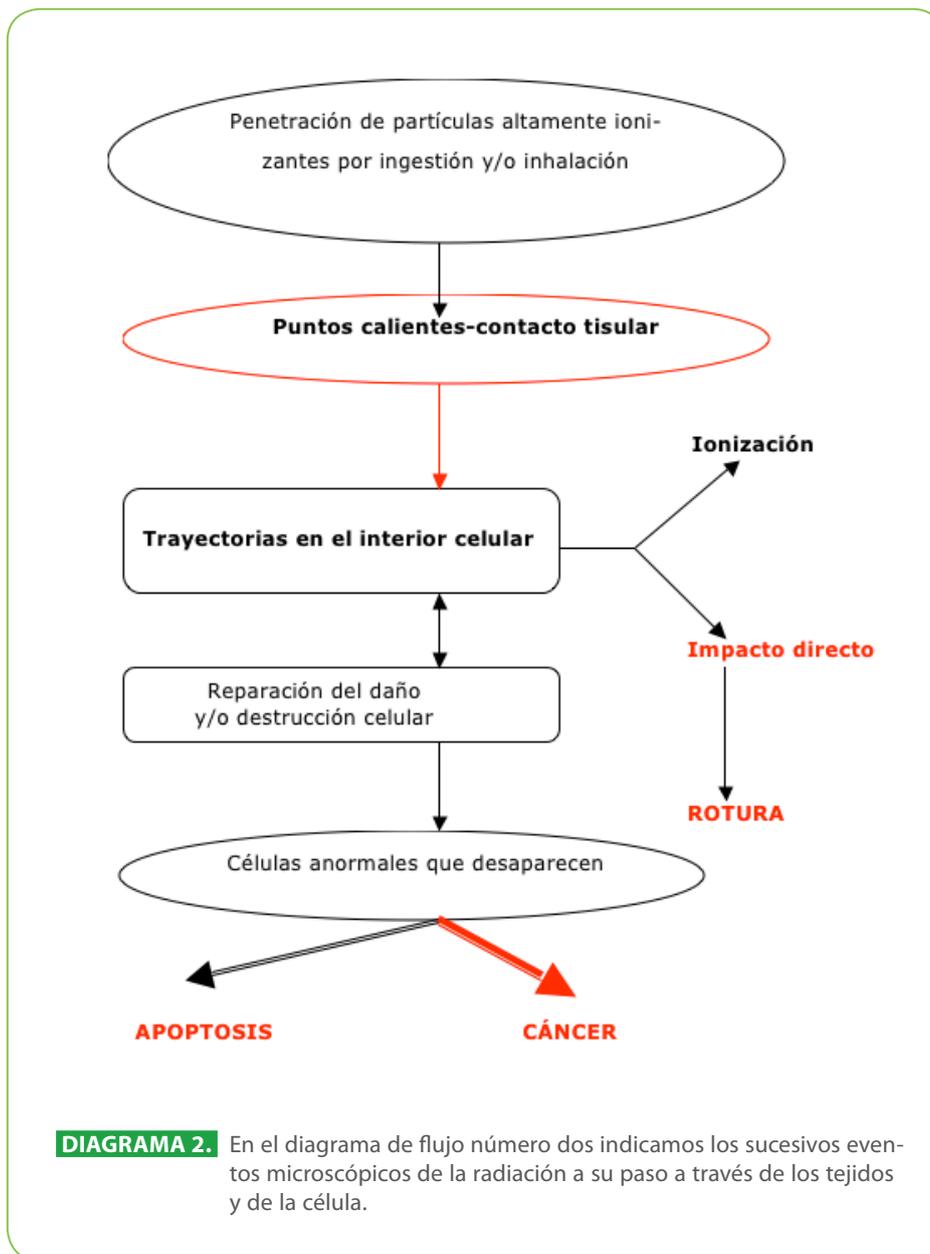
El estadio siguiente es la formación y posterior dispersión de la nube de vapor de agua conteniendo dicho material radiactivo, nube que visualmente parece que alcanza alturas de pocos miles de metros, lo que contrasta con una explosión de artefacto nuclear, que normalmente alcanza la estratosfera. El fenómeno local descrito requiere el conocimiento de la evolución de la nube radiactiva en función de parámetros meteorológicos, los más importantes de los cuales son el viento y la *altura de capa de mezcla* [24,25]. Este concepto sustituye al clásico modelo gaussiano, más difícil de manipular. Representa la zona inferior de la atmósfera donde ocurre fundamentalmente el transporte turbulento de masa y energía y en la que se efectúan el desplazamiento y las interacciones entre los contaminantes.

Aunque la variación de los valores de la altura de capa de mezcla en Japón y en Chernobil sean diferentes, por razones geográficas y climatológicas, la diferencia no es significativa para estimar los valores de las concentraciones alcanzadas de los contaminantes desprendidos. Quiere decirse entonces, que los casos de Chernobil y de Fukushima son análogos dentro de factores de pocas unidades.

En este modelo de la capa de mezcla, la concentración de contaminantes depende de la velocidad del viento (v) y de la altura de capa de mezcla (h), en el sentido de que, para una fuente emisora determinada, es inversamente proporcional al producto de las magnitudes v y h .

Finalizamos esta cuestión indicando que hemos trabajado en este tema, existiendo varias Tesis doctorales referidas al núcleo urbano de Oviedo y tomando el radón-222 [26], el torio-232 y los iones grandes positivos producidos por el tráfico como indicadores de la altura de la capa de mezcla.

Vientos fuertes persistentes durante días podrían dispersar la enorme radiactividad desprendida extendiendo la pluma a



favor de la dirección del viento y haciendo disminuir las concentraciones locales del país, para trasladarlas a otros lugares, originando un aumento global sobre los valores anteriores. Procede ahora hacer referencia al fenómeno de la radiactividad [27], muy común en la Naturaleza. A su paso a través de las células [28] las partículas entregan su energía de tal manera que 100 ergios en un gramo es por definición, igual a 1 rad. Como a igualdad de energía entregada el daño ocasionado depende del tipo de partícula, el número de rads hay que multiplicarlo por un factor f , llamado de calidad, que vale 1 para partículas beta y fotones gamma y 10 para partículas alfa, surgiendo así la unidad rem. El sievert (Sv) es tal que $1\text{Sv}=100\text{ rem}$. El fondo natural anual es de 2.4 mSv/año aproximadamente igual a 0.3 micro Sv/hora. La exposición en una placa de tórax es de 0.02mSv. La experiencia de las víctimas de Hiroshima y Nagasaki ha permitido obtener la expresión: $p=0.0002\text{ fallecimientos}/(R^*h)$ /año, siendo R^*h el producto del número de

rems absorbidos por la población de h personas. Por ejemplo para un fondo natural de 0.300 rem en una población de 50 millones el valor de p es de unas 3000 personas.

El penacho [29,30,31] es el principal vector de la radiactividad, pero ¿qué tipo de radiactividad es de esperar y cuáles son los isótopos predominantes?

En principio, hay dos tipos de radiación, la directa procedente del reactor siniestrado y la transportada por el penacho. La primera solamente puede ser radiación gamma debido a que es la más penetrante de todas, la protección contra ella se apoya, para una distancia determinada en la "teoría de la muñeca rusa", que no hace alusión al caso de Chernobil sino a la estructura en capas, propia de ese juguete. Aplicada a un reactor nuclear la fuente de radiactividad que está ubicada en el núcleo es minimizada mediante la aplicación de varias ba-

rreras sucesivas. Si falla la última barrera, los emisores radiactivos [32,33,34,35,36,37] podrán salir al exterior, que es lo que ocurrió precisamente en Chernobil, porque no existía edificio de contención.

Para el caso de la radiación directa la mayor barrera física es la distancia entre el foco radiactivo y la persona, pero la difusión atmosférica de los penachos transporta aerosoles que son vectores de la radiactividad y cuya peligrosidad depende fuertemente de la cantidad de partículas que puedan fijarse sobre el organismo, tanto en la piel como en el interior del mismo. El peor de todos, con mucha diferencia sobre los demás, es el aerosol atmosférico [38,39,40,41,42] procedente del combustible que contiene Plutonio, ocurriendo desgraciadamente que una de las unidades, la tercera, contiene óxidos mixtos de Uranio y Plutonio.

Su peligrosidad es debida al doble carácter del Plutonio: pues es radiactivo, emisor alfa con periodo de desintegración comparativamente corto y bioquímicamente tóxico para ciertos órganos vitales. El resultado de su incorporación suele ser el cáncer.

Por consiguiente, parece conveniente la adopción de medidas urgentes para trasladar a lugares seguros al personal afectado. Más pormenorizadamente, los penachos son una nube de partículas de diferente naturaleza y tamaño, pudiendo estar en los tres estados de la materia. La distribución de estos elementos

no es uniforme, si no que depende para las partículas, de su tamaño, en el sentido de que las más gruesas se depositan más rápidamente que las más livianas, en los lugares distantes de la fuente productora. Las gaseosas se distribuyen en la atmósfera como cualquier otro gas y se dispersan a mayores distancias que las sólidas. Entre las gaseosas destacamos el tritio-3 y kriptón-85, siendo ésta última poco peligrosa por su carácter químico inerte y la primera puede incorporarse al agua. El resto de las partículas está constituido principalmente por Sr-90 y Cs-137 [43,44,45,46], puesto que otras, como el I-131 desaparecen a favor de su relativamente corto periodo de semidesintegración. Las dos primeras pasan fácilmente a las cadenas tróficas, como ya mencionamos en la introducción.

A partir del núcleo fundido puede desprenderse Plutonio, bien como metal, bien como óxido, en cualquier caso, de una severidad enorme, debido al carácter de dicho elemento.

Las dosis absorbidas [47], de acuerdo con las diversas noticias han sido millones de veces superiores a la dosis anual de la radiactividad natural del ambiente.

La coloración en la zona de origen de los penachos, es similar a la que presentan las masas sometidas a altas temperaturas, como lava reciente, o la colada de un horno metalúrgico. Si se tratara de la combustión del hidrógeno, se observaría una zona esférica en llamas.



FIGURA 2. Vista panorámica de las seis unidades de Fukushima con los penachos.

Otra característica de este fenómeno es la coloración del penacho propiamente dicho, que va del gris claro al gris oscuro. Las dos características precedentes indican que se trata de la fusión total o parcial del núcleo puesto que la coloración del penacho indica la presencia de partículas de los óxidos de Uranio y/o Plutonio

La altura alcanzada por ellos, de unos cuantos centenares de metros, indica que no se trata de una explosión nuclear. El origen de los penachos es el núcleo fundido, total o parcialmente. La visión de los penachos indica que los edificios de contención han sido dañados por la explosión del hidrógeno.

En el ciclo del combustible nuclear [48,49] los desechos radiactivos son muy diversos. Los más importantes por su elevada radiactividad son los productos de fisión de periodo largo y los actínidos que fundamentalmente quedan confinados en las pastillas de combustible. Para introducirnos en el tema, presentamos a continuación las siguientes consideraciones.

Las transformaciones que producen energía térmica comercial son la combustión (con el oxígeno del aire) del carbono contenido en los combustibles fósiles y las reacciones de fisión nuclear [50] (en cadena, por medio de neutrones) del uranio, torio y plutonio; los dos primeros se encuentran en minerales en el seno de la corteza terrestre y el tercero se produce artificialmente en el curso del funcionamiento de un reactor que contenga uranio.

Una central térmica puede compararse en cierto modo con un ser vivo puesto que en ambos casos existen estructura y función, es decir anatomía y fisiología. La función más representativa es el metabolismo, que requiere una alimentación de combustible para la producción de energía en forma de electricidad, por una parte y para el mantenimiento y función del sistema, por otra, teniendo lugar una producción de desechos. En el caso convencional, los desechos son las cenizas y los gases CO_2 y H_2O en forma de vapor. En el caso nuclear, los desechos más importantes son los combustibles gastados (que se suelen almacenar en piscinas) y los gases radiactivos, principalmente tritio (H-3) y kriptón-85, que por su corto periodo el primero y dispersión en la atmósfera el segundo no representan riesgos para la vida. La mayor cantidad de desechos, los llamados productos de fisión, se encuentran en el seno de las pastillas de combustible, dentro de las vainas, que alojan también en los espacios disponibles, productos de fisión gaseosos.

El Cs-137 y el Sr-90 son productos de fisión importantes; y sobre todo el plutonio generado. En el caso que nos ocupa el combustible es de óxidos de U y de mezclas de óxidos de uranio y plutonio en la unidad tres. Este combustible gastado puede regenerarse, de aquí que tenga cierto sentido hablar del ciclo del combustible nuclear.

Como cualquier producto de la actividad humana, los reactores nucleares tienen fallos en su funcionamiento, siendo el más importante el llamado *LOCA* (*Loss coolant accident*) [51,52,53]. Ocurre que en el núcleo de un reactor nuclear la reacción de fisión está ajustada, en presencia del agua de refrigeración,

mediante absorbentes de neutrones, de manera que la energía desprendida se elimina a la misma velocidad con la que es producido. Si por las causas que sean el agua desaparece parcial o totalmente, el reactor se hace supercrítico, al ser mayor la cantidad de neutrones producida, pues el agua absorbía parte de ellos. Hay que tener presente que la pérdida de agua proporciona neutrones rápidos que son menos efectivos que los moderados o térmicos. Lo que ocurre es que aparecen puntos calientes en algunos lugares de los tubos de combustible desajustándose los parámetros de control, y la temperatura alcanzada puede llegar a producir hidrógeno por la descomposición térmica del agua y acumulándose con la posibilidad de explosión, la cual puede ocurrir antes o después de la fusión total o parcial del núcleo.

El núcleo de un reactor consta principalmente del metal circonio [54] y de las pastillas de combustible, que incluso a las temperaturas reinantes podría vaporizarse y volverse a oxidar con el oxígeno del aire, produciendo quizá una nube de copos blancos inofensiva. La masa de óxidos fundida se extendería originando una lámina que podría incluso fundir el suelo del edificio y penetrar en la tierra, en el seno de la cual se iría enfriando. Estaríamos frente al anteriormente mencionado Síndrome de China.

La explosión nuclear del núcleo es prácticamente imposible de ocurrir puesto que tendría que tener una geometría próxima a la esférica, diseñándose el reactor para que esta circunstancia no pueda producirse. En particular, la forma de lámina es la menos favorable para mantener una reacción nuclear. El riesgo radiológico se debe a que a causa de su enorme temperatura se liberan todos los productos de fisión acumulados, algunos de los cuales son muy peligrosos por su toxicidad y tiempos de vida media, por lo que, si ocurriera, habría que proceder a su aislamiento, al igual que se hizo en Chernobil.

Nuestra opinión al respecto es que si el núcleo fundido no penetra la barrera inferior de la vasija del núcleo y mantiene una configuración volumétrica próxima a una esfera, puede comportarse como un petardo "muy sucio" por el desprendimiento catastrófico de radiactividad.

En el caso del accidente de Harrisburg (la isla de las tres millas) hubo fusión del núcleo, sin daños en el edificio de contención, por lo que las dosis recibidas por la población fueron tolerables. En cambio, en el caso de Chernobil, al faltar el edificio de contención, la fusión del núcleo representó un accidente muy severo y hubo que enterrarlo. Como resumen la autoridad japonesa ha aceptado la calificación de categoría 7 al índice INES, que es la escala internacional de accidentes nucleares. Como resumen general el desastre de Fukushima fue debido a que el tsunami inundó las plantas de los reactores inutilizando todos los sistemas de emergencia de la refrigeración del núcleo.

Conclusiones

1. La producción comercial nuclear de energía presenta los riesgos inherentes del factor humano. Una formación científico-tecnológica adecuada es muy difícil de alcanzar.
2. La sociedad aún no ha alcanzado el grado de madurez requerido para afrontar riesgos nucleares.
3. Un accidente nuclear puede dañar severamente el sistema de producción de alimentos.
4. Las causas del accidente de Fukushima fueron debidas a la fuerza del tsunami que dañó irreversiblemente los sistemas de refrigeración auxiliares.
5. En el caso del Japón el riesgo nuclear está incrementado por la frecuencia de grandes terremotos.

Bibliografía

1. Salge M, Milling PM. Who is to blame, the operator or the designer? Two stages of human failure in the Chernobyl accident. *System Dynamics Review* 2006;22(2):89–112.
2. Choi BH, Pelinovsky E, Kim KO, Lee JS. Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption. *Natural Hazards and Earth System* 2003; Science 3(5):321–332.
3. Ernst WG. Earth Materials and Human Health. *International Geology Review* 2007;3:191–208.
4. Gleckler PJ, Wigley TML, Santer BD, Gregory JM, AchutaRao K and Taylor KE. Krakatoa's signature persists in the ocean. *Nature* 2006;7077:675.
5. Mettler FA, Voelz GL. Major Radiation Exposure — What to Expect and How to Respond. *N Engl J Med* 2002;346:1554–1561.
6. News Staff. Nuclear Power's Global Fallout. *Science* 2011:1502–1503.
7. Butler D. Radioactivity spreads in Japan. Fallout is localized, but could persist for years in some regions. *Nature* 2011:555–556.
8. Sakaguchi A, Kawai K, Steier P, Quinto F, Mino K, Tomita J, et al. First results on 236U levels in global fallout. *Science of The Total Environment* 2009;407(14): 4238–4242.
9. Reardon S. Fukushima Radiation Creates Unique Test of Marine Life's Hardiness. *Science* 2011;332(6027):292.
10. Zakaib GD. Radiation risks unknown. *Nature* 2011;471:41.
11. Buck EH and Upton HF. Effects of radiation from Fukushima Daiichi on the U.S. marine environment. CRS Report for Congress; 2011.
12. Nenot JC and Stather JW. The toxicity of plutonium, americium and curium. Published for the Comission of the European Communities by Pergamon Press Oxford and New York 2002.
13. Webster S. S. Distribution and Toxicity of 239Pu in Bone. *Health Physics* 1972; 22:6.
14. Taylor DM and Leggett. A generic biokinetic model for predicting the behaviour of the lanthanide elements in the human body. *Radiat Prot Dosimetry* 2003;105(1-4):193–198.
15. Fukuda, Satoshi. Chelating Agents Used for Plutonium and Uranium Removal in Radiation Emergency Medicine. *Current Med Chemistry* 2005;12(23):2765–2770(6).
16. Osif BA, Baratta AJ, Conkling TW. TMI 25 years later: the Three Mile Island nuclear power plant accident and its impact. Penn State Press, 2004. University Dr. , University Park, PA.
17. Cowan. A. Natural Fission Reactor. *Scientific American* 1976;235: 36–47.
18. Garzón L and Cavero A. Fenómenos nucleares en la tierra primitiva (ARCHEANO), <http://www6.uniovi.es/dptos/ener/archeano/introduccion.htm>.
19. Garzón L. Historia de la Materia. Oviedo: Editorial Básica Nobel, 3,1994.
20. Condie KC, Editor. Archean crustal evolution. USA: Elsevier 1994.
21. Garzón L. El origen de la vida. Un nuevo escenario. Oviedo: Servicio de Publicaciones de la Universidad, 1996.
22. Lédé J, Lopicque F and J. Villermaux J. Production of hydrogen by direct thermal decomposition of water. *International J of Hydrogen Energy* 1983;8(9):675–679
23. Baykara SZ. Hydrogen production by direct solar thermal decomposition of water, possibilities for improvement of process efficiency. *International J of Hydrogen Energy* 2004;29 (14):1451–1458.
24. Wiegner M, Emeis S, Freudenthaler V, Heese B, Junkermann W, Munkel C, et al. Mixing layer height over Munich, Germany: Variability and comparisons of different methodologies. *J Geophys Res* 2006;111.
25. White JM, Bowers JF, Hanna SR and Lundquist JK. Importance of using observations of mixing depths in order to avoid large prediction errors by a transport and dispersion model. *J of Atmospheric and Oceanic Technology* 2009;26(1):22–32.
26. Garzón L. El radón y sus riesgos. Oviedo: Servicio de Publicaciones de la Universidad, 1992.
27. Garzón L. Radiactividad del medio ambiente. Madrid: Alhambra, 1980.
28. Latorre E. Radiobiología médica. Madrid: AC editorial 2011.
29. Stone R. Fukushima Cleanup Will Be Drawn Out and Costly. *Science* 2011;331 (6024)1507.
30. Shayeganrad G and Parvin P. DIAL-phoswich hybrid system for remote sensing of radioactive plumes in order to evaluate external dose rate. *Progress in Nuclear Energy* 2009;51(3):420–433.
31. Imanaka T, Fukutani S, Yamamoto M, Sakaguchi A and Hoshi M. Width and center-axis location of the radioactive plume that passed over Dolon and nearby villages on the occasion of the first USSR A-bomb Test in 1949. *J of Radiation Rese-arch* 2005;46 (4):395–399.
32. Sánchez-Cabeza JA. Internatational conference on isotopes and environmental studies. Edited by P. Povinec, Comenius University, Slovakia, International Atomic Energy Agency, Monaco. 2006
33. Ketterer ME, Hafer KM and Mietelski JW. Resolving Chernobyl vs. global fallout contributions in soils from Poland using Plutonium atom ratios measured by inductively coupled plasma mass spectrometry. *J of Environmental Radioactivity* 2004;73:183–201.
34. Almond D, Edlun L and Plame M. Chernobyl's Subclinical Legacy: Prenatal Exposure to Radioactive Fallout and School Outcomes in Sweden. *The Quarterly Journal of Economics* 2009;124 (4): 1729–1772.
35. Normile D. Fukushima Revives The Low-Dose Debate. *Science* 2011;332(6032):908–910.
36. Brumfiel G and Cyranoski D. Quake sparks nuclear crisis. *Nature* 2011;47 1:273 –275.
37. Andersson KG, Fogh CL, Byrne MA, Roed J, Goddard AJH, Hotchkiss SAM. Radiation dose implications of airborne contaminant deposition to humans. *Health Physics* 2002;82(2):226–232.
38. Chesser RK, Bondarkov M, Baker RJ, Wickliffe JK and Rodgers BE. Reconstruction of radioactive plume characteristics along Chernobyl's western Trace. *J. Of Environmental Radioactivity* 2004;71(2):147–157.

39. Pöllänen R, Valkama I and Toivonen H. Transport of radioactive particles from the chernobyl accident. *Atmospheric Environment* 1997;31(21):3575-3590.
40. Loosmore GA and Cederwall RT. Precipitation scavenging of atmospheric aero-sols for emergency response applications: testing an updated model with new real-time data. *Atmospheric Environment* 2004;38(7):993-1003.
41. Papastefanou C. Residence time of tropospheric aerosols in association with radioactive nuclides. *Applied Radiation and Isotopes* 2006;64(1):93-100.
42. Utsunomiya S, Jensen KA, Keeler GJ and Ewing RC. Uraninite and Fullerene in Atmospheric Particulates. *Environ Sci Technol* 2002;36 (23):4943-4947
43. McCurry J. Japan: the aftermath. *The Lancet*:2011;377(9771):1061-1062.
44. Smith JT, Comans RNJ, Beresford NA, Wright SM, Howard BJ, Camplin W C. Chernobyl's legacy in food and water. *Nature* 2000;405:141.
45. Papastefanou C, Manolopoulou M, Stoulos S, Ioannidou A and Gerasopoulos E. Coloured rain dust from Sahara Desert is still radioactive. *J of Environ Radioactivity* 2001;55(1):109-112.
46. Arapis GD and Karandinos MG. Migration of ¹³⁷Cs in the soil of sloping semi-natural ecosystems in Northern Greece. *J of Environ Radioactivity* 2004;77(2):133-142.
47. Christodouleas JP, Forrest RD, Ainsley CG, Tochner Z, Hahn SM and Glatstein E. Short-Term and Long-Term Health Risks of Nuclear-Power-Plant Accidents. *NEJM* 2011;1-8.
48. Ewing RC. The nuclear fuel cycle : A role for mineralogy and geochemistry. *Elements* 2006;2(6):331-334.
49. MacKenzie AB. Environmental radioactivity: experience from the 20th century-trends and issues for the 21st century. *The Science of The Total Environment* 2000;249(1-3):313-329.
50. Hollenbach DF and Herdon JM. Deep-Earth reactor: Nuclear fission, helium, and the geomagnetic field. *Proc Natl Acad Sci USA* 2003;100(6):3047-3050.
51. Hamidouche T and Si-Ahmed K. Analysis of loss of coolant accident in MTR pool type research reactor. *Progress in Nuclear Energy* 2011;53(3):285-289.
52. Khan SU, Peng MJ, Zubair M. Simulation of Loss of Coolant Accident in an In-tegral Pressurized Water Reactor (IPWR). *Advanced Materials Research* 2011;(230 - 232): 410-414.
53. Koring R. Analyses and estimation of insulation material release in E.ON-PWR under loss of coolant conditions. *Kerntechnik* 2011;76(1):54-57.
54. Nagase F and Fuketa T. Effect of Pre-Hydridding on Thermal Shock Resistance of Zircaloy-4 Cladding under Simulated Loss-of-Coolant Accident Conditions. *J of Nuclear Science and Technology* 2004; 41(7):723-724.
55. Medlin R, Riha J and Blahova O. Microstructure and local mechanical characteristics of Zr1Nb alloy after hardening. *Chem Listy* 105:202-205.

Publish with iMedPub<http://www.imedpub.com>

- ✓ Es una revista en español de libre acceso.
- ✓ Publica artículos originales, casos clínicos, revisiones e imágenes de interés sobre todas las áreas de medicina.

Archivos de Medicina

✓ Se hace bilingüe.

Para la versión en inglés los autores podrán elegir entre publicar en Archives of Medicine:

<http://www.archivesofmedicine.com>

o International Archives of Medicine:

<http://www.intarchmed.com>