



Tsunami nuclear

David Bahen *

FRENTE DE TRABAJADORES DE LA ENERGIA, de MEXICO
dbahen@hotmail.com

RESUMEN: La emergencia nuclear en Japón ha puesto al mundo en alerta internacional. En cuatro reactores de la central nuclear de Fukushima Daiichi se presentaron condiciones de accidente con repercusiones amplias y/o severas. Consecuencia del tsunami del 11 de marzo de 2011, falló el suministro remoto de energía eléctrica y los sistemas de emergencia de refrigeración del núcleo de los reactores; el nivel del agua en los mismos, así como en las piscinas de combustible irradiado, bajó considerablemente. Hay estimaciones de fusión (meltdown), al menos parcial, en tres reactores. Las explosiones de hidrógeno rompieron la pared superior de la contención secundaria liberándose vapor radiativo. No existen condiciones adecuadas para laborar. Se ha evacuado a miles de habitantes cercanos. La información fluye con dificultad. Las acciones de emergencia se observan deficientes. Se

trata de un fuerte golpe a la energía nuclear de potencia y a las transnacionales nucleares. La FISION nuclear de potencia muestra sus limitaciones e inconveniencias. Es preciso tomar medidas basadas en la información y explicación de los sucesos. Los trabajadores somos las primeras víctimas pero amplios sectores de la población, y el medio ambiente, también podrían ser afectados.

NOTA: La situación en Fukushima se describe en los eventos conocidos con base en la información disponible al 18 de marzo de 2011. El tema es muy importante, complejo y especializado que requiere un análisis detallado. El presente trabajo es de divulgación, para trabajadores y población en general, presentado en el XVI Foro de Energía organizado por el FTE de México.

1. Introducción

Los accidentes nucleares ocurridos en varios reactores de la central nucleoelectrica de Fukushima Daiichi son de especial importancia para los trabajadores de la energía del mundo. En el sitio,

quienes están en la primera trinchera de la emergencia son los trabajadores, aún desprovistos del entrenamiento y medios necesarios. Consecuentemente, son los primeros afectados por

2011, *elektron* 11 (183) 4, FTE de México

los daños debidos a las radiaciones ionizantes. Pero la afectación no es solamente a los trabajadores sino, también, a la población en general y al medio ambiente. A cinco días de los accidentes, la situación era crítica para Japón y la comunidad internacional.

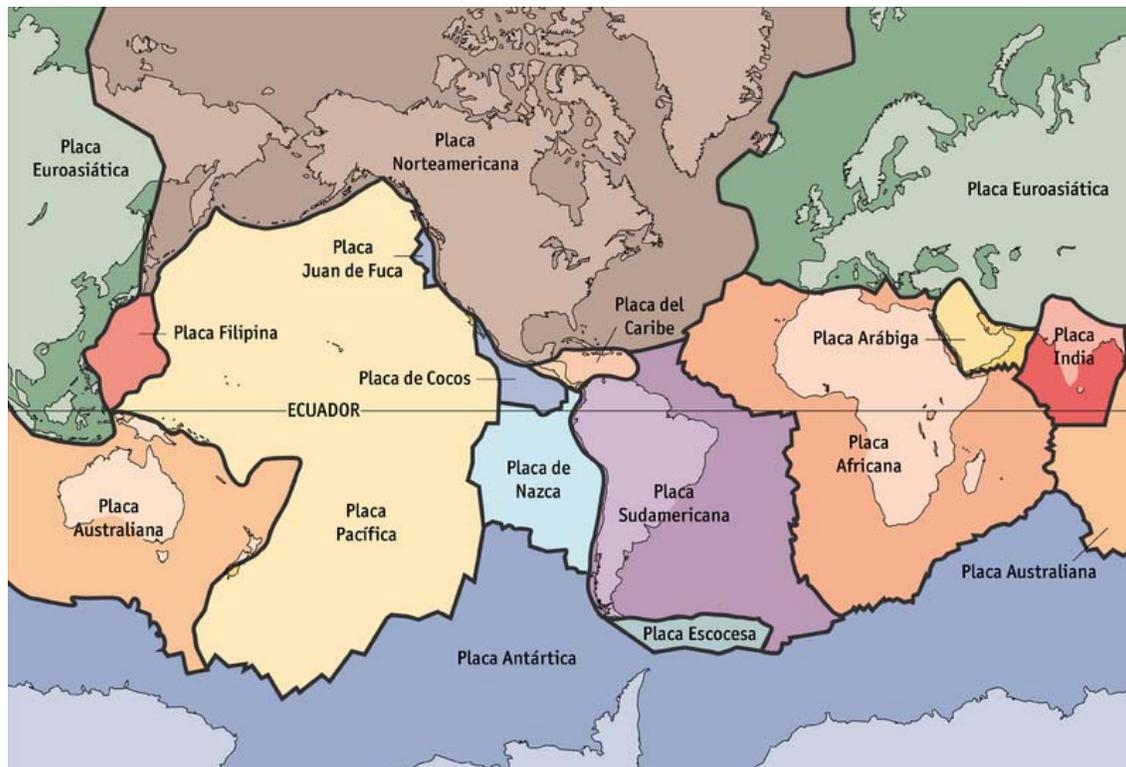
Vivimos en una parte del Universo muy especial. Se piensa que en otras partes podría haber vida e importantes estudios están en desarrollo. Sin embargo, es en la Tierra, el único lugar donde se escucha el murmullo de un suspiro.

La Tierra desde su formación está en movimiento y en actividad continua. La Tierra tiene estructura, con un “centro” y varias capas. La vida humana se desarrolla en una capa de apenas unos pocos kilómetros, en la superficie terrestre y en el fondo marino. La superficie de la Tierra no es plana ni sus capas están inmóviles. Desde el centro de la Tierra se transporta el calor mediante movimientos convectivos, que ocurren cuando existe un gradiente de temperatura; en estas condiciones, las capas más calientes ascienden, luego se enfrían y vuelven a descender. En ese movimiento, la convección es un eficiente mecanismo de transporte de energía que puede llegar hasta la superficie terrestre.

La Tierra no siempre ha tenido el aspecto que ahora presenta. Se considera que la Tierra se formó en la época de la formación del Sol, hace 4,500 millones de años, y junto con el resto de los planetas constituyen al sistema solar. Pasaron muchos años para que la Tierra se configurara como planeta. Durante su evolución fue transformándose hasta lograr posteriormente las condiciones propicias para la aparición de la vida.

Hace 225 millones de años la forma de la Tierra, conocida como Pangea, era muy diferente. Después, la Tierra evolucionó conformando ciertas estructuras. A los 125 millones de años, se empezaron a configurar lo que serían los continentes; hace 65 millones de años, se empezaron a delinear hasta alcanzar el aspecto actual.

La superficie terrestre no es uniforme sino que está fracturada en varias placas. Algunas son muy importantes como la placa Euroasiática, que afecta directamente a Japón; al otro lado de esta placa, se encuentran la placa del Pacífico y la placa de Norteamérica; abajo está la placa de Filipinas y, más abajo, la placa Australiana.



Mapa de placas tectónicas. Japón se encuentra en una zona de alta sismicidad

La zona donde se ubica Japón es muy sísmica, se conoce como un “cinturón de fuego”. Otro, se encuentra en México, al ser vecinos de la placa del Pacífico, la placa de Nazca, la placa Norteamericana; al sur se encuentra la placa de Cocos y la placa del Caribe. Las regiones japonesa y mexicana se encuentran en zonas de importantes fracturas en las capas terrestres.

De acuerdo a la teoría de tectónica de placas, actualmente se considera que la Tierra está en una fase de actividad consecuencia de la deriva del campo magnético terrestre, de manera que el “centro” de la Tierra no está exactamente en el centro de la misma sino desplazado, a la manera de una “yema de huevo”.

La Tierra está en movimiento, gira alrededor del Sol y sobre sí misma, en un movimiento de traslación y rotación. Consecuencia de la deriva del campo magnético terrestre el movimiento de las capas terrestres está ocurriendo constantemente. Hay momentos en que una capa oceánica se hunde debajo de la capa continental, puede chocar frontalmente, o suceder el caso inverso. Cuando la placa oceánica se hunde “el mar se va”, luego se acomodan las capas y “el mar regresa” produciendo un maremoto. Un tsunami es un evento muy energético que produce amplia destrucción.

El reciente tsunami producido en Japón el 11 de marzo de 2011 ha conmovido a la sociedad internacional. El grado de destrucción es bastante considerable. Se estima que el evento tuvo una magnitud de 9 grados en la escala de Richter.

La situación se ha vuelto peor porque el tsunami natural ha desembocado en un tsunami nuclear. Esto, desafortunadamente, ocurre en una región que ha sufrido la peor experiencia en materia de tecnología nuclear con fines militares, debido al bombardeo atómico norteamericano de Hiroshima y Nagasaki durante la Segunda Guerra Mundial. Esos sucesos dejaron 180 mil víctimas en Hiroshima y 80 mil en Nagasaki. Los daños por radiación fueron dramáticos. Hoy lo que se conoce sobre los efectos biológicos derivados de la exposición a la radiación ionizante y el conocimiento acumulado acerca de los daños por radiación surgen, principalmente, de los análisis y estudios epidemiológicos que se han hecho con los sobrevivientes.

Después de ese bombardeo, el 3 de diciembre de 1953, D. Eisenhower, presidente norteamericano, planteó ante la asamblea de la

Organización de las Naciones Unidas (ONU), en Nueva York, un enfoque internacional sobre los usos pacíficos de la energía atómica, expresado en el proyecto llamado “**Atomos** para la Paz”. Se trataba de un intento para llevar una sensación de tranquilidad a un mundo aterrorizado del horror de Hiroshima y Nagasaki pudiera volverse a repetir. Los Estados Unidos, entonces, se dedicaron a desarrollar, promover y exportar la tecnología nuclear con propósitos civiles. La principal aplicación de los materiales nucleares, como el uranio, el torio y el plutonio, es la generación de energía nucleoelectrónica.

El 23 de octubre de 1956, en Nueva York, se creó al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), con sede en Viena, Austria, cuyo objetivo se indica en el artículo 2 de sus Estatutos: “El Organismo procurará acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero. En la medida que le sea posible se asegurará que la asistencia que preste, o la que se preste a petición suya, o bajo su dirección o control, no sea utilizada de modo que contribuya a fines militares”.

Las regiones con mayor potencia nuclear, con propósitos civiles, corresponden a las regiones más desarrolladas del capitalismo: Estados Unidos, Europa y Japón. Los demás reactores están diseminados por el mundo. **Africa** tiene reactores nucleares únicamente en Sudáfrica. En América tienen reactores Argentina, Brasil y México. En Asia, China y la India tienen importante número de reactores. Tratándose de la potencia nuclear con fines militares el Club Atómico es muy reducido.

La energía nuclear se obtiene de las **reacciones** nucleares de fisión en cadena producidas en el interior de los reactores nucleares. Esas reacciones son inducidas por neutrones, partículas sin carga eléctrica que, al colisionar con átomos de uranio, los fragmentan en varios productos de fisión más neutrones. Las reacciones son muy energéticas. Los reactores nucleares son dispositivos tecnológicos para generar vapor de alta calidad y, en sucesivas transformaciones de energía, se produce la nucleoelectricidad.

La FISION nuclear, implica la fragmentación (división) de los átomos de elementos pesados como el Uranio (U). Esta tecnología se distingue de la FUSION nuclear, la cual se refiere a la unión de átomos ligeros como el Hidrógeno (H).

2011, elektron 11 (183) 6, FTE de México

El término FUSION (fusion) nuclear no es lo mismo que el término “fusión” (meltdown) del núcleo de un reactor nuclear de fisión. En este caso, se trata del paso del estado sólido a líquido de los elementos combustibles que forman al núcleo, es un derretimiento de materiales estructurales que conduce a la liberación de materiales radiativos, no

es una fusión de átomos que intervengan en reacciones termonucleares de fusión.

La tecnología de FISION se utiliza comercialmente en muchos países; la FUSION sigue aún en fase experimental a través de grandes proyectos de investigación y desarrollo.



Edificio en construcción del reactor BWR japonés FOTO: TVA/OIEA

2. Tecnología nuclear de fisión

2.1 Situación mundial de los reactores nucleares

Informes del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) indicaban que el 13 de marzo de 2011 estaban en operación 440 reactores nucleares a nivel mundial con una capacidad instalada neta de 374,938 megawatts (MW) y, según el Sistema de Información de Reactores de Potencia (PRIS), otras 64 unidades están actualmente en etapa de construcción (www.iaea.org).

Los 440 reactores están distribuidos en 29 países, y a la cabeza están los Estados Unidos con 104. Francia cuenta con 58; (con una capacidad de 63,130 MW); en 2008, las centrales francesas generaron 419,8 Terawatts por hora (TWh), que cubrieron el 76.2% de las necesidades energéticas de ese país. Alemania posee 17 reactores y una capacidad eléctrica instalada de 20,490 MW que genera el 22% de energía a nivel nacional.

Antes del accidente Japón tenía 54 reactores en operación más 2 en construcción. Según el informe del OIEA, en 2008, el 24.9% de la electricidad utilizada en Japón provino de medios nucleares, mientras que en Estados Unidos ese porcentaje fue del 19.7%.

En América Latina, los países con potencia nucleoelectrica son: Argentina, con las centrales

Atucha I y Embalse, más una en construcción (Atucha II); Brasil con las plantas de, Angra-1 y 2, situadas en la región costera de Angra dos Reis, a 180 km al oeste de Río de Janeiro, y se ha aprobado la construcción de Angra 3; y, México, con las unidades de Laguna Verde I y II. Así, la energía nuclear generada en territorio nacional supuso en 2008 para los argentinos el 6.2% del suministro eléctrico, el 4% para los mexicanos y el 3.1% para los brasileños.

La situación en 2011 de los reactores nucleares en operación, apagados y en construcción, de acuerdo a la información del PRIS del OIEA, se resume así:

440 reactores en operación con una capacidad de 374,093 MW.

5 unidades en apagado de largo plazo con una capacidad de 2,776 MW.

De los reactores en operación, 271 son del tipo agua a presión (PWR) y 88 del tipo agua hirviente (BWR). Hay también reactores de otro tipo de tecnología, p.e. LWGR, CANDU, etc.

64 reactores en construcción con una capacidad de 62,562 MW. De estos, 27 corresponden a China con una capacidad instalada de 27,230 MW.

INFORMACION DE PLANTAS NUCLEARES DE POTENCIA Reactores en operación y apagado de largo plazo por país

Operación		
País	No. de unidades	Total (MW)
ARGENTINA	2	935
ARMENIA	1	375
BELGIUM	7	5927
BRAZIL	2	1,884
BULGARIA	2	1,906
CANADA	18	12,569
CHINA	14	11,058
CZECH REPUBLIC	6	3,678
FINLAND	4	2,716
FRANCE	58	63,130

2011, elektron 11 (183) 8, FTE de México

GERMANY	17	20,490
HUNGARY	4	1,889
INDIA	20	4,391
JAPAN	50	44,102
KOREA, REPUBLIC OF	21	18,698
MEXICO	2	1,300
NETHERLANDS	1	482
PAKISTAN	3	725
ROMANIA	2	1,300
RUSSIAN FEDERATION	32	22,693
SLOVAK REPUBLIC	4	1,816
SLOVENIA	1	688
SOUTH AFRICA	2	1,800
SPAIN	8	7,514
SWEDEN	10	9,298
SWITZERLAND	5	3,263
UKRAINE	15	13,107
UNITED KINGDOM	19	10,137
UNITED STATES OF AMERICA	104	101,240
Total	440	374,093

Fuente: Base de datos de PRIS del OIEA.

Los siguientes datos están incluidos en los totales:

	No. de Unidades	Total (MW)
<i>TAIWAN, CHINA</i>	6	4,982

Apagado de largo plazo		
País	No. de unidades	Total (MW)
CANADA	4	2,530
JAPAN	1	246
Total	5	2,776

Fuente: Base de datos de PRIS, del OIEA.

INFORMACION DE PLANTAS NUCLEARES DE POTENCIA Reactores en operación y en apagado de largo plazo por tipo

Operación		
Tipo	No. de Unidades	Total (MW)
BWR	88	81,367
FBR	1	560
GCR	18	8,949

LWGR	15	10,219
PHWR	47	23,042
PWR	271	249,956
Total	440	374,093

Apagado de largo plazo		
Tipo	No. de Unidades	Total (MW)
FBR	1	246
PHWR	4	2,530
Total	5	2,776

Fuente: Base de datos de PRIS del OIEA.

INFORMACION DE PLANTAS NUCLEARES DE POTENCIA

Reactores en construcción por país

Construcción		
País	No. de Unidades	Total (MW)
ARGENTINA	1	692
BRAZIL	1	1,245
BULGARIA	2	1,906
CHINA	27	27,230
FINLAND	1	1,600
FRANCE	1	1,600
INDIA	5	3,564
IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF	1	915
JAPAN	2	2,650
KOREA, REPUBLIC OF	5	5,560
RUSSIAN FEDERATION	11	9,153
SLOVAK REPUBLIC	2	782
UKRAINE	2	1,900
UNITED STATES OF AMERICA	1	1,165
Total	64	62,562

El siguiente dato está incluido en los totales:

	No. de Unidades	Total (MW)
TAIWAN, CHINA	2	2,600

Fuente: Base de datos de PRIS del OIEA.

2.2. Accidente de Chernobyl

No obstante el amplio desarrollo nuclear, y las horas acumuladas de experiencia operacional, se han tenido experiencias amargas. Entre las más relevantes está el accidente de la Isla de las Tres Millas, ocurrido en 1979, en Harrisburg, Pensilvania.

El 26 de abril de 1986, hace 25 años, ocurrió en Kiev, Ucrania, la catástrofe de Chernobyl. En esa central, se produjeron explosiones de hidrógeno que llevó a un accidente severo en un reactor de alta potencia, tipo, RBMK, con propósitos militares. Ese reactor no tenía contención secundaria, es decir, carecía de un edificio que cubriera al conjunto. Consecuencia del accidente, se liberó material radiativo a la atmósfera y se formó una nube radiativa que viajó por el mundo ocasionando muchos daños.

El reactor no. 4 quedó destruido e irreparable. Los daños fueron muy fuertes. Después de la explosión de hidrógeno, 115 mil personas fueron evacuadas en una zona de 30 km a la redonda declarada de exclusión.

En una imagen satelital del río que pasaba cerca de la central se muestran en colores falsos los cambios de temperatura. Durante la emergencia, se apreciaban regiones muy calientes, como si esas aguas estuvieran en llamas. Después, hubo cierta recuperación pero esa fuente de agua quedó irreparablemente dañada. Lo mismo ocurrió con parte de la tierra, los pastos, animales y vidas humanas, además, de edificios, vehículos e infraestructura física.

Los radionúclidos que impactaron al sitio fueron el Iodo-131 (I-131) y el Cesio-137 (Cs-137). El primero es absorbido por la glándula tiroides e incrementa el riesgo de cáncer en los niños; el segundo, afecta al músculo y cuerpo entero en general. El Estroncio-90 (Sr-90) afecta al hueso y el Plutonio-239 (Pu-239) afecta a varios órganos durante una vida media muy larga.

Estos materiales fueron liberados en la nube radiativa que se produjo después de las explosiones y el polvo radiativo viajó a distintas distancias, llegando al lejano Oriente y hasta América. El I-131 y Cs-137 fueron transportados a varios km., el Sr-90 permaneció en el polvo 30 km y el Pu-239

solamente 4 km. El I-131 tiene una vida media física de 8 días y una vida media biológica de hasta 138 días; el Cs-137 son 30 años y 70 días; para el Sr-90, son 28 y 49 años; y, en el caso del Pu-239, los valores son 24,360 años y 100 años, respectivamente.

El impacto fue tal que el accidente, habiéndose producido en Ucrania, afectó a otros países, la nube radiativa irradió a grandes extensiones hasta cubrir completamente a Europa. Consecuencia de la rotación de la Tierra y de los vientos, la nube le dio la vuelta al mundo.

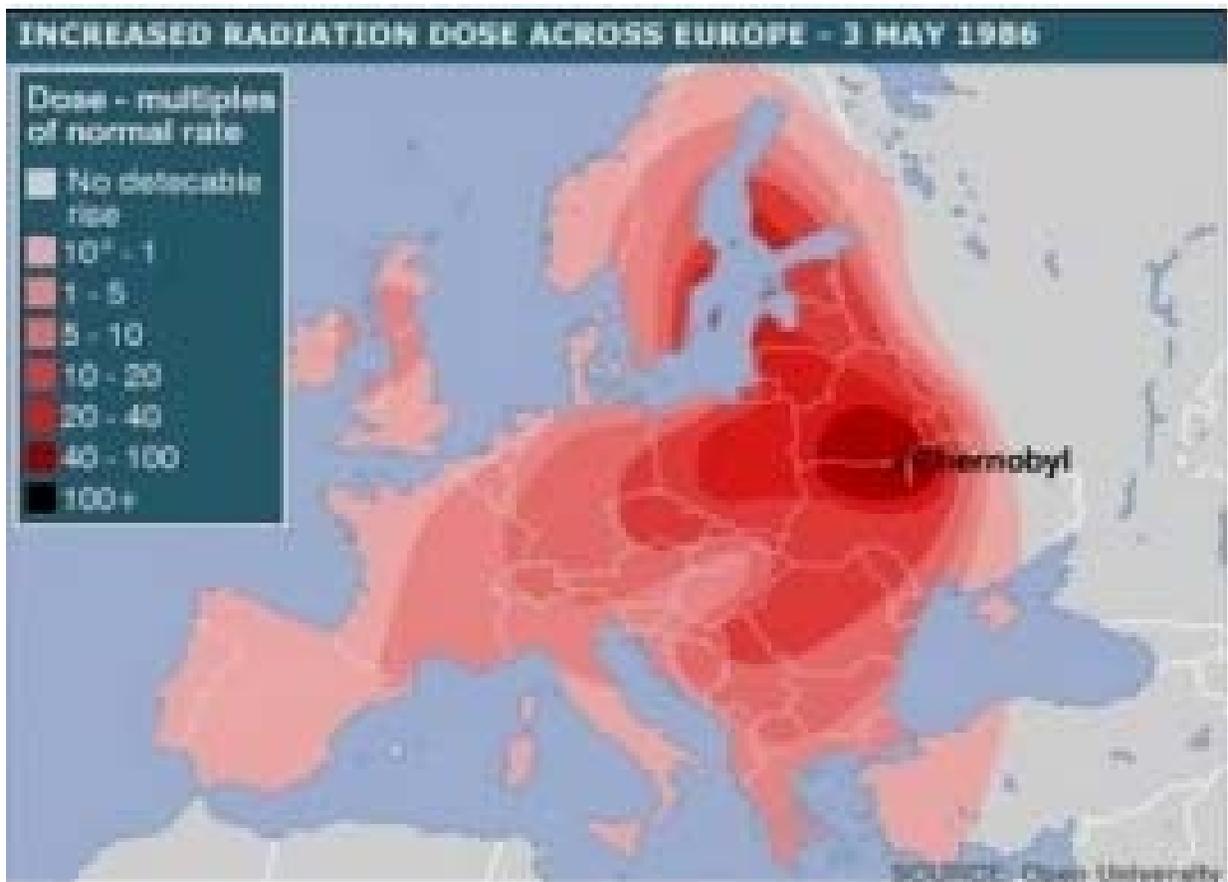
En Chernobyl ocurrió lo que se llama un accidente “severo”, es decir, muy grave, de grandes consecuencias. El núcleo de combustibles del reactor se había fundido por falta de refrigeración adecuada. Respecto a las causas del accidente, en su momento, hubo muchas interpretaciones. Se realizaron conferencias internacionales para discutir la situación. Se habló de errores de diseño y de operación. El hecho es que el accidente no fue controlado ni el reactor recuperado. Por vía aérea se arrojaron toneladas de plomo para contener la liberación radiativa; los mineros soviéticos de la época cavaron túneles cubriendo con plomo al reactor desde abajo.

Después del desastre, los trabajadores de la emergencia arrojaron detergentes y latex desde helicópteros, las carreteras estaban cubiertas de polvo radiativo, las tierras fueron removidas y los edificios y casas descontaminados.

Después, los bomberos terminaron de extinguir el fuego en la central y los trabajadores construyeron una estructura de acero y concreto conocida como “sarcófago” para encriptar los restos del reactor averiado y evitar que escaparan más contaminantes. Pero, la instalación sigue siendo una de las más radiativas en la zona.

Hoy en día el sarcófago es vigilado en cuanto a corrosión, se realiza el monitoreo radiativo en el interior y la descontaminación continúa.

Los daños por radiación, especialmente, en los niños fueron dramáticos. En Cuba fueron recibidos y sometidos a una atención especial. Chernobyl se convirtió en la peor catástrofe nuclear después de la segunda Guerra Mundial. La industria nuclear entró en una seria crisis.



Dosis de radiación en Europa el 3 de mayo de 1986 producida por el accidente de Chernobyl

El sarcófago fue construido con más de 7 mil toneladas métricas (tons) de metal y 400 mil m³ de concreto. Fue levantado tan rápido como fue posible para limitar la exposición a la radiación. El objetivo era evitar que continuara la liberación de material radiactivo pero la instalación no fue concebida para durar indefinidamente. Para diseñar la estructura los matemáticos soviéticos diseñaron un complejo arreglo geométrico, pero a la vez vulnerable, sin uniones selladas o atornilladas que pudieran ser suficientemente antisísmicas.

En el techo quedaron aberturas de más de mil m² por donde se filtró el agua produciendo corrosión en la estructura.

Ahora se trabaja en la construcción de un nuevo confinamiento, una estructura de acero de 110 m de altura, 164 m de ancho y 257 m de longitud, con un peso de 29 mil tons.

Como el reactor accidentado sigue estando muy radiactivo, para proteger a los trabajadores, la nueva estructura no se construyó sobre el sarcófago, sino que será montada por segmentos en forma de arco, cada uno de 25 m de altura y un peso de 300 tons. Una vez finalizada la construcción, los arcos serán deslizados hidráulicamente a través de rodamientos hasta cubrir al sarcófago. Se estima que la nueva estructura tendrá una vida útil de cien (100) años.

Dentro de la estructura, tres grúas robot capaces de levantar 50 tons estarán equipadas con herramientas para desmantelar al sarcófago; también habrá cámaras y monitores de radiación. Una vez hecho el desmantelamiento persiste el problema de la disposición final de los desechos radiactivos, algunos como el Uranio con una vida media física de 4,500 millones de años.



Imagen de una simulación computacional del nuevo confinamiento en Chernobyl FOTO: Novarka

2.3. Centrales nucleoelectricas

Un reactor nuclear tipo BWR utiliza combustibles de uranio en forma de barras largas de aproximadamente 4 m de longitud por 1 cm de diámetro. En condiciones normales, el conjunto de combustibles se colocan en varios ensambles dentro la vasija del propio reactor, constituyendo el núcleo del mismo.

Cuando se funde el combustible de un reactor nuclear de potencia el núcleo se degrada consecuencia de las elevadas temperaturas que funden al encamisado de los combustibles, hecho de una aleación de Zirconio (Zircaloy). En tales condiciones el núcleo queda inservible, destruido, se dice degradado (debris).

Una central nuclear de potencia está formada de dos partes principales: la parte nuclear propiamente, constituida por el sistema nuclear de suministro de vapor, siendo el reactor nuclear el dispositivo más importante. La otra es la parte electromecánica constituida por el sistema de turbogeneración. Existen, además, un conjunto de sistemas asociados.

En la parte nuclear es donde se genera el calor a partir de las reacciones nucleares de fisión en cadena, cuya energía cinética de los fragmentos de fisión se transforma en energía calorífica en

forma de vapor de alta calidad. En la otra parte, la energía calorífica del vapor hace girar a las turbinas y se transforma en energía mecánica, la cual, por medio del generador se transforma en la energía eléctrica.

Existen varios tipos de reactores nucleares, principalmente, de agua a presión (PWR) y de agua hirviente (BWR). Estos reactores funcionan con combustibles de Uranio enriquecido y son moderados y refrigerados por agua ordinaria. Otro tipo de reactores nucleares, tipo CANDU, utilizan uranio natural y agua pesada.

El Uranio tiene dos isótopos radiativos principales, el Uranio-238 y el Uranio-235. El primero en una proporción de 99.3% y, el segundo, de 0.7%. Si por diversos medios se aumenta la proporción de éste último se dice que se "enriquece" el uranio. En un reactor nuclear, se utilizan "enriquecimientos" de uranio de aproximadamente el 3%.

Las reacciones nucleares de fisión son inducidas al bombardear los átomos de uranio a partir de una fuente de neutrones (partículas nucleares sin carga eléctrica). Estas reacciones producen a otros átomos llamados fragmentos de fisión así como más neutrones de alta velocidad. Las reacciones nucleares de fisión son eficientes cuando se utilizan reactores térmicos (lentos). Para

reducirles la velocidad se utilizan materiales “moderadores”. En el caso de los reactores de uranio enriquecido es el agua ordinaria; en el caso de los de uranio natural, es el agua pesada (formada por dos átomos de hidrógeno pesado (deuterio) y uno de oxígeno).

El fluido que permite extraer el calor producido (en forma de vapor) por las reacciones nucleares en cadena se llama refrigerante. Existen diversos tipos, tales como el agua ordinaria, el agua pesada o el sodio líquido dependiendo del tipo de reactor.

El reactor está contenido en una vasija de acero. Dentro van los ensamblajes de combustibles, incluyendo varios dispositivos y accesos, especialmente, los de refrigeración del núcleo que son sistemas independientes.

Visto esquemáticamente, en la parte central está la vasija del reactor cubierta en una contención de concreto armado forrada con una placa interior de acero. Es el contenedor primario. El conjunto está contenido en un edificio exterior llamado contenedor secundario.

El reactor está ubicado dentro de una cavidad que tiene a su lado dos piscinas, una para almacenar el combustible nuevo, “fresco”, que se reemplaza cada 18 meses durante la recarga de combustible nuclear y, otra, para almacenar temporalmente en el sitio al combustible irradiado (gastado).

Durante la catástrofe de Chernobyl se produjeron discusiones y se decía que el accidente ocurrió porque no había contenedor secundario. Los reactores japoneses tienen (o tenían) contenedor secundario.

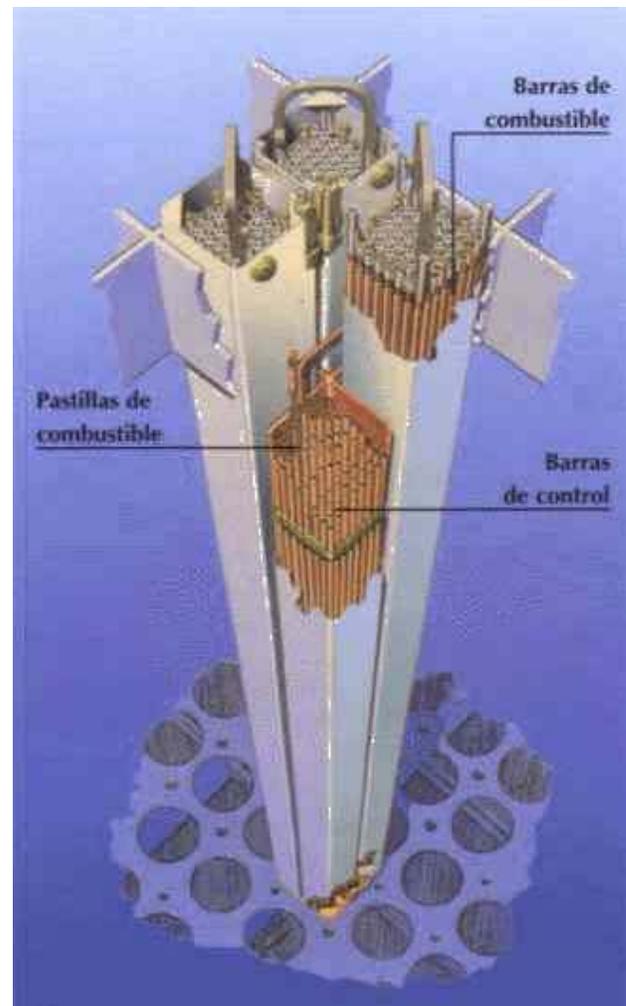
Una central nucleoelectrónica está formada de varios edificios, con un conjunto de plantas horizontales y verticales. La parte más significativa es la nuclear

En toda central nuclear existen sistemas de enfriamiento, generalmente, agua de mar. El reactor tiene su propio circuito de refrigeración, mismo que utiliza agua desmineralizada. El agua del mar no entra en contacto con los elementos combustibles, su función es extraer el calor residual en la central. Luego de enfriar y condensar el vapor el agua se regresa al mar.

Entre las barras de combustible hay unas especiales llamadas barras de control que sirven

2011, *elektron* 11 (183) 13, FTE de México como un sistema de emergencia, que se utiliza en condiciones anormales para detener las reacciones nucleares, al insertarse en el núcleo y evitar que se produzca un accidente. El mecanismo se conoce como Inserción Rápida de Barras de Control (SCRAM).

Para el caso de situaciones que configuren el desarrollo de un accidente grave algunos diseños de reactores tipo BWR disponen de un sistema llamado de “venenos líquidos”. Se trata de una solución boratada (a base de Boro) que, al inyectarse en el interior del reactor, detiene toda reacción nuclear impidiendo el accidente pero destruyendo al núcleo.



Ensamblaje de elementos combustibles nucleares y barras de control

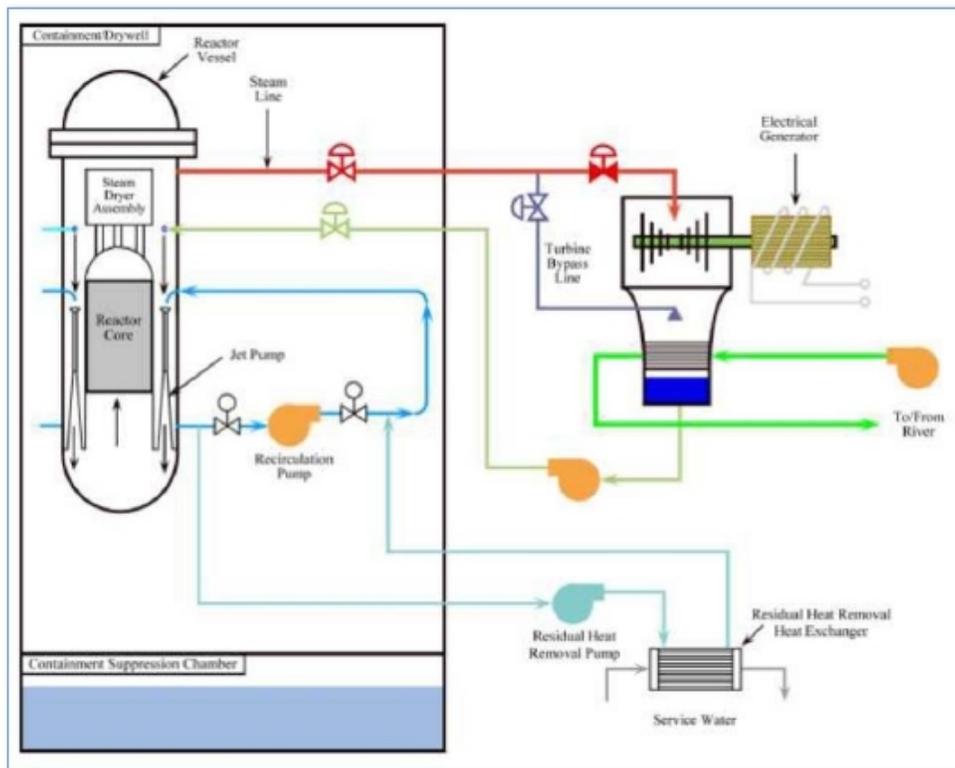


Diagrama de una central nuclear de potencia. A la izquierda se muestra al reactor nuclear; a la derecha está la unidad de turbogeneración. Fuente: OIEA

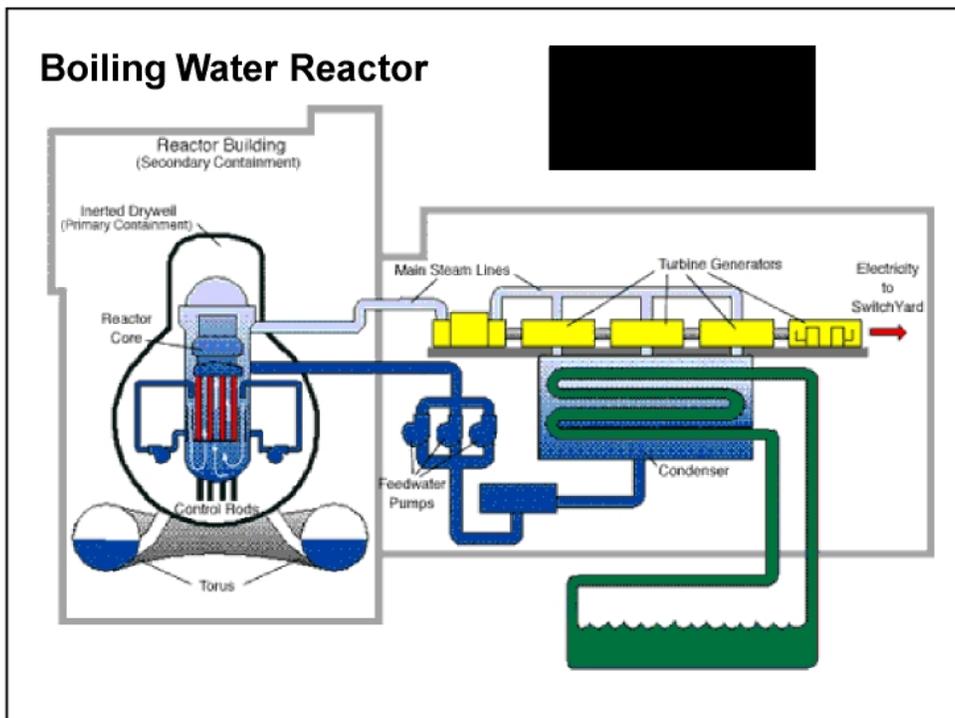


Diagrama genérico de un reactor BWR japonés. El núcleo de elementos combustibles del reactor (reactor core) está dentro de la vasija del reactor, a su vez, en el interior de la contención primaria (primary containment). Debajo de la vasija del reactor, se encuentra la piscina de supresión en forma de dona (Torus).

3. Accidentes nucleares en Japón

3.1 Reactores nucleares en operación

Después de Chernobyl, Japón había proyectado la construcción y operación de 40 reactores y logró más. El 12 de marzo de 2011 se produjo la emergencia nuclear en Japón, país que tiene 18 centrales nucleoelectricas, con 54 reactores en operación, 2 en construcción, 5 en paro temporal y 1 en paro definitivo.

La importancia de la energía nuclear para Japón es muy grande. Con los actuales 54 reactores, la generación nucleoelectrica, en 2010, fue de

279,230 Gigawatts-hora (GWh), es decir, el 29.2% de la generación eléctrica total estimada en 955,849 GWh.

La central nuclear de Fukushima Daiichi tiene 6 reactores. Las unidades 1, 2, 3 y 4 están en una situación de alerta, principalmente. Los reactores son del tipo BWR y entraron en operación en 1970, 1973, 1974 y 1978, respectivamente, con una capacidad instalada de 460 MW la unidad 1 y, 784 MW los tres restantes. La central es operada por la Tokio Electric Power Company (TEPCO).

Japón: Reactores Nucleares de Potencia

En Construcción	2	Operación	54
Shutdown de Largo Plazo	1	Shutdown	5

Producción de potencia eléctrica anual para 2010	
Producción total de potencia (incluyendo nuclear)	Producción de potencia nuclear
955,848.848 GWh(e)	279,229.53 GWh(e)

Nombre	Tipo	Status	Localización	Capacidad (MW)		Fecha
				Neta	Bruta	Conectado
FUGEN ATR	HWLWR	Shutdown permanente	FUKUI	148	165	1978/07/29
FUKUSHIMA-DAIICHI-1	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	439	460	1970/11/17
FUKUSHIMA-DAIICHI-2	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	760	784	1973/12/24
FUKUSHIMA-DAIICHI-3	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	760	784	1974/10/26
FUKUSHIMA-DAIICHI-4	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	760	784	1978/02/24
FUKUSHIMA-DAIICHI-5	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	760	784	1977/09/22
FUKUSHIMA-DAIICHI-6	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	1,067	1,100	1979/05/04
FUKUSHIMA-DAINI-1	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	1,067	1,100	1981/07/31
FUKUSHIMA-DAINI-2	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	1,067	1,100	1983/06/23
FUKUSHIMA-DAINI-3	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	1,067	1,100	1984/12/14
FUKUSHIMA-DAINI-4	BWR	Operación	FUKUSHIMA-KEN	1,067	1,100	1986/12/17
GENKAI-1	PWR	Operación	SAGA	529	559	1975/02/14
GENKAI-2	PWR	Operación	SAGA	529	559	1980/06/03
GENKAI-3	PWR	Operación	SAGA	1,127	1,180	1993/06/15
GENKAI-4	PWR	Operación	SAGA	1,127	1,180	1996/11/12
HAMAOKA-1	BWR	Shutdown	SHIZUOKA	515	540	1974/08/13

2011, elektron 11 (183) 16, FTE de México

		permanente				
HAMAOKA-2	BWR	Shutdown permanente	SHIZUOKA	806	840	1978/05/04
HAMAOKA-3	BWR	Operación	SHIZUOKA	1,056	1,100	1987/01/20
HAMAOKA-4	BWR	Operación	SHIZUOKA	1,092	1,137	1993/01/27
HAMAOKA-5	BWR	Operación	SHIZUOKA	1,212	1,267	2004/04/26
HIGASHI DORI 1 (TOHOKU)	BWR	Operación	AOMORI	1,067	1,100	2005/03/09
IKATA-1	PWR	Operación	EHIME	538	566	1977/02/17
IKATA-2	PWR	Operación	EHIME	538	566	1981/08/19
IKATA-3	PWR	Operación	EHIME	846	890	1994/03/29
JPDR	BWR	Shutdown permanente	IBARAKI	12	13	1963/10/26
KASHIWAZAKI KARIWA-1	BWR	Operación	NIIGATA-KEN	1,067	1,100	1985/02/13
KASHIWAZAKI KARIWA-2	BWR	Operación	NIIGATA-KEN	1,067	1,100	1990/02/08
KASHIWAZAKI KARIWA-3	BWR	Operación	NIIGATA-KEN	1,067	1,100	1992/12/08
KASHIWAZAKI KARIWA-4	BWR	Operación	NIIGATA-KEN	1,067	1,100	1993/12/21
KASHIWAZAKI KARIWA-5	BWR	Operación	NIIGATA-KEN	1,067	1,100	1989/09/12
KASHIWAZAKI KARIWA-6	BWR	Operación	NIIGATA-KEN	1,315	1,356	1996/01/29
KASHIWAZAKI KARIWA-7	BWR	Operación	NIIGATA-KEN	1,315	1,356	1996/12/17
MIHAMA-1	PWR	Operación	FUKUI	320	340	1970/08/08
MIHAMA-2	PWR	Operación	FUKUI	470	500	1972/04/21
MIHAMA-3	PWR	Operación	FUKUI	780	826	1976/02/19
MONJU	FBR	Shutdown de largo plazo	FUKUI	246	280	1995/08/29
OHI-1	PWR	Operación	FUKUI	1,120	1,175	1977/12/23
OHI-2	PWR	Operación	FUKUI	1,120	1,175	1978/10/11
OHI-3	PWR	Operación	FUKUI	1,127	1,180	1991/06/07
OHI-4	PWR	Operación	FUKUI	1,127	1,180	1992/06/19
OHMA	BWR	Construcción	AOMORI	1,325	1,383	
ONAGAWA-1	BWR	Operación	MIYAGI PREFECTURE	498	524	1983/11/18
ONAGAWA-2	BWR	Operación	MIYAGI	796	825	1994/12/23
ONAGAWA-3	BWR	Operación	MIYAGI	796	825	2001/05/30
SENDAI-1	PWR	Operación	KAGOSHIMA	846	890	1983/09/16
SENDAI-2	PWR	Operación	KAGOSHIMA	846	890	1985/04/05
SHIKA-1	BWR	Operación	ISHIKAWA-KEN	505	540	1993/01/12
SHIKA-2	BWR	Operación	ISHIKAWA-KEN	1,108	1,206	2005/07/04
SHIMANE-1	BWR	Operación	SHIMANE	439	460	1973/12/02
SHIMANE-2	BWR	Operación	SHIMANE	789	820	1988/07/11
SHIMANE-3	BWR	Construcción	SHIMANE	1,325	1,373	2011/12/15
TAKAHAMA-1	PWR	Operación	FUKUI	780	826	1974/03/27
TAKAHAMA-2	PWR	Operación	FUKUI	780	826	1975/01/17
TAKAHAMA-3	PWR	Operación	FUKUI	830	870	1984/05/09
TAKAHAMA-4	PWR	Operación	FUKUI	830	870	1984/11/01
TOKAI-1	GCR	Shutdown	IBARAKI-KEN	137	166	1965/11/10

		permanente				
TOKAI-2	BWR	Operación	IBARAKI-KEN	1,060	1,100	1978/03/13
TOMARI-1	PWR	Operación	HOKKAIDO	550	579	1988/12/06
TOMARI-2	PWR	Operación	HOKKAIDO	550	579	1990/08/27
TOMARI-3	PWR	Operación	HOKKAIDO	866	912	2009/03/20
TSURUGA-1	BWR	Operación	FUKUI	340	357	1969/11/16
TSURUGA-2	PWR	Operación	FUKUI	1,108	1,160	1986/06/19

Fuente: Base de datos del Sistema de Información de Reactores de Potencia (PRIS) del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), www.iaea.org

3.2 Sucesión de fallas

a) Sismicidad

La emergencia se suscitó, al parecer, por una sucesión de fallas muy importantes. La primera corresponde al diseño sísmico. El 16 de marzo, Wikileaks publicó un cable, según el cual, “en 2008 el OIEA advirtió al gobierno japonés que las centrales que tenía su país estaban diseñadas para resistir un sismo máximo de 7 grados Richter”; el sismo del 11 de marzo fue mayor.

Después de Chernobyl, los japoneses argumentaban en conferencias internacionales que harían un diseño antisísmico especial para sus reactores, sabiendo que los ubicarían en una zona altamente sísmica.

Pero lo que ha ocurrido es muy serio, pues, el primer criterio para la selección de un sitio para una central nuclear es la sismicidad, después, la disponibilidad de una fuente de agua. Al parecer, el diseño sísmico no fue suficientemente valorado.

b) Pérdida de suministro de energía

Los primeros días la prensa internacional reportó: “El reactor está siendo enfriado con un único generador eléctrico de los 3 que tiene. Los otros 2 de los que consta el sistema de refrigeración han fallado a consecuencia de la catástrofe”.

En las centrales nucleoelectricas existe un sistema de suministro remoto de energía, generalmente, formado por tres generadores diesel, mismos que se alojan en un edificio blindado capaz de resistir el impacto de un proyectil.

Esta vez, la central se quedó sin energía eléctrica afectando el funcionamiento de la misma. Durante las primeras horas, los trabajadores del cuarto de control de la central estuvieron trabajando en la oscuridad.

En la central Tokai-2, operada por la Japan Atomic, se reportó que, “una bomba de agua marina, alimentada por un generador diesel, se paró a causa del tsunami”. Eso ocurrió también en los reactores de Fukushima, falló el sistema remoto de abastecimiento eléctrico, los generadores diesel de esa central no entraron en operación durante la emergencia.

En los primeros momentos se tuvo que trabajar literalmente en la oscuridad, en tanto se intentaba restablecer el suministro eléctrico.

c) Pérdida de refrigerante

Cuando se realiza el diseño conceptual todo se calcula sobre la base de postular el peor accidente posible. El accidente base de diseño que se postula es la pérdida de refrigerante (Loss of Coolant Accident, LOCA). Lo que ahora sucedió fue, precisamente, la pérdida de la refrigeración al núcleo de los reactores.

Al postular el peor accidente se toma en cuenta el concepto de “término fuente”, referido a la cantidad de material radiactivo que puede liberarse durante el accidente, misma que podría ser importante y de amplias consecuencias.

La Agencia de Seguridad Nuclear e Industrial (NISA) de Japón informó: “Se bloqueó la alimentación de agua al circuito de refrigeración y las barras de combustible quedaron totalmente expuestas”. Al faltar el agua de refrigeración, la situación indicaba una circunstancia muy grave. “No es descartable una fusión de núcleo”, se dijo.

Lo que hay en la central japonesa de Fukushima es, precisamente, un accidente por pérdida de refrigerante, lo cual es muy grave. En las centrales nucleares existen sistemas de emergencia para la refrigeración del reactor. Esos sistemas son independientes y redundantes. En Fukushima no funcionaron estos sistemas.

d) Explosiones de hidrógeno

Después, se supo que hubo explosiones de hidrógeno con liberación de vapor. Al 18 de marzo se conocían solamente imágenes tomadas a la distancia, con telefoto. Esas explosiones ocurrieron como consecuencia de la falta de refrigeración que impidió remover el calor residual en el núcleo del reactor. Las explosiones fueron tan fuertes que rompieron la pared superior del edificio que cubre al reactor quedando dañada la contención secundaria. Eso conduciría a una liberación de material radiativo.

La primera explosión ocurrió por la mañana del 11 de marzo en el reactor no. 2 y luego en el reactor no. 1; el 14 de marzo la explosión fue en el reactor no. 3 lesionando a 11 trabajadores. En los tres casos la explosión fue de hidrógeno como resultado de la fusión (meltdown) causada en las barras de combustible nuclear que alcanzaron temperaturas extremadamente altas.

El hidrógeno se acumuló fuera de la contención pero dentro del edificio del reactor. La presencia de Cesio y Iodo radiativos liberados indica que el reactor está dañado.

Las barras de combustible utilizadas en Fukushima son de 3.7 m de longitud, compuestas de pellets de dióxido de uranio dentro de una camisa de Zirconio. Aunque las barras de control detuvieron el proceso de la fisión del uranio que ocurre durante la operación normal del reactor, los productos de fisión siguen produciéndose y generan calor. Si las barras de combustible no se enfrían el encamisado de Zirconio se daña y rompe, liberando pellets de uranio y fragmentos de fisión, como el Cesio y el Iodo radiativos.

La alta temperatura de las barras de combustible hierve al agua continuamente convirtiéndola en vapor. Si no se introduce agua fría, continúan calentándose. Una vez que alcanzan más de 1,200 °C, el Zirconio interactúa con el vapor

y separa al hidrógeno del agua. Tal hidrógeno puede ser liberado del núcleo del reactor y de la vasija de contención, y si se acumula en cantidades suficientes (concentraciones del 4 por ciento o más en el aire), explota como aparentemente ocurrió en los reactores 1 y 3, y posiblemente, en el 2. Las explosiones en los reactores 1 y 3 destruyeron parte de los edificios de los reactores pero, aparentemente, no dañaron masivamente a la vasija de contención de acero del reactor.

La explosión en el reactor 2 parece potencialmente más seria porque afectó la presión en la piscina de supresión, una enorme piscina de agua almacenada en una cámara en forma de dona ubicada debajo del reactor que enfría y captura cualquier escape de materiales. Si la piscina de supresión es dañada o agrietada no puede ayudar a enfriar el reactor, las barras de combustibles permanecen expuestas y el material radiativo puede escapar a la atmósfera.

Si la temperatura continúa ascendiendo, y la reacción del Zirconio y el Oxígeno producen más calor, el encamisado de la vaina de combustible puede quemarse espontáneamente.

La TEPCO procedió a inyectar agua de mar y ácido bórico en dos de los tres reactores. Si no se continúa con tal enfriamiento, podría ocurrir una fusión (meltdown) completa en la cual los pellets escaparían de la vaina de combustible y formarían una piscina fundida en el núcleo del reactor. Si eso continuara a través de la vasija de acero de la contención primaria, se liberarían al ambiente grandes cantidades de radiación.

Según la Japan Atomic Industrial Forum, los sistemas de enfriamiento del núcleo no funcionan en los 3 reactores y en dos de los cuatro se utilizan sistemas de enfriamiento de respaldo. La TEPCO continuaba bombeando agua de mar y ácido bórico en tres reactores, intentando cubrir los elementos combustibles parcialmente expuestos del reactor 2 pero con dificultades.



Explosión de hidrógeno en el reactor 3 el 14 de marzo de 2011

e) SCRAM

Las barras de control están hechas de un compuesto de boro que tiene la propiedad de absorber neutrones y detener las reacciones nucleares mediante la inserción rápida de las barras de control (SCRAM).

Si la SCRAM ocurrió oportunamente no habría reacciones nucleares. Eso no impide, sin embargo, la presencia previa de fragmentos de fisión producidos anteriormente por las reacciones de fisión en cadena. El reactor continúa produciendo calor en ausencia de fisión.

En condiciones normales el calor es removido por el sistema de recirculación. Sin suministro de refrigeración, el calor del núcleo del reactor puede hacer hervir al agua hasta que los elementos combustibles quedas al descubierto y podrían fundirse el encamisado de Zircaloy, liberando el inventario de material radiativo. En los primeros momentos no se reportó con precisión si funcionó adecuadamente la SCRAM o no, se supondría que sí.

f) Fusión del núcleo

La fusión del núcleo se confirmó en otra información: “El reactor más complicado es el número 2, cuya temperatura es muy elevada y en su interior se está produciendo la fusión del núcleo”.

Esto implica que, la fusión (meltdown) del núcleo del reactor empezó muy temprano y es de distinto grado. Algunas informaciones aseguraron que la fusión en el núcleo de los reactores es del 70%, otras señalaron el 30%. En cualquier caso, la fusión del núcleo es un hecho.

Los reactores tipo BWR tienen un sistema de emergencia llamado de “venenos líquidos”. Es una solución a base de Boro para utilizarse en situaciones críticas o extremas.

Las informaciones del momento señalaron que, “en el entorno de las dos plantas nucleares de Fukushima, se está añadiendo **Boro** al agua marina”. Esto significa que, refrigerar los reactores inyectándoles agua de mar, facilitaría el enfriamiento, aunque "muy posiblemente" (sic) los deje inservibles.

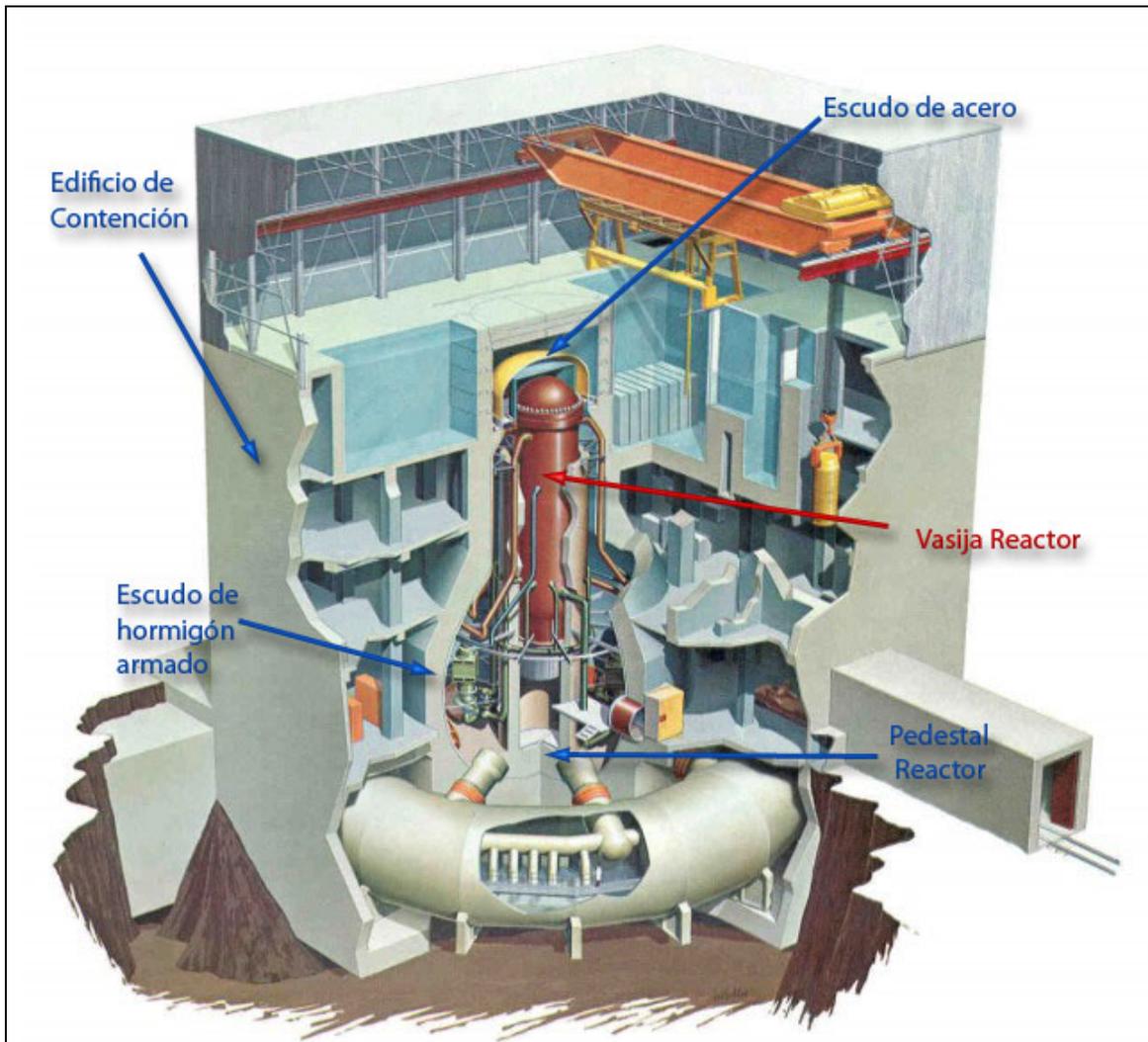
2011, elektron 11 (183) 20, FTE de México

Seguramente así será. Las soluciones de boro son “venenos líquidos” que, al cubrir los combustibles nucleares, detienen cualquier reacción nuclear dejando al núcleo inservible. Por ello, es que se utilizan en condiciones drásticas.

Inyectar Boro en los sistemas de enfriamiento del reactor permite controlar la actividad del núcleo porque el Boro es un fuerte absorbedor de neutrones térmicos. Pero de ser utilizado en los reactores de Fukushima el Boro puede corroer a los elementos combustibles. En

casos de emergencia, sin embargo, el Boro puede ser usado para suprimir las reacciones de fisión en cadena en los elementos combustibles.

El problema, sin embargo, no es solamente con los combustibles del núcleo de los reactores, sino también con el combustible gastado que se encuentra almacenado en las piscinas de relajación. Estas piscinas, a lo largo de 30 años, han acumulado muchas toneladas de combustible irradiado, al menos equivalente a 5 núcleos en cada reactor.



Corte esquemático de un reactor japonés tipo BWR-5 con contención Mark I. El núcleo de combustibles nucleares va dentro de la vasija del reactor. Arriba están las piscinas de relajación; a la izquierda, la piscina de combustible “fresco”, a la derecha, la piscina de combustible irradiado (gastado). La vasija del reactor está protegida por el contenedor primario construido de concreto armado, el conjunto del edificio constituye al contenedor secundario. Abajo del pedestal del reactor está la piscina de supresión del mismo. Fuente: OIEA

3.3. Campo de radiación ionizante

El campo de radiación ionizante producido por los accidentes nucleares en Fukushima es muy preocupante. En la Tierra existe un fondo de radiación natural, debido a la presencia de materiales radiativos en la superficie terrestre y a la radiación cósmica proveniente del Sol. Este tipo de radiación ha existido desde hace muchísimo tiempo y, generalmente, es tan baja que no produce efectos dañinos. Hay también un campo de radiación ionizante producido por diversas actividades médicas e industriales que, generalmente, causan daños.

Existen tres tipos de radiaciones ionizantes que se producen en los núcleos atómicos: las radiaciones alfa (α), beta (β) y gamma (γ). La primera y la segunda son partículas cargadas eléctricamente, en un caso son núcleos de Helio y, en el otro, son electrones; la tercera es de naturaleza electromagnética. Las dos primeras depositan su energía en distancias muy cortas, del orden de milímetros o centímetros; la tercera, es menos energética pero recorre distancias muy largas, del orden de kilómetros. Las dos primeras son muy importantes cuando se incorporan al organismo humano (por inhalación, ingestión o absorción de la piel) produciendo contaminación radiativa interna. La tercera porque produce irradiación externa.

Otros tipos conocidos de radiaciones son los rayos-X, de naturaleza electromagnética, y los neutrones, partículas eléctricamente neutras (sin carga eléctrica) pero muy dañinas cuando interactúan con la materia viva.

En la información del momento, la zona donde se ubican los reactores en Fukushima Daiichi mostraba el nivel más alto de radiación. En varias zonas simplemente se reportó “no hay datos”; los niveles de radiación, sin embargo, podrían ser elevados.

3.4 Magnitudes y unidades radilógicas

La información sobre los niveles y dosis de radiación es sumamente confusa y podrían no ser confiables. Se conoce que en Japón se utilizan las recomendaciones de la Publicación 26 de la Comisión Internacional de Protección Radilógica (ICRP) de 1977 y, seguramente, las normas 10CFR50 del Código Federal de Regulaciones

(CFR) de la Agencia Reguladora Norteamericana (NRC). Esas normas son conservadoras y obsoletas.

Luego de Chernobyl vinieron las recomendaciones de la Publicación ICRP 60 de 1991. De acuerdo con estas recomendaciones los límites de dosis de radiación se redujeron. Sin embargo, en las centrales nucleares de potencia, casi nadie las aplica.

De acuerdo a las normas de 1977, el límite anual de dosis personal para los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE) era de 50 milisievert (mSv) por año. En 1990 se recomendó que bajaran a 20 mSv por año. En el caso de la población en general, las primeras eran de 10 mSv/año, las segundas, de 1 mSv/año. En 2007 se hizo una nueva revisión y la Publicación ICRP 103 mantuvo vigentes los niveles de 1990.

El Sievert (Sv) es una unidad de dosis equivalente de radiación absorbida por el tejido humano. Es una unidad muy grande; por ello, se utilizan submúltiplos, como el miliSievert (mSv) o el microSievert (μ Sv). Antes, las unidades eran el rem y el milirem (mrem).

Estas unidades de dosis se distinguen de las unidades de “exposición” al campo de radiación, expresadas en Coulomb (C) por kg, antes en Roentgen (R). El Coulomb es una unidad de carga eléctrica y corresponde a la carga transportada por una corriente de 1 Ampère (A) en un segundo (s). La corriente eléctrica está formada de electrones, partículas que ionizan a la materia.

Existe también la unidad de “actividad” llamada Becquerel (Bq), antes era el Curie (Ci), misma que es muy pequeña y equivale a una desintegración (del núcleo atómico radiativo) por segundo, generalmente, una radiación nuclear por segundo; entonces, se utilizan múltiplos, como el kilo-Becquerel (kBq) o el mega-Becquerel (MBq).

El C/kg permite medir el nivel de exposición (externa) al campo de radiación ionizante. El Bq permite estimar la actividad de un radionúclido que ha sido incorporado al organismo, el cual es irradiado y absorbe cierta dosis por contaminación radiativa, interna y/o externa. El Sv es una medida de la dosis equivalente, interna y/o externa, recibida por los trabajadores y/o la población en general debida a la exposición al campo de radiación.

Estas cantidades y sus equivalencias con las anteriores se indican a continuación.

Magnitudes y unidades radilógicas

Magnitud	Definición	Unidad	
		SI	Anteriores
Actividad	Número de desintegraciones por unidad de tiempo	Becquerel (Bq). 1 Bq=1 dps (desintegración por segundo)	Curie (Ci). 1 Ci=3.7×10 ⁷ Bq
Exposición	Carga total de energía liberada por unidad de masa de aire (seco)	Coulomb/kg	Roentgen (R). 1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
Tasa de exposición	Exposición por unidad de tiempo	1 C/kg·s	1 R/h, 1 R/s
Dosis absorbida	Energía depositada por unidad de masa de material	Gray (Gy). 1 Gy=1 Joule/kg	rad. 1 rad=100 erg/g. 1 Gy=100 rad
Tasa de dosis absorbida	Dosis absorbida por unidad de tiempo	1 Gy/s	1 rad/min, 1 rad/h
Dosis equivalente	La dosis absorbida que produce efectos distintos según el tipo de radiación. La dosis equivalente al tejido es independiente de la radiación que la haya producido	Sievert (Sv)	rem. 1 Sv=100 rem
Dosis efectiva	Suma ponderada de la dosis equivalente en los distintos órganos	Sievert (Sv)	rem. 1 Sv=100 rem

SI: Sistema Internacional, kg: kilogramo, g: gramo, h: hora, min: minuto, s: segundo.

Las unidades están relacionadas pero no son las mismas ni se relacionan directamente. Algunas informaciones de la prensa internacional reportan los niveles de radiación en términos de dosis que no es lo mismo que exposición al campo de radiación. Además, se reportan los datos en microSievert, la cual es una unidad muy pequeña y hasta difícil de medir, lo que permite minimizar la gravedad aparentando una situación que no es real. Eso corresponde a la costumbre de utilizar magnitudes operacionales y la tendencia de los fabricantes de instrumentos nucleares de integrar las lecturas reportando la exposición en términos de dosis equivalente.

Las magnitudes operacionales se emplean en aplicaciones prácticas de vigilancia radilógica y para investigar situaciones que involucren exposiciones externas. Se definen para la medida y la asignación de dosis en el cuerpo. Para dosimetría interna no se han definido magnitudes operacionales que provean directamente de una estimación de las dosis equivalente o la efectiva.

De acuerdo al ICRP 103, el Sievert es la unidad del SI para la dosis equivalente, la dosis efectiva y las magnitudes operacionales.

Eso da mediciones aproximadas y conceptualmente confusas, porque no es lo mismo exposición que dosis. En todo caso importa reportar la tasa de dosis, no nadamás la dosis. Por otra parte, la graduación de los instrumentos incluye escalas tan bajas que podrían reportar “dosis” inferiores al nivel del fondo de radiación ambiental, lo cual no es correcto.

Si se toma en consideración el límite de dosis para los trabajadores en 50 mSv/año, eso equivaldría a 137 µSv/día; para la población serían 27 µSv/día. Con el límite de 20 mSv/año, habría una equivalencia relativa de 55 µSv/día; para trabajadores y 3 µSv/día para la población en general. Esta deducción, sin embargo, es burda, omite el efecto de acumulación de dosis y el detrimento causado por las bajas dosis de radiación.

No obstante, el 13 de marzo se reportaron en Fukushima dosis entre 882 y 1,577 µSv para los trabajadores y, 500 mSv para la población en

general. En ningún caso se dijo en que lapso se recibieron esas dosis, pero debido a lo reciente del suceso seguramente fueron horas. Evidentemente, se trata de dosis muy elevadas.

Los niveles de radiación reportados inicialmente fluctuaban bastante. La revista Scientific American publicó los siguientes hechos rápidos acerca de la radiación en Fukushima:

Radiación en Fukushima

Dosis de radiación en la frontera de la central nuclear de Fukushima Daiichi, el 16 de marzo	1.9 mSv/h
Dosis pico de radiación medida dentro de Fukushima Daiichi el 15 de marzo	400 mSv/h
Dosis máxima permitida para trabajadores en Estados Unidos	50 mSv/año
Exposición promedio de residentes en EU a las fuentes naturales y artificiales de radiación	6.2 mSv/año
Exposición total estimada en la frontera de la central nuclear Three Mile Island, en Pensilvania, durante el accidente de 1979	1 mSv o menos
Dosis promedio total de los 114,500 individuos evacuados durante 1986 en el desastre de Chernobyl	31 mSv
Vida media del Iodo-131, isótopo radiativo liberado en accidentes nucleares	8 días
Vida media del Cesio-137, isótopo radiativo liberado en accidentes nucleares	30 años
Productos de decaimiento del I-131 y Cs-137	Ambos son emisores de radiación gama y partículas beta (electrones o positrones)
Cantidad de combustible nuclear en el reactor 4 de Chernobyl accidentado en 1986	190 toneladas métricas
Cantidad de combustible nuclear y productos de fisión liberados a la atmósfera durante el desastre de Chernobyl	25 a 27 toneladas métricas
Cantidad aproximada de combustible nuclear en cada reactor dañado de Fukushima Daiichi	70 a 100 toneladas métricas

Fuentes: Japan Atomic Industrial Forum, International Atomic Energy Agency, U.S. Nuclear Regulatory Commission, National Council on Radiation Protection and Measurements, U.S. Environmental Protection Agency, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, National Institute of Standards and Technology, Nuclear Energy Institute

En la prensa internacional se habla de dosis “permitida”. En el caso del campo de radiación ionizante No existe NINGUNA dosis permitida.

Se distingue, bajo diversos criterios, entre las dosis aplicadas con propósitos médicos de las laborales; hay también límites de dosis aplicables en situaciones de emergencia.

En general, los límites de dosis se refieren a una región cuyo valor superior está expresamente prohibido pero cuyo valor inferior no está automáticamente permitido.

La información disponible indicaría en Fukushima dosis de alarma y pudieran ser mayores, debidas no solamente a la exposición al campo externo de radiación sino a la contaminación interna por incorporación de radionúclidos.

La liberación de material radiativo al ambiente incluye a la atmósfera, los suelos, plantas, personas, animales, cultivos y fuentes de agua, entre otras, al mar.

3.5 Sistema de Limitación de Dosis

La (ICRP) establece recomendaciones para la protección contra los posibles efectos producidos por el campo de radiación ionizante. Entre otros aspectos, existe un Sistema de Limitación de Dosis, aplicable a los trabajadores y a la población general, así como un conjunto de medidas en situaciones normales y de emergencia.

De acuerdo a la Publicación ICRP 103 (2007), los límites de dosis son sólo aplicables a situaciones de exposición planificada excepto en las exposiciones médicas de pacientes.

Dentro de una categoría de exposición, ocupacional o de la población, los límites de dosis se aplican a la suma de las exposiciones provocadas por fuentes relacionadas con prácticas que ya están justificadas.

Límites de dosis recomendados en situaciones de exposición planificadas^a

Tipo de límite	Ocupacional	Población
Dosis efectiva	20 mSv por año promediada en periodos definidos de 5 años ^e	1 mSv en un año ^f
Dosis equivalente anual en:		
Cristalino ^b	150 mSv	15 mSv
Piel ^{c, d}	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	---

Fuente: ICRP Publicación 103 (2007).

^a Los límites de dosis efectivas son para la suma de las dosis efectivas de relevancia procedentes de exposiciones externas en el periodo de tiempo especificado y la dosis efectiva comprometida de la incorporación de radionúclidos en el mismo periodo. Para adultos, la dosis efectiva comprometida se calcula para un periodo de 50 años tras la incorporación, mientras que para niños se calcula para el periodo de hasta 70 años de edad.

^b Este límite está actualmente siendo revisado por un Grupo de Trabajo de la ICRP.

^c La limitación de dosis efectiva proporciona una protección suficiente para la piel frente a efectos estocásticos.

^d Promediado en un área de 1 cm² de piel, independientemente del área expuesta.

^e Con la condición adicional de que la dosis efectiva no debe exceder los **50 mSv** en ninguno de los años individuales. En el caso de la exposición ocupacional de mujeres embarazadas se aplican restricciones adicionales.

^f En circunstancias especiales, se puede permitir un nivel superior de dosis efectiva en un único año, a condición de que la media durante 5 años no exceda **1 mSv** por año.

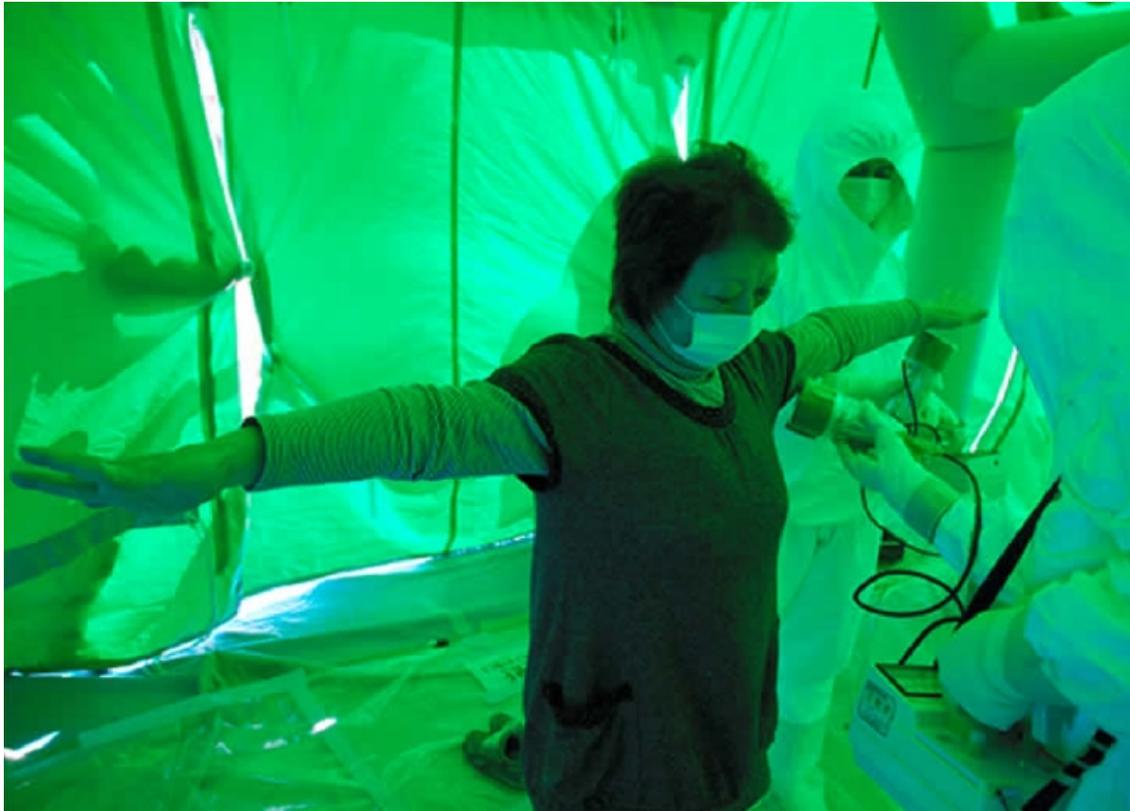
El campo de radiación ionizante produce daños a la salud. Por ello, los límites para la población son muy inferiores. Pero en Japón se siguen las normas norteamericanas que son muy conservadoras y permiten límites muy altos.

Si se reportaron dosis de 20 mSv/hora, comparadas con los 20 mSv/año, entonces lo que está ocurriendo en Fukushima Daiichi es la exposición a un campo intenso de radiación, arriba de cualquier límite establecido. Los datos reales pueden ser más altos y podrían ocasionar serios daños, a diversos plazos.

El gobierno japonés y la TEPCO procedieron a monitorear radilógicamente a la

población. En estos casos, los niños, jóvenes y mujeres en edad reproductiva son los más vulnerables, ya que, los organismos en desarrollo son más radiosensibles.

Entre tanto, está por verse la liberación radiativa a la atmósfera y al mar. El vapor liberado por las explosiones en el contenedor secundario es radiativo. Eso significa que se formará una nube y que habrá lluvia radiativa. No obstante, sería una liberación “controlada” de radiatividad cuyo alcance no está preciso en estos momentos. De seguir la fusión de los núcleos podrían liberarse productos de fisión en una liberación incontrolada.



Población monitoreada radilógicamente después del accidente nuclear

4. Seguridad nuclear

4.1 Sistemas de refrigeración de emergencia

La seguridad nuclear no es convencional e incluye diferentes aspectos. El primero corresponde al estudio (macro y micro) del sitio. En estos estudios, el primer criterio se refiere a la sismicidad y características geológicas, seleccionando sitios de baja sismicidad y donde no exista ninguna falla geológica. En el caso de Japón se trata de una región especial que supone diseños especiales que ahora no resistieron al terremoto y posterior tsunami.

Luego se considera al diseño propiamente de la central, realizado a partir de postular el accidente que pudiera ocurrir en las peores condiciones, tales como la ocurrencia de un sismo o de vientos máximos posibles que pudieran llevar a la pérdida de refrigeración del núcleo del reactor y posterior fusión del mismo.

El diseño incluye una serie de sistemas cuyos objetivos son: 1.- detener la operación del

reactor ante cualquier situación que pudiera poner en riesgo la seguridad. Esto se logra mediante la inserción súbita de las barras de control en el núcleo del reactor, misma que ocurre en algunos pocos segundos; 2- asegurar que el núcleo estará adecuadamente refrigerado en cualquier condición. Durante la operación normal esta función la realiza el Sistema de Agua de Alimentación, que consta de dos ramas independientes; cada una de ellas puede proporcionar el 50 por ciento del flujo total que se requiere para refrigerar al núcleo en condiciones de máxima generación térmica.

Para que este sistema quedase fuera de servicio, es necesario que fallen ambas ramas. De ser así, el enfriamiento del reactor quedaría a cargo de los Sistemas de Enfriamiento de Emergencia del Núcleo (ECCS), cuya función consiste en evitar que llegue a alcanzar temperaturas superiores a 1,500 °C, situación que provoca la fusión de las barras de combustible nuclear.

Estos sistemas de enfriamiento son tres: el de Aspersión del Núcleo de Alta Presión, el de

2011, *elektron* 11 (183) 26, FTE de México

Aspersión del Núcleo de Baja Presión y el Sistema de Inyección de Refrigerante a Baja Presión. Cualquiera de los tres sistemas tiene capacidad para mantener refrigerado al núcleo y son totalmente independientes. De allí que se considere (teóricamente) que la probabilidad de que llegasen a fallar simultáneamente es muy pequeña. En Fukushima ha quedado demostrado que tal probabilidad no era tan pequeña ni tampoco cero.

4.2 Sistema de barreras múltiples

El diseño de una central nuclear prevé que pudiera ocurrir la falla simultánea. De ser así el calor generado en el núcleo podría fundir las pastillas del combustible de uranio y las vainas de Zircaloy en que están contenidas. Ese evento se considera muy grave porque podría haber dispersión de los productos de fisión contenidos en el combustible fundido.

Para evitarlo el diseño nuclear incluye un sistema redundante de barreras múltiples. Estos son:

1- Pastillas de combustible, que son cilindros cerámicos de dióxido de Uranio de 1 cm de altura por 1 cm de diámetro. Como la mayor parte de los fragmentos de fisión son sólidos, en condiciones normales de operación, quedan atrapados en la matriz de la estructura cristalina del cilindro cerámico.

2- Vainas de Zircaloy, que son tubos herméticos de 1 cm de diámetro y 4 m de longitud hechos de una aleación de Zirconio que contiene a las pastillas de combustible.

3- Vasija del reactor, consistente en un recipiente de acero forjado de 22 m de altura, 5.60 m de diámetro y paredes cuyo espesor varía entre 15 y 20 cm. Para que los productos de la fisión pudieran traspasar esta barrera tendría que fundirse el fondo de la vasija, en cuyo caso, quedarían bajo el control de la cuarta barrera.

4- Contenedor primario, el cual es un edificio de concreto armado con paredes de un espesor mínimo de 1.5 m, forrado internamente con una placa de acero de 1.5 cm de espesor para garantizar una hermeticidad absoluta. La probabilidad de que el material pudiese saltar esta barrera se considera muy pequeña. Si fuese el caso, se dispone de una barrera más.

5- Contenedor secundario, llamado también edificio del reactor, diseñado para rodear al contenedor primario. Es una construcción de

concreto armado cuyas paredes tienen de 1.2 a 1.5 m de espesor. El contenedor secundario está provisto de un sistema de control atmosférico que mantiene siempre una presión inferior en el aire del interior, de tal manera que, los productos radiativos no puedan escapar al exterior.

De acuerdo a esta filosofía de las barreras múltiples, se consideraba que la probabilidad de ocurrencia de un accidente importante era muy pequeña y, en caso de presentarse, no daría lugar a un escape de material radiativo. En Fukushima falló esa filosofía, el alcance de las consecuencias es difícil de estimar por el momento pero se está ante una situación muy seria.

El mito de la seguridad nuclear en Japón se ha derrumbado. El accidente del reactor 2 de la central nucleoelectrónica de Three Mile Island, ocasionó en 1979 la fusión parcial del núcleo del reactor. Sin embargo, no se produjo una dispersión importante de material radiativo.

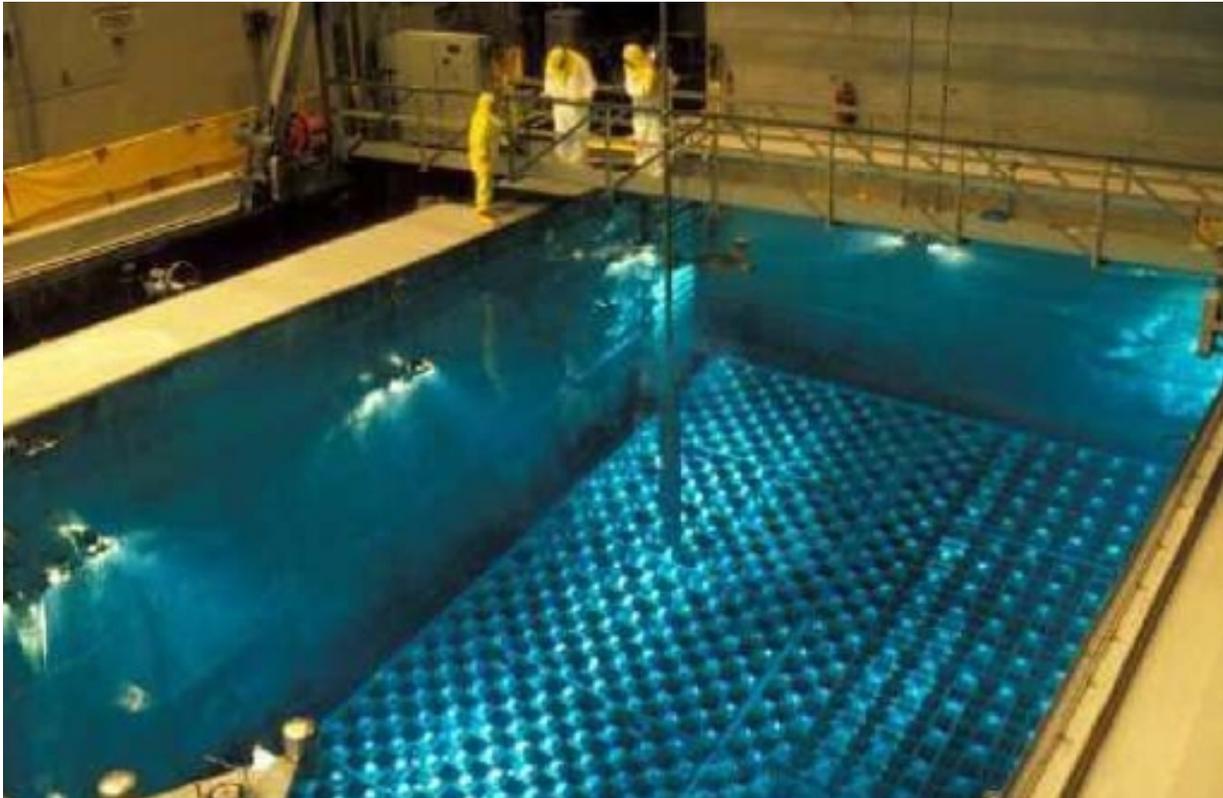
En el accidente del reactor 4 de la central nucleoelectrónica de Chernobyl, en 1986, una explosión de hidrógeno produjo la ruptura del núcleo. El diseño de la central no incluía contenedor secundario y hubo un esparcimiento importante de material radiativo al medio ambiente.

En la central nucleoelectrónica de Fukushima también hubo explosiones de hidrógeno que destruyeron a la contención secundaria. Con la liberación de vapor también escaparon algunos materiales radiativos, cuyo alcance estaría por determinarse.

Además, la vasija de los reactores japoneses está asentada en un pedestal que tiene abajo una piscina de supresión en forma de dona para reducir la presión de la vasija de presión del reactor en caso de falla o accidente. Los sistemas de emergencia son independientes pero en Fukushima parece que fallaron todos los sistemas.

Al parecer, la seguridad a ultranza falló en Fukushima. El contenedor secundario del reactor fue destruido por la explosión de hidrógeno. Debido a la posible fusión del núcleo de los reactores, por falta de refrigeración, está en duda la integridad de los elementos combustibles e, incluso, la contención primaria.

Adicionalmente, la falta de refrigeración afecta a las piscinas de relajación donde se almacena in situ al combustible gastado que está muy "caliente", está muy radiativo.



Arreglo de combustible gastado en la piscina de relajación en un reactor BWR

5. La emergencia nuclear en Fukushima

5.1 Información del OIEA

Con relación a la situación de los reactores de Fukushima Daiichi, el OIEA reportó el 17 de marzo que, la energía para la refrigeración no funcionaba en los reactores 1, 2, 3 y 4. En el caso de los reactores 1, 2 y 3 “se sospecha” daño al núcleo. En el caso del reactor 2 se sospecha daño a la integridad de la contención; en el caso del 3 no se reporta información. La generación eléctrica remota no funciona en ninguno de los reactores.

El edificio de contención secundaria estaba severamente dañado en las unidades 1, 3 y 4. El nivel de agua en la vasija de presión del reactor en las unidades 1, 2 y 3 estaba a la mitad o más. Además, hay daños al núcleo en tres de las unidades. Respecto a las piscinas de combustible gastado no se reportaron datos por no existir o desconocerse. Pero se estimaba que la temperatura en esta piscina se estaba incrementando en todas las unidades. Esta es una situación preocupante que el

propio OIEA, que se ha visto muy mal, estaba reconociendo.

De acuerdo a la escala internacional de eventos nucleares y radiológicos (INES) el accidente de Fukushima se ubicaba hace apenas unas horas (18 de marzo) en el nivel 5, esto es, un accidente con consecuencias amplias. Se pasó del nivel 4, que es un accidente con consecuencias locales, y había un agravamiento. Según fuentes de Francia ya se estaba en el nivel 6. Este es considerado como un “accidente serio”. Finalmente, está el nivel 7 llamado “accidente mayor” o “severo”.

Un accidente severo de nivel 7 implica efectos amplios a la salud y al medio ambiente, debido a la liberación externa de una fracción significativa del inventario radiativo del núcleo de un reactor nuclear. Un accidente mayor de este tipo requiere la implementación de contramedidas planeadas y amplias.

En ese momento, el OIEA estimaba que, en la unidad 1 había fusión parcial del núcleo, en la unidad 2 se sospechaba fusión del núcleo. En las

2011, *elektron* 11 (183) 28, FTE de México

unidades 5 y 6 se reportó que estaba subiendo el calor en las piscinas de combustible gastado.

5.2 Acciones de emergencia

Las acciones tomadas en los primeros días eran desesperadas revelando la improvisación de las medidas de respuesta ante la emergencia para la que no estaba preparada la corporación.

El 18 de marzo, la TEPCO inició el rociado de los reactores con agua de mar a través de helicópteros y se tuvo que suspender la operación. La intensidad del campo de radiación era tal, (como si el reactor estuviera abierto que no debiera estarlo; las piscinas si lo están porque ya no hay contenedor secundario), que los helicópteros militares no podían volar en círculo sino en línea recta y descargar su contenido de agua inmediatamente. Ese día vertieron 30 toneladas de agua, es decir, 30 metros cúbicos, cantidad muy inferior para la refrigeración.

Una central nuclear de potencia utiliza para su refrigeración 60 metros cúbicos por segundo para el caso de un solo reactor. En Fukushima son 4 los reactores dañados. De manera que 30 metros cúbicos en un día es muy poco y los helicópteros ni siquiera pueden acercarse a la vasija del reactor. Pero, además, el agua de mar es salina y el circuito de refrigeración del núcleo es de agua desmineralizada. Inyectar agua de mar no es apropiado porque podría corroer a los elementos combustibles. Eso haría impredecible la transferencia de calor y los reactores quedarían inutilizables.

Debido al envejecimiento de los reactores, la central se encuentra sujeta a la corrosión generalizada de los materiales de construcción. Sería muy grave que se produjera un fenómeno de sensitización, es decir, fisuración por corrosión intergranular en materiales de aceros inoxidable, lo cual daría lugar a fugas de material radiactivo. Eso puede ocurrir en la medida en que no se logre refrigerar adecuadamente al núcleo de los reactores, cuyo circuito de recirculación de agua purificada es cerrado, y la temperatura aumentara entre 400 y 800 °C.

Pero, aunque los helicópteros pudieran acercarse, el agua vertida caerá fuera del reactor, el cual se supone que está cubierto por su tapa y un escudo de acero. De no ser así la situación sería peor. Tal vez, el agua podría caer en las piscinas de

relajación que almacenan al combustible gastado, mismas que también quedaron sin refrigeración.

Pero, además, esa agua de mar ¿a dónde va a ir? En operación normal, los reactores tienen su propio circuito de refrigeración y, el agua de enfriamiento de la central se obtiene del mar y se regresa a éste.

En el presente caso, una parte del agua de mar quedará dentro de la central y, ¿qué harán con esa agua? Como el reactor está dañado, van a irradiar y/o contaminar radiativamente al agua y, ¿dónde van a almacenarla? Hay fuertes contradicciones.

El OIEA confirmó las siguientes temperaturas en las piscinas de combustible nuclear gastado en las unidades 4, 5 y 6 de la central Fukushima Daiichi:

El 13 de marzo, en la unidad 4 había 84 °C, el 17 de marzo en la unidad 5 la temperatura alcanzó 65.5 °C, el mismo día en la unidad 6 había 62.5 °C. En condiciones normales la temperatura debe ser menor de 25 °C. La temperatura ha venido subiendo y eso no se puede desestimar. Si persiste la falta de agua de refrigeración, la temperatura podía aumentar, el agua tendería a evaporarse y los combustibles quedarían totalmente descubiertos y calientes, con riesgo de fundirse.

Estas temperaturas son inferiores para ocasionar la fusión del encamisado de las barras de combustible. Sin embargo, desde los primeros días se presumía fusión del núcleo.

Pero elementos del ejército nipón y de la policía nacional seguían intentando bombear agua dentro de las piscinas de combustible gastado del reactor 3 pero, debido a los altos niveles de radiación, no pudieron acercarse suficientemente.

Según el Japan Atomic Industrial Forum (JAIF) la situación en la central nuclear de Fukushima en los primeros momentos era la siguiente:

- Los edificios de los reactores 1, 3 y 4 fueron “severamente dañados”; el del reactor 2 fue “ligeramente dañado”;
- El enfriamiento no funcionó en los reactores 1 y 3;
- Los niveles de agua cubrían más de la mitad del combustible en el reactor 2; en los reactores 1 y 3 los niveles de agua cubrían solamente la mitad del combustible;

- La integridad estructural de las piscinas de combustible gastado se desconocía en los reactores 1 y 2;
- En los reactores 3 y 4 había bajos niveles de agua; las temperaturas en las piscinas continuaban aumentando en los reactores 5 y 6.

Las piscinas de combustible gastado son de especial preocupación. Según el Mainichi Daily News, en cada reactor había las siguientes cantidades de combustible gastado:

Unidad	Toneladas de combustible nuclear
Reactor 1	150
Reactor 2	81
Reactor 3	88
Reactor 4	135
Reactor 5	142
Reactor 6	151
TOTAL	748

En un lugar separado hay una piscina común de combustible irradiado que contiene 1,097 toneladas de combustible, y otras 70 toneladas de materiales nucleares están en almacenamiento en seco.

Los combustibles del núcleo del reactor 4 fueron movidos recientemente a su piscina de combustible gastado. Este combustible es relativamente fresco y térmicamente caliente. Eso podría implicar el riesgo de que, al faltar agua de enfriamiento, la actual pueda hervir y, en una reacción exotérmica con el Zirconio, éste pueda quemarse.

5.3 Ordenes patronales suicidas

El 17 de marzo el OIEA informó que “17 personas (9 de ellos empleados de TEPCO y 8 subcontratados) sufrieron deposición de material radiativo en sus caras, pero no fueron hospitalizados debido a los bajos niveles de exposición” a la radiación. ¿Eso, qué quiere decir? Que los trabajadores que están al frente de la emergencia nuclear son trabajadores subcontratados (outsourcing), es decir, sujetos al trabajo precario en una industria tecnológica de vanguardia. Esto revela

2011, *elektron* 11 (183) 29, FTE de México la gran voracidad de las corporaciones transnacionales.

En la prensa se dijo: “Son los 50 héroes de Fukushima” (www.abc.es/20110315/internacional/abc-fukushima-201103151509.html). En realidad, son 50 suicidas porque para las corporaciones la vida humana no cuenta. En la industria nuclear los trabajadores son considerados como objetos, como cosas. La brutalidad del proceso de trabajo nuclear es tal, sobretodo en una situación de emergencia, que la vida humana no les importa a las corporaciones. Pero, además, la emergencia se enfrenta con solo 50 trabajadores, un número infra-mínimo y sin preparación adecuada. He allí la brutalidad en una gran concentración de capital, donde la fuerza natural, representada por el trabajo, se enfrenta a la enorme fuerza social, representada por el capital, en condiciones completamente desfavorables.

El campo de radiación producido ha llevado a la evacuación de población en 20 km a la redonda de la central. Luego se aumentó a 30 km. Los gobiernos extranjeros han procedido a retirar a su personal. Pero varios miles de japoneses no tienen a dónde ir, el gobierno no ha tomado medidas congruentes. Más bien se han planteado propuestas absurdas como pedirle a los habitantes que “no salgan de sus casas” cuando precisamente lo que hay que hacer es alejarse lo más rápidamente y lejos posible del campo de radiación.

La TEPCO evacuó al personal no esencial (sic) debido a que los niveles de radiación indicaban 400 mSv/h y, en la frontera de la planta, había 6 mSv/h, suficiente para que se alcanzara el nivel de las regulaciones japonesa para un año completo en tan solo 9 horas. Esos trabajadores fueron despedidos inmediatamente y sustituidos por contratistas y subcontratistas.

El Ministerio de Salud de Japón elevó el límite “legal” a 250 mSv/año, cinco veces el límite viejo, utilizado en Japón y Estados Unidos, de 50 mSv/año para los TOEs.

Los trabajadores seguían luchando para enfriar a los reactores sobrecalentados bombeando agua de mar a través del sistema de contra-incendios, exponiéndose a los daños del alto campo de radiación y a las partículas radiativas liberadas por las explosiones de hidrógeno en una serie de incendios en la central.



Rociado de agua de mar con helicópteros sobre los edificios (sic) dañados en Fukushima

6. Afectaciones a la salud y la vida

6.1 Detrimento a la salud

Hay un concepto que se llama “detrimento”, definido por la ICRP como: “El daño total en la salud experimentado por un grupo expuesto y sus descendientes como resultado de la exposición del grupo a una fuente de radiación.

“El detrimento es un concepto multiatributo.

“Sus principales componentes son las magnitudes *estocásticas*: probabilidad de un cáncer fatal atribuible, probabilidad ponderada de un cáncer no fatal atribuible, probabilidad ponderada de efectos heredables severos, y el acortamiento de la expectativa de vida si el daño ocurre”.

El “detrimento por radiación” es “un concepto utilizado por la ICRP para cuantificar los efectos dañinos para la salud de la exposición a radiación en diferentes partes del cuerpo. Se define por la Comisión como una función de diversos factores, incluyendo la *incidencia de cáncer o efectos heredables* relacionados con la radiación, *letalidad de estas condiciones, calidad de vida y el*

acortamiento de la expectativa de vida por causa de estas condiciones”.

La emergencia que ahora se ha suscitado está definida por la misma ICRP como: “Una situación o un acontecimiento no rutinario que hacen necesaria la *acción inmediata* sobre todo para atenuar un peligro o consecuencias adversas para la *salud y seguridad humana, la calidad de vida, la propiedad o el medioambiente*. Esto incluye las situaciones para las cuales se garantiza la *acción inmediata para atenuar los efectos de un peligro percibido*”.

Allí está todo, pero las corporaciones y sus gobiernos lo único que defienden es la propiedad, que no se vaya a destruir esa gran concentración de capital. En consecuencia, no se toman las medidas inmediatas pertinentes.

Se está realizando un monitoreo radiológico a la población. Sin tener la información debida a muchos se les ha ocurrido utilizar mascarillas de tela que no son las adecuadas para estos casos.

Respecto a los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes aún están por determinarse, no solo en sus aspectos somáticos sino genéticos.

Los primeros corresponden a efectos deterministas (causalmente determinados por sucesos previos) que causan lesiones tisulares y ocurren en los individuos expuestos al campo de radiación; los segundos son de naturaleza estocástica (probabilística) que causan efectos cancerígenos o heredables, mismos que se presentan en el individuo expuesto o en las generaciones posteriores. Para el primer tipo de efectos se requiere de un umbral de dosis, para los segundos probablemente no. Pero no son nada más la irradiación externa o la contaminación interna; los posibles efectos debidos a las dosis bajas de radiación están nuevamente en la discusión.

6.2 Efectos biológicos debidos a las radiaciones ionizantes

La Publicación ICRP 103 (2007) hace un conjunto de consideraciones respecto a los efectos biológicos producidos por el campo de radiación ionizante.

La mayoría de los efectos adversos para la salud por exposición a la radiación pueden agruparse en dos categorías generales:

- Efectos deterministas (reacciones tisulares nocivas) debidos principalmente a la muerte o defectos en el funcionamiento de las células tras dosis elevadas; y
- Efectos estocásticos, es decir, cáncer y efectos heredables implicando, bien el desarrollo de cáncer en los individuos expuestos debido a la mutación de células somáticas o una enfermedad heredable en su progenie debido a la mutación en células reproductoras (germinales).

También se consideran los efectos en el embrión y el feto, y las enfermedades diferentes al cáncer.

En la Publicación 60 (ICRP 1991) la Comisión clasificó los efectos de la radiación que causan reacciones tisulares como efectos deterministas y utilizó el término efectos estocásticos para el cáncer y enfermedades heredables inducidas por la radiación.

Generalmente la inducción de reacciones tisulares se caracteriza por un umbral de dosis. La razón de la presencia de dicho umbral es que se necesita que el daño por la radiación (defecto serio del funcionamiento o muerte) a una población crítica de células en un tejido dado sea continuo antes de que la lesión se exprese de una forma clínicamente relevante. Por encima del umbral la

2011, *elektron* 11 (183) 31, FTE de México gravedad de la lesión, incluyendo el deterioro de la capacidad de recuperación del tejido, aumenta con la dosis.

Las reacciones tisulares tempranas (días a semanas) a la radiación, en casos donde se ha excedido la dosis umbral, pueden ser del tipo inflamatorio como consecuencia de la liberación de factores celulares o pueden ser reacciones que resultan de la pérdida de células (*Publicación 59*; ICRP 1991).

Las reacciones tisulares tardías (meses a años) puede ser del tipo genérico si se originan como una consecuencia directa del daño a ese tejido.

La Comisión estima que los límites de dosis ocupacional y del público, incluyendo los límites de dosis equivalente para la piel, manos/pies y ojos, asignados en la Publicación 60 (ICRP, 1991) continúan siendo aplicables para prevenir la aparición de efectos deterministas (reacciones tisulares).

En el caso del cáncer, los estudios epidemiológicos y experimentales proporcionan evidencia del riesgo de la radiación a dosis de alrededor de 100 mSv o menores aunque con incertidumbres. En el caso de enfermedades heredables, aunque no existe evidencia directa de los riesgos de la radiación en las personas, las observaciones experimentales argumentan convincentemente que esos riesgos para las futuras generaciones deberían estar incluidos en el sistema de protección.

La acumulación desde 1990 de datos celulares y en animales de experimentación relacionados con la tumorigénesis inducida por radiación, ha fortalecido la visión de que los procesos de respuesta al daño del ADN en células únicas son de una importancia crítica en el desarrollo de un cáncer después de la exposición a radiación. Estos datos, junto con los adelantos en el conocimiento del proceso cancerígeno en general, aumenta la confianza en que la información detallada sobre la respuesta/reparación del daño al ADN y la inducción de mutaciones en genes o cromosomas puede contribuir significativamente a las estimaciones sobre el incremento, asociado a la radiación, de la incidencia de cáncer a dosis bajas.

Desde 1990, se ha acumulado información epidemiológica suplementaria sobre el riesgo de cáncer en un órgano específico como consecuencia de exposición a radiación. Mucha de la nueva información proviene del continuo seguimiento de

2011, *elektron* 11 (183) 32, FTE de México

la salud de los supervivientes de las explosiones de bombas atómicas en Japón en 1945 - el estudio a lo largo de toda la vida (LSS del inglés Life Span Study).

Un factor de eficacia de dosis y tasa de dosis (DDREF) ha sido usado por el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), para proyectar el riesgo de cáncer determinado a dosis y tasas de dosis elevadas, a los riesgos que se aplicarían a las dosis y tasas de dosis bajas. Continúa sin haber ninguna evidencia directa de que la exposición de los padres a la radiación conduzca a un exceso de enfermedad heredable en la progenie. Sin embargo, la Comisión estima que existe una evidencia convincente de que la radiación causa efectos heredables en animales de experimentación.

Por consiguiente, la Comisión prudentemente continúa incluyendo el riesgo de los efectos heredables en su sistema de protección radiológica. Se ha usado la nueva información sobre los riesgos de cáncer inducido por la radiación y los efectos heredables en la modelización del riesgo y

en los cálculos del detrimento de la enfermedad, con objeto de estimar los coeficientes nominales de riesgo promediados por género.

Continúa siendo política de la Comisión que los coeficientes nominales de riesgo recomendados deberían aplicarse a poblaciones enteras y no a individuos. La Comisión cree que esta política proporciona un sistema general de protección que es simple y suficientemente sólido. Sin embargo, manteniendo esta política la Comisión reconoce que existen diferencias significativas en el riesgo entre hombres y mujeres (particularmente para la mama) y respecto a la edad en la exposición.

Hay más consideraciones sobre otros efectos. Los accidentes nucleares son muy aparatosos y siempre producen dudas. El temor está justificado porque se pone en riesgo la salud y la vida, de los trabajadores, población y medio ambiente. Las corporaciones y gobiernos, generalmente, minimizan los hechos pero los mismos organismos internacionales especializados han realizado estudios y proporcionan información tendiente, precisamente, a la protección contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes.



Explosión de hidrógeno en los reactores de la central nuclear de Fukushima

6.3 Decisiones e implicaciones

La responsabilidad de las acciones es de quienes dirigen la emergencia, es decir, la TEPCO y el gobierno japonés. A los sindicatos japoneses correspondería un papel relevante.

Desafortunadamente, no es el caso pues están ausentes. Lo mismo puede decirse en otras partes pues el sindicalismo nuclear en el mundo está muy atrás de cumplir con sus deberes elementales. Los trabajadores nucleares, por su parte, no deciden; han asumido solamente su papel de asalariados y están sujetos al trabajo precario de los contratistas.

Podrían tomarse diversas acciones, entre otras, activar la utilización de “venenos líquidos”, mismos que destruirían a los reactores pero evitarían una posible catástrofe. De cualquier modo, al haber fusión (meltdown) del núcleo los reactores quedarán inservibles y habrá que proceder al desmantelamiento (decommissioning) de la central, operación muy costosa y de largo plazo.

Obviamente, esto implica una gran decisión que la corporación y el gobierno japonés no quieren tomar, prefieren que se destruya todo lo que se tenga que destruir para reconstruirlo. El Primer Ministro japonés ya ha declarado que van a hacer un nuevo Japón.

Dada la grave situación sería conveniente parar a todos los reactores nucleares y someterlos a una revisión exhaustiva. Eso significaría, por el momento, un desabasto de energía pero es preferible a daños mayores. También habría que considerar seriamente la cancelación de todos los programas nucleares de potencia. La decisión es fuerte pero en Fukushima se han derrumbado muchos mitos, especialmente, con la seguridad nuclear.

El campo de radiación producido es tal, que convendría alejarse inmediatamente de las fuentes de radiación. En la protección contra las radiaciones ionizantes hay tres principios fundamentales: distancia, tiempo y blindaje.

Mientras menos tiempo se esté expuesto al campo de radiación menos será la dosis recibida. Mientras más lejos esté de la fuente radiativa la intensidad del campo disminuye más rápidamente. Si hay un material de blindaje entre la persona y la fuente radiativa, la dosis recibida se reduce.

En el caso de los trabajadores, solamente se puede limitar el tiempo de trabajo en las zonas de alta radiación y contaminación que probablemente

se haya extendido por toda la central. En el cuarto de control hay blindaje y ventilación, aunque se desconoce la situación precisa. Fuera de este cuarto los trabajadores, generalmente, disponen de aparatos de respiración autónoma que les impide inhalar materiales radiativos pero no evitan la contaminación externa. Dada la situación desordenada y caótica en Fukushima, es posible que la protección de los trabajadores sea precaria. Utilizar solamente overol impide, si acaso, la contaminación por partículas alfa, liberada durante la desintegración de importantes materiales radiativos de fisión. Sin embargo, la protección no es suficiente contra la irradiación externa.

Si los trabajadores reciben una dosis importante radiación, de más de 2 Sieverts o suficientemente alta, se pueden causar daños inmediatos a la salud, caracterizados por enrojecimiento de la piel, pérdida del cabello, náuseas e incluso quemaduras que pueden ser tratadas con medicamentos. Pero los trabajadores y población que no están dentro de la central nuclear se enfrentarán al menos a un ligero aumento del riesgo de cánceres.

Debido a la vida media relativamente larga de algunos materiales liberados al ambiente, éstos podrían permanecer durante varios años, depositados en los suelos, fuentes de agua, mar, pastos, edificios y personas, contaminando a éstas, a los animales, a la fauna y flora marina, y consecuentemente a los alimentos.

En los primeros días la situación en la central de Fukushima era muy crítica estimándose una fusión parcial en el núcleo del reactor 1, según la agencia NHK. En el reactor 3, las barras de combustible quedaron expuestas al aire por varias horas, causando una acumulación de vapor e hidrógeno aumentando la presión que puede dañar el acero de la piscina de supresión, diseñada para enfriar al núcleo y atrapar los materiales radiativos. En tales condiciones no podrían continuar los esfuerzos para restablecer el enfriamiento del reactor y podría ocurrir un colapso completo del combustible.

El 16 de marzo, de acuerdo con el Japan Atomic Industrial Forum, las barras de combustible permanecían expuestas en los tres reactores accidentados y se continuaba bombeando agua de mar para impedir que la fusión del núcleo continuara. Las piscinas de combustible gastado de

2011, *elektron* 11 (183) 34, FTE de México

los reactores 3 y 4 habían perdido agua exponiendo a los combustibles.

Evidentemente, dentro de la central las condiciones son inapropiadas para laborar. Fuera de la central no hay blindaje. Entonces, hay que estar el menor tiempo frente a la fuente de radiación y alejarse de la misma, mientras más lejos mejor.

Esto tiene implicaciones, no es un asunto sencillo. A la población debe garantizársele a dónde ir. Debieran abrirse las fronteras del mundo para que los japoneses, que disponen de un pequeño territorio geográfico, puedan vivir en condiciones

7. Conclusiones

Los accidentes en la central nuclear de Fukushima plantean un escenario de crisis para la industria nuclear de potencia, especialmente, con los reactores de fisión nuclear. Esto incluye a los reactores reproductores rápidos, los llamados reactores “de cría” porque producen más combustible del que consumen, en los cuales también está trabajando Japón.

Las decisiones a tomar son fuertes pero necesarias. Se está produciendo en el mundo una gran incertidumbre, que puede llevar a la servidumbre o al derrumbe, pero las decisiones dependen de las sociedades debidamente organizadas.

En el mundo se viven las consecuencias adversas derivadas de la privatización de los sectores estratégicos de la producción impulsada por el capitalismo. La TEPCO surgió como empresa pública, la Tokio Electric Light Company, pero en 1950 fue privatizada. Desde entonces, está regida por las “reglas” del mercado y ha tenido al menos 100 casos de accidentes menores a los actuales, habiendo sido acusada por el propio gobierno japonés de mentir e incluso falsificar documentos. En México insistimos en una alternativa conveniente para la nación viviente: la renacionalización energética. Lo mismo vale para Japón.

El FTE de México reivindica las tesis de la Tendencia Democrática del SUTERM: Las tierras, las aguas, los bosques, los minerales, los energéticos, el agua, el viento, todos los recursos naturales, el espectro radioeléctrico y la biodiversidad, así como los sectores industriales

apropiadas. En todos los casos, son primero las mujeres y los niños porque los organismos en desarrollo son los más radiosensibles.

Los trabajadores que atienden la emergencia deben recibir la protección “adecuada”. No parece que la haya. De no ser así, no vale la pena exponer la vida para salvar al capital. Tal protección no existe porque la corporación TEPCO carece de suficiente personal entrenado, capacitado y bien pagado. Aunque así fuera, “monetarizar” la salud y la vida es un error catastrófico.

estratégicos, solamente deben ser de propiedad colectiva, jamás privada.

En materia nuclear postulamos la tesis del “átomo obrero”, que implica una posición clasista, crítica y consciente desde el interior del movimiento, y que significa la propiedad social, el control obrero de la producción e investigación, la vigilancia social, el derecho a la información dosimétrica, a la salud y a la huelga. Hoy, estos derechos son inexistentes en la industria nuclear mundial. También se incluye la protección de la vida, la naturaleza y el medio ambiente, cuestiones que no están en la agenda ni le interesan a ninguna corporación.

Planteamos como alternativa la utilización de las fuentes renovables de energía, entre ellas la energía del Sol en sus diversas vertientes. Una de las opciones es la energía solar espacial, con importantes connotaciones por discutir en materia social.

También planteamos la lucha en el espacio del saber, al interior de los centros de trabajo, asumiendo la dualidad de asalariados y de productores. Esta opción es una alternativa que proponemos a todos los trabajadores de la energía del mundo para socializar el conocimiento y la experiencia, elevar los niveles de conciencia y tomar las decisiones convenientes para el interés general de los pueblos y naciones.

La Política Energética Independiente que proponemos rebasa el interés gremial, tiene un interés de clase con una visión de conjunto.

Fukuyama, un descendiente de japoneses, a la caída del socialismo en Europa oriental proclamó: “¡Adiós al proletariado!”. Los sucesos de

Fukushima demuestran que el proletariado ni se ha ido ni puede irse, es necesario para el propio capitalismo, y a éste hay que vencer. Lo que sí puede hacer Fukuyama, después de Fukushima, es decirle adiós a la energía nuclear de fisión. En cuanto a la energía nuclear de fusión, van 60 años de desarrollo sin que esté a punto y, sus implicaciones, deben discutirse en profundidad.

El tsunami nuclear en Japón es la expresión brutal de la lucha de clases en condiciones infames. Solo 50 trabajadores, varios de ellos realizando trabajo semi-esclavo, al servicio de una corporación imperialista están haciéndole frente a la emergencia nuclear en Fukushima, con una correlación de fuerzas muy desfavorable, por lo que representa la gran concentración de capital en una instalación nuclear de potencia.

Los trabajadores de la energía debemos de levantar nuestra voz, al lado de los trabajadores aún desorganizados e inconscientes y, seguramente ignorantes, porque los trabajadores del outsourcing

2011, *elektron* 11 (183) 35, FTE de México ni siquiera reciben un salario digno mucho menos el entrenamiento adecuado y no tienen el conocimiento especializado. Esos compañeros están siendo utilizados como “carne de radiación”.

El capitalismo no tiene solución a su propia crisis energética. Las transnacionales nucleares están recibiendo un serio golpe. Peor puede ser para la humanidad si por la codicia y la voracidad no se toman las medidas inmediatas consecuentes y se deja que poco a poco se vaya degradando la situación y mañana el accidente esté en el nivel 7 dando lugar a una posible catástrofe que impactaría al mundo.

Esta situación nos plantea a los hombres y mujeres conscientes que la fase actual es de ruptura y de construcción, de fase activa y constructiva. El número es importante, es el primer elemento del triunfo pero no cuenta si no está unido por la organización y guiado por el saber.

El llamado es a la resistencia activa, organizada, crítica y consciente.



Trabajadores nucleares del outsourcing haciendo frente a la emergencia nuclear

Referencias

- Biello D. 2011, Partial Meltdown Led to Hydrogen Explosions at Fukushima Nuclear Power Plant, en *Scientific American*, March 14, 2011.
- Biello D. 2011, Workers Battle Fukushima Nuclear Crisis at Personal Risk, en *Scientific American*, March 16, 2011.
- Biello D. 2011, Fade in Nuclear Plant in Japan Hangs in the Balance as Melting Continues, en *Scientific American*, March 18, 2011.
- Chio Ch.Q. 2011, The Worst Nuclear Plant Accident in History: Live from Chernobyl, en *Scientific American*, March 15, 2011.
- Greenmeier L. 2011, Is Seawater a Last Resort to Cooling Japan's Nuclear Reactors?, en *Scientific American*, March 17 2011.
- IAEA 2002, Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, Safety Requirements, Safety Standards Series No. GS-R-2. STI/PUB/1133. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- IAEA 2007, Nuclear Power Worldwide: Status and Outlook, en www.iaea.org
- IAEA 2011, Fukushima Nuclear Accident Update Log, en www.iaea.org
- ICRP 1977, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3), 1977.
- ICRP 1984, Non-stochastic effects of ionising radiation. ICRP Publication 41. Ann. ICRP 14 (3), 1984.
- ICRP 1991, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3), 1991.
- ICRP 1994, Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24 (4), 1994.
- ICRP 1997, General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75, Ann. ICRP 27 (1), 1997.
- ICRP 2005, Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. ICRP Publication 99. Ann. ICRP 35 (4), 2005.
- ICRP 2007, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4), 2007.
- Harmon K. 2001, How Much Spent Nuclear Fuel does the Fukushima Daiichi Facility Hold?, en *Scientific American*, March 17 2011.
- Matson J. 2011, What Happens during a Nuclear Meltdown?, en *Scientific American*, March 15, 2011.
- Matson J. 2011, Fast Facts about Radiation from the Fukushima Daiichi Nuclear Reactors, en *Scientific American*, March 16, 2011.
- INES 2011, The International Nuclear and Radiological Event Scale, IAEA, en www.iaea.org
- NAS/NRC, 2006. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- OIEA 1989, Estatutos del Organismo Internacional de Energía Atómica, en www.iaea.org
- OIEA 1997, Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra la Radiación Ionizante y para la Seguridad de las Fuentes de Radiación, Colección Seguridad No. 115, OIEA, 1997.
- Preston, D.L., Ron, E., Tokuoka, S., et al., 2007. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Radiat. Res.* 168, 1–64.
- PRIS 2011, Japan: Nuclear Power Reactors, OIEA/PRIS (Power Reactor Information System) database, en www.iaea.org
- PRIS 2011, Information about Nuclear Power Plants, OIEA/PRIS (Power Reactor Information System) database, en www.iaea.org
- UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II: Effects. United Nations, New York, NY.
- UNSCEAR, 2001. Hereditary Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.
- UNSCEAR, 2008. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY.
- USNRC 2011, Boiling Water Reactor (BWR) Systems, Reactor Concepts Manual, USNRC Technical Training Center.