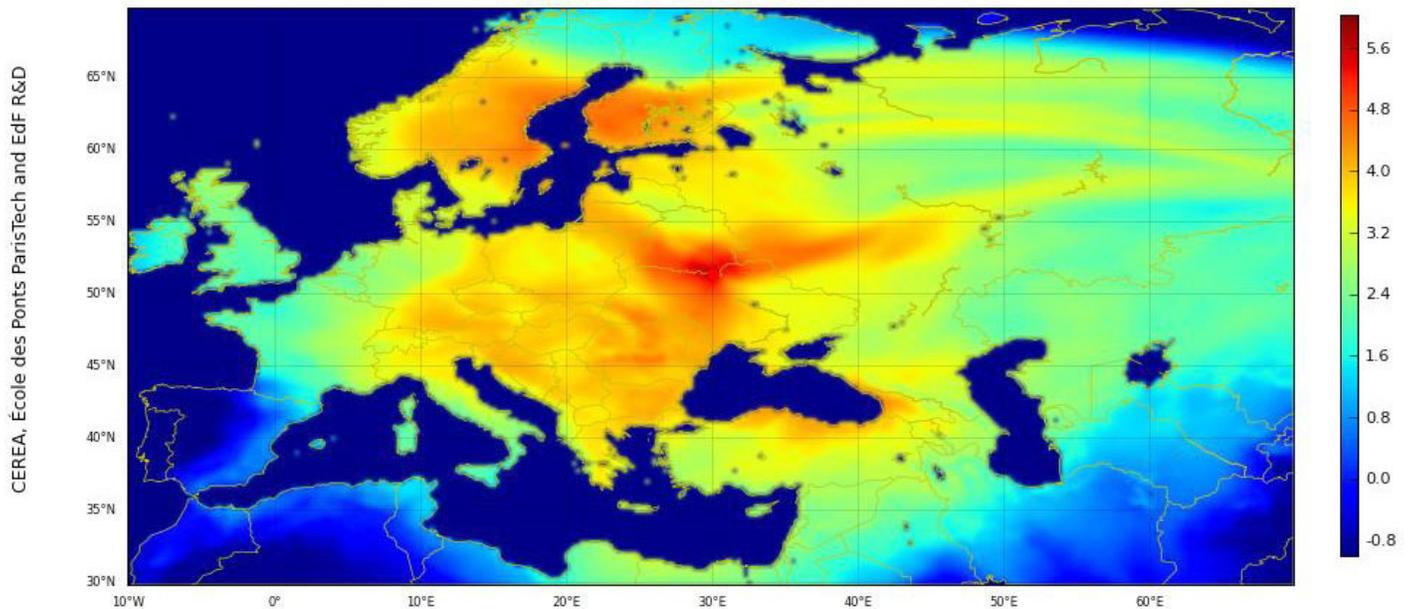


CHERNÓBIL, UNA VISIÓN GLOBAL

Chernobyl, caesium-137, 1986-05-09 00:00:00, base-10 log of total ground deposition ($Bq.m^{-2}$)



Map of ground deposition of caesium-137 for the Chernobyl accident, by Victor Winiarek, Marc Bocquet, Yelva Roustan, Camille Birman, and Pierre Tran at CEREA.

Resumen

Se reseñan las causas del accidente y los informes sobre la mortalidad causada por el mismo según reportes científicamente autorizados emitidos a los 20 años por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y el World Health Organization (WHO) haciendo notar que la mortalidad fue y ha sido exagerada por razones de índole política. Para poner en perspectiva el daño debido al accidente se reseñan otros desastres como son 1.- las pruebas nucleares realizadas por razones belicistas por USA, USSR, Inglaterra, Francia, China, India, Paquistán y Corea del Norte. 2.- El accidente de Bohpal en la India, 3.- La mortalidad debida al uso de carbón para generar energía, 4.-El accidente de TACO A y 5.- La mortandad anual por violencia en Venezuela. Dada la demanda mundial por energía eléctrica y el actual rechazo al uso del uranio en reactores nucleares, se reseña una alternativa: el reactor de torio de sal fundida que presenta ventajas que resuelven casi todas las causas del rechazo al uso de la energía nuclear.

Palabras Clave: Chernóbil, Envenenamiento Xenón, Mortandad, ARS, Torio, MSR.

CHERNOBYL, A GLOBAL VIEW

Abstract

The causes of the accident and mortality are reviewed from examination of scientifically authoritative reports issued by the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the World Health Organization (WHO) after 20 years of the event. It is shown that mortality

**Eduardo D. Greaves, Haydn Barros y
Laszlo Sajó-Bohus**

**Universidad Simón Bolívar, Laboratorio de
Física Nuclear.**

egreaves20002000@yahoo.com

was and it is being exaggerated for political reasons. To put into perspective the damage due to the accident, other technological disasters are reviewed: 1. The nuclear tests conducted by USA, USSR, Britain, France, China, India, Pakistan and North Korea are reported, 2. The accident at Bohpal in India, 3. The mortality due to the use of coal for energy, 4. The accident at TACO in Venezuela and 5. The annual mortality from violence in Venezuela. Given the worldwide demand for electricity and the current rejection by society of the use of uranium in nuclear reactors, an alternative is briefly outlined: the Thorium Molten Salt Reactor which has advantages that solve almost all of the causes of rejection of the use of nuclear energy.

Keywords: Chernobyl, Xenon poisoning, Mortality, ARS, Thorium, MSR.

Introducción

Han pasado 30 años del accidente nuclear llamado el más grave de la historia. Pero, ¿es este en realidad el accidente tecnológico que más daño ha hecho? La percepción de la población es que efectivamente es el accidente más grave a nivel mundial. Pero si examinamos qué condiciona esta percepción nos damos cuenta de que no son los hechos mismos, no es en realidad lo que ocurrió lo que condiciona esta percepción. Lo que crea la percepción de la población es más bien la versión que se ha presentado de los hechos en los medios de comunicación social. En el caso del accidente de Chernóbil, ciertamente un accidente muy grave, la ocurrencia tuvo lugar en la antigua Unión de Republicas Soviéticas Socialistas (USSR) que se encontraba en un momento de crisis, en camino a su disolución pocos años después. Y en medio de la “Guerra Fría” una guerra que por llamarse “Fría” no era menos guerra. El bando opuesto, los países del llamado Occidente, liderizados por los Estados

Unidos de Norteamérica, aprovecharon la circunstancia para utilizar el evento como un muy conveniente objeto propagandístico en su favor. La actitud de las autoridades de la USSR, que inicialmente no le dieron la importancia que merecía, intentó ocultar los eventos así como las causas mismas del accidente, las cuales veremos más adelante, contribuyendo a crear de Chernóbil un fenomenal golpe propagandístico en contra de la Unión Soviética y de paso contra el uso de la energía nuclear. Adicionalmente, tendencias políticas sobre la energía nuclear afectan la interpretación de resultados de estudios de alta incertidumbre, originando interpretaciones ultra-pesimistas o que simplemente no reflejan la realidad de la evidencia. Es por ello que el número de fatalidades, el daño inmediato y los daños proyectados fueron grandemente exagerados, creando en la población una percepción mayormente distorsionada y agrandada de los daños reales.

La naturaleza aleatoria de los efectos de bajas dosis de radiación, la cual no permite predecir con certeza los efectos de las mismas, son un poderoso contribuyente para predecir escenarios muy exagerados de los posibles efectos en las generaciones futuras. El hecho es que no se ha podido demostrar un solo caso de producción de malformación congénita atribuible a la radiación en los afectados por Chernóbil, o por los otros casos de personas irradiadas, como los afectados por las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki u otros afectados por radiación de las pruebas de armas nucleares u otros accidentes nucleares. En el presente documento se reseñan, exclusivamente, los resultados de la mortalidad causada por el accidente tomados de los estudios realizados por científicos acreditados y publicados en revistas indexadas en el Science Citation Index, Índice que recolecta las revistas que poseen la objetividad necesaria para

ser consideradas revistas científicas sólidamente establecidas. Compararemos el accidente de Chernóbil, en el aspecto de la mortalidad producida, con otros accidentes tecnológicos para poner en perspectiva los daños relativos. Finalmente, ante la necesidad de la producción de energía eléctrica para el progreso de la humanidad, presentaremos la nueva alternativa de tecnología nuclear: El uso del torio como combustible nuclear en reactores de sal fundida. Esta nueva tecnología incorpora avances muy significativos en la eliminación de la posibilidad de accidentes graves, disminución de los peligros de proliferación de armas nucleares y reducción del problema de los desechos radioactivos.

Causas del accidente

Para reseñar las causas del accidente haremos un repaso elemental de cómo se genera la energía nuclear en un reactor de fisión. El Uranio natural es radiactivo y está formado básicamente por U-238 y U-235. Para la puesta en marcha o “encendido” de un reactor nuclear se utiliza una fuente emisora de neutrones, por ejemplo una de Cf-252.¹² Cuando alguno de esos neutrones incide en un núcleo del isótopo U-235 hay una probabilidad de que se produzca una fisión del núcleo, es decir, que se divida en dos pedazos mas pequeños. La fisión de un núcleo de U-235 libera una cantidad de energía muy considerable del orden de 200 MeV. Cada fisión de un núcleo de uranio esta acompañada por la producción de más neutrones, los cuales a su vez pueden producir más fisiones si se encuentran con otros núcleos de U-235. Por ello, si existe junta una masa suficientemente grande de uranio, llamada masa crítica, el proceso se repite continuamente de forma creciente constituyendo la llamada reacción en cadena. Paradójicamente, los neutrones producidos con alta energía son menos eficientes en producir fisiones que los

neutrones que han perdido su alta energía y que se mueven a muy bajas velocidades. Por ello en los llamados reactores “térmicos” se utiliza un “Moderador”. El moderador es un elemento que reduce la energía de los neutrones, producidos en la fisión, hasta energías bajas semejantes a las energías debidas a la agitación térmica de las moléculas. Por ello el moderador al reducir las energías de los neutrones aumenta la reactividad, es decir aumenta la probabilidad de que se fisione el uranio y se genere más energía. Por ello un reactor nuclear térmico consiste en elementos de combustible sólido, que contienen uranio enriquecido en el uranio fisionable (U-235), rodeados completamente por moderadores de neutrones. Los moderadores más usados son el agua natural, el agua pesada y el grafito. En el caso del reactor tipo RBMK 1000 como el de Chernóbil ^{(13),(5)}, se usa grafito y agua natural como moderadores de neutrones para que ocurra la reacción en cadena. Esta es una combinación desafortunada en un reactor pero muy buena para producir plutonio. El reactor se diseña de tal forma que la combinación de combustible y moderador tengan la masa crítica para que ocurra la reacción en cadena. Para controlar la reacción en cadena y evitar que explote el reactor se utilizan las barras de control. Estas son unas barras que están insertadas entre el combustible y el moderador y que están hechas con materiales que tienen una gran absorción de neutrones o gran sección eficaz para neutrones. Se usa el cadmio, elemento que tiene una gran capacidad de absorción de neutrones. Cuando están completamente insertadas estas barras de control, absorben la mayoría de los neutrones y se reduce drásticamente el proceso de fisión. En esta condición el reactor está apagado y no produce energía por fisión inducida. Para encender el reactor se sacan parcialmente las barras y dependiendo de su posición se puede regular la energía generada

(equivalente al acelerador de un carro). La figura 1 muestra el esquema general del reactor RBMK 1000 donde se aprecian las barras de control. Una limitación de los reactores nucleares como fuente de energía eléctrica es el hecho de que están diseñados para operar a valores constantes de la potencia producida. Es decir si aumenta o disminuye la demanda de energía no se aumenta ni disminuye la potencia de los reactores. Esta característica es debida a un fenómeno llamado el “Envenenamiento Xenón”. Explicaremos brevemente en qué consiste este fenómeno:

- 1.- En operación normal se genera Xenón 135 (producido por decaimiento de productos de fisión del uranio).
- 2.- En operación normal el Xenón 135 se destruye a una tasa fija.
- 3.- Al disminuir la potencia la “destrucción del Xenón” disminuye más que la “generación”.
- 4.- La consecuencia es que al disminuir la potencia de un reactor aumenta el Xenón 135 el cual permanece dentro del combustible. El Xenón absorbe mucho los neutrones y tiende a apagar el reactor. Es

como las barras de control que absorben los neutrones. Se dice que el Xenón “Envenena” al reactor. A diferencia de las barras de control, no se puede “sacar” el Xenón 135. Una vez producido lo único que se puede hacer es esperar un tiempo a que el Xenón 135 decaiga naturalmente con su vida media de 9,2 horas. El envenenamiento Xenón es tal que si el reactor se apaga hay que esperar un tiempo (entre 25 y 35 horas) antes de poder prender de nuevo el reactor con la consiguiente pérdida de la energía generada. Por esta razón los operadores de los reactores son penalizados o están bajo una fuerte presión a no apagar los reactores y la política es mantener la generación de energía en un valor constante y estable continuamente. Cabe indicar que el Xenón no es el único producto de fisión que envenena el reactor.

El accidente

La secuencia de lo ocurrido esta reseñada detalladamente en la literatura pertinente. En la WEB hay descripciones que pueden ser consultadas ⁽⁵⁾.

Para el día 25 de abril de 1986 se había programado hacer en el reactor unos ensayos de su comportamiento a baja

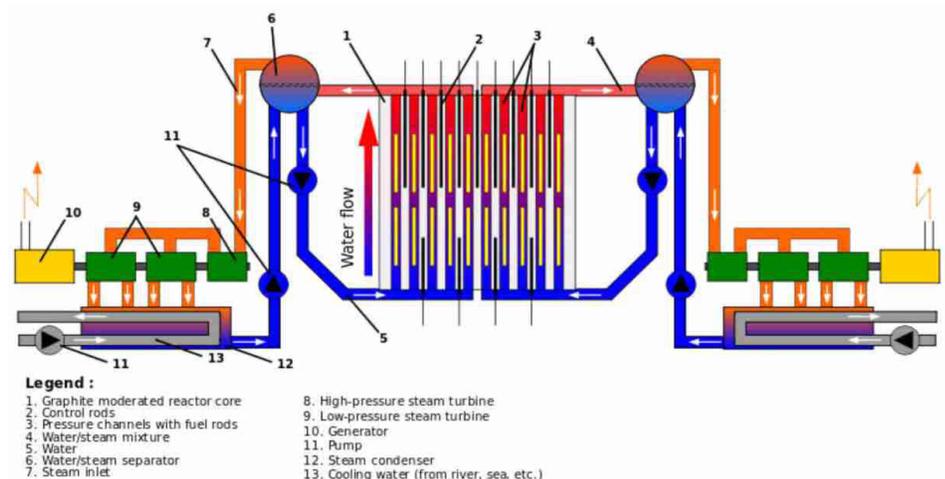


Figura 1. Esquema del reactor RBMK 1000 donde se muestra en el centro el núcleo de grafito con las barras control arriba y abajo. En los lados el circuito de circulación de agua presurizada con las turbinas de generación de electricidad ⁽¹³⁾.

Actualmente hay 11 reactores tipo RBMK 1000 en operación en Rusia. En ellos se han introducido modificaciones basadas en el estudio del accidente. Adicionalmente 9 reactores tipo RBMK 1000 que estaban en construcción o que se planificaba su construcción fueron cancelados.

Mortalidad del accidente

En esta sección reseñamos la mortalidad producida por el accidente. Esto es una parte importante de los daños producidos pero representa solo una fracción de las consecuencias. No se reseñan la masiva evacuación de la población civil, las pérdidas causadas por ello ni las enfermedades graves no mortales causadas por la radiación. Para una información autorizada sobre este tópico recomendamos la lectura de las fuentes usadas para este informe: reportes del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) ^{(3), (11)}. Para la fecha de los informes (20 años después del accidente) la radiación causó un aumento muy notable en la incidencia de cáncer de la tiroides y se atribuye por ello la muerte de por lo menos nueve niños. La mortalidad ocurrida por efectos de la radiación, muertes solamente por ARS (Acute Radiation Sickness) o enfermedad aguda de radiación: 28 muertes por ARS en 1986 y en el período posterior, 1987-2004: 19 muertes por ARS, para un total de 47 muertes por ARS. Para los trabajos de limpieza y control de la radiación inmediatamente después del accidente se emplearon muchísimos trabajadores llamados "Liquidadores". Estos trabajadores recibieron sobredosis de radiación en su labor, pero dicha sobredosis fue recibida una sola vez. El trabajo fue programado de tal forma que todos los trabajadores (entre 600 y 800 mil) hicieran un solo turno. De esta forma se aspiraba a realizar el trabajo minimizando el riesgo individual.

La lectura de los informes citados muestra la gran dificultad en determinar muertes

atribuibles a la radiación del accidente. Un número muy grande de las personas que fueron expuestas a la radiación ha muerto. Han muerto por todas las causas de muerte: edad avanzada, accidentes de tráfico, enfermedades cardiovasculares, cáncer, etc., etc. El problema consiste en determinar la tasa de mortandad causada por la exposición a la radiación en comparación con la tasa de mortandad normal de los pobladores, de la misma población, país y modo de vida, no expuestos a la radiación. Es decir, la necesidad de comparar la mortalidad de población expuesta y no expuesta. En los reportes se enfatiza la extrema dificultad de evaluar muertes debidas a la radiación de Chernóbil. Parte de esta dificultad es el fenómeno observado y bien documentado del aumento de la tasa de mortalidad después de la caída del muro de Berlín (1991) en Belarusia, Rusia y Ucrania. Este fenómeno, particularmente en los varones, es atribuido al desmantelamiento de los servicios de salud y seguridad social que proveían los gobiernos socialistas en estos países. Para ilustrar este problema se presentan las figuras 4 y 5. La figura 4 contiene los datos de la incidencia de cáncer en los trabajadores de emergencia

expuestos en comparación con la incidencia de cáncer de la población en general en los años posteriores al accidente.

La figura 5 muestra la tasa de mortandad por cáncer de los trabajadores de emergencia expuestos a la radiación comparada con la población en general. Esta figura demuestra sorprendentes resultados: en los años siguientes las tasas de los trabajadores expuestos son inferiores a las tasas correspondientes a la población no expuesta. En ambos gráficos se observa que las barras de error, que muestran la incertidumbre de los valores reportados, es muy grande y son clara evidencia de la dificultad en la interpretación de los resultados.

Hechos estos estudios, la conclusión referente a la mortalidad debido al accidente indica que después de 20 años el número de los fallecidos son menores a 50¹. Ante la cantidad de informes conflictivos sobre los daños del accidente y para estimar el verdadero impacto de Chernóbil se estableció el "Chernobyl Forum" por parte de las agencia internacionales. Este, muy autorizado foro, emitió extensos informes que arrojaron nuevos resultados numéricos

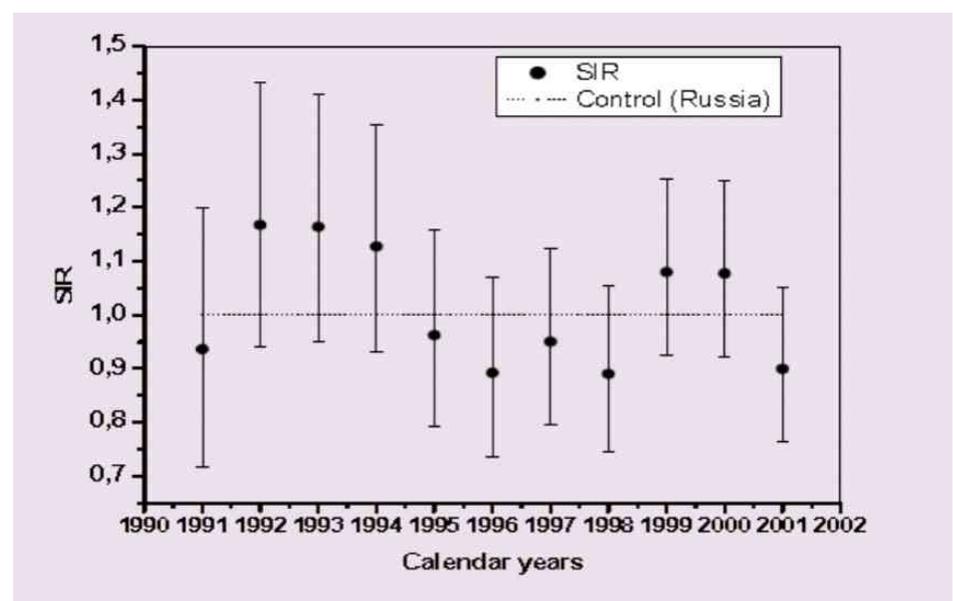


Figura 4. Tasa estandarizada de incidencia de cáncer sólido en trabajadores rusos de emergencia con las barras de error, en función del tiempo comparadas con la población rusa en general para los años 1990-2001 (Línea horizontal).

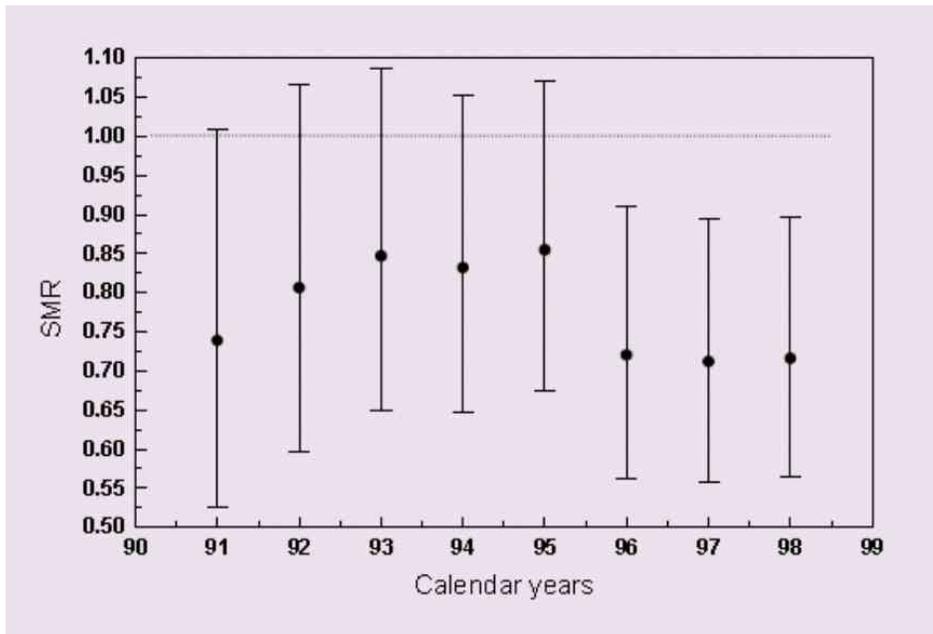


Figura 5. Tasa de mortandad estandarizada (SMR) por cáncer sólido de trabajadores de emergencia rusos en función del tiempo (1990-1999), comparada con la población en general (Línea horizontal).

de los daños (Burton Bennet *et al.* 2006). De este informe reducido hemos extractado el texto contenido en la nota al pié².

El daño de Chernóbyl en perspectiva

Si bien el accidente de Chernóbyl fue muy grave por la gran cantidad de radiación emitida al ambiente con repercusiones mundiales³. La cantidad de radiación emitida y la potencia de la explosión es mucho menor que el programa de ensayos de bombas nucleares realizado por los países poseedores de la bomba atómica. El gráfico de la figura 6 muestra el número de ensayos nucleares realizados cada año desde 1945 hasta el 2010 por USA, Rusia, Gran Bretaña, Francia, China, India, Pakistán y Corea del Norte siendo el total de 2163 bombas atómicas ensayadas⁽⁸⁾. Oficialmente 1054 por USA solamente entre 1945 y 1992.

Se estima que pruebas de armas atómicas realizadas en los años 1950 y 1960 han puesto material 100 a 1.000 veces más radiactivo en la atmósfera que el accidente

de Chernóbyl. La última gran bomba termonuclear (5 Megatones) ensayada por USA en la isla de Amchitka en 1971, en el archipiélago de las Aleutianas en Alaska, produjo un terremoto de magnitud 6,8 grados en la escala de Richter que se detectó a nivel mundial. Dicho terremoto fue detectado en Venezuela con un sismógrafo

construido *ad Hoc* por el Prof. Eduardo D. Greaves y el Prof. Marcel Kurtagic en la Universidad de Carabobo, siendo reportado el sismograma por el periódico El Carabobeño. La bomba norteamericana más grande estallada en la atmósfera en 1954, Castle Bravo, dejó un cráter de 1.8 Km de diámetro, mientras que la bomba más poderosa de la historia (50 Megatones) estallada fue la “Tsar Bomba” dispositivo termonuclear de la USSR lanzada por un bombardero en el mar Ártico. Fue capaz de destrucción total en un radio de 24 km y de crear quemaduras de 3^{er} grado en un radio de 100 km a la redonda. Comparado con esto, el desastre de la figura 3 de Chernóbyl queda completamente opacado.

Accidente de Bhopal (Bhopal gas tragedy)

Uno de los accidentes tecnológicos más graves que se ha registrado históricamente es el ocurrido en Bhopal, en la India⁽¹⁴⁾. Ocurrido el 3 de diciembre de 1984. Este evento no ha recibido la cobertura mediática global que se le ha dado a Chernóbyl.

Consistió en la fuga de 42 toneladas de

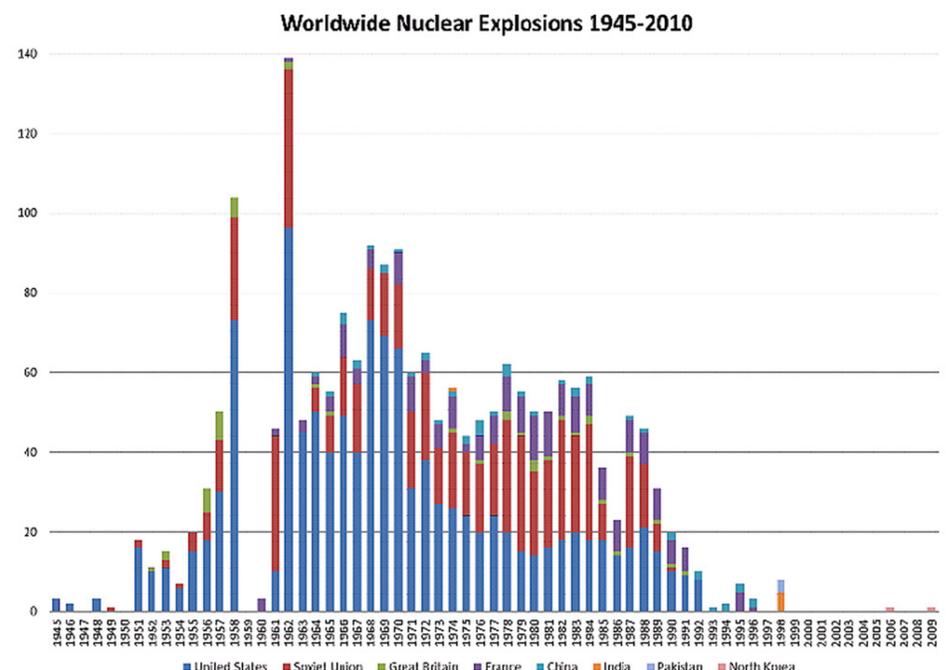


Figura 6. Número de ensayos nucleares en función del tiempo realizados por USA, Rusia, Gran Bretaña, Francia, China, India, Pakistán y Corea del Norte.

isocianato de metilo en una fábrica de pesticidas de la compañía estadounidense Union Carbide (luego parcialmente adquirida por Dow Chemical en el 2001). En Bhopal se estima que entre 6.000 y 8.000 personas murieron en la primera semana y al menos otras 12.000 fallecieron posteriormente como consecuencia directa de la catástrofe, que afectó a más de 600.000 personas, 150.000 de las cuales sufrieron graves secuelas. Perecieron miles de cabezas de ganado y animales domésticos y todo el entorno del lugar del accidente quedó seriamente contaminado por sustancias tóxicas y metales pesados que tardarán muchos años en desaparecer. Entre las causas del accidente se menciona que no se tomaron las debidas precauciones durante la limpieza y mantenimiento de la planta, lo que hizo que el agua a presión utilizada y los cristales de cloruro sódico, restos metálicos y otras impurezas que la misma arrastraba, entrasen en contacto con el gas almacenado, iniciando una reacción exotérmica que provocó la apertura por sobre presión de las válvulas de seguridad de los tanques y con ello la liberación a la atmósfera del gas tóxico; con el agravante de que el sistema de refrigeración de los tanques y el catalizador de gases previo a la salida a la atmósfera, se habían desactivado por ahorro de costos.

La planta fue abandonada y Union Carbide no respondió por los daños. A principios del siglo XXI más de 400 toneladas de residuos industriales todavía están presentes en el sitio. Ni la Dow Chemical Company, ni el gobierno de la India habían limpiado correctamente el sitio. La contaminación del suelo y el agua de la zona ha sido identificada como la causa de graves problemas crónicos de salud y del gran número de casos de defectos de nacimiento en los habitantes del área. Una demanda de reparaciones en 2010 dio como resultado que en junio de 2010 un tribunal indio

condenó a ocho directivos (de nacionalidad india) de la empresa a dos años de prisión y a abonar 500.000 rupias (10.600 dólares). En recuerdo de esta tragedia se celebra en todo el mundo cada 3 de diciembre el Día Mundial del No Uso de Plaguicidas. Las gravísimas secuelas genéticas y malformaciones congénitas producidas son patentes en la población aledaña ⁽²⁾. La figura 7 es una dolorosa evidencia de las secuelas de este terrible accidente.

Mortalidad por emisiones de carbón (partículas)

Un daño tecnológico muy grande y poco mencionado está asociado a la producción



Figura 7. Niños con deformaciones congénitas producidas por el escape de gas de la planta de pesticidas de Union Carbide en Bhopal, India el 2 de diciembre de 1984.

de energía mediante carbón. Si bien la producción de CO₂ y su efecto en el calentamiento global es ampliamente condenada, el aspecto de la mortandad producida por los efectos adversos de las emisiones de partículas por las plantas de carbón no ha recibido tanta atención. La Environmental Protection Agency (EPA) estima una cantidad de 13 000 muertes por año en USA (Robert Hargraves 2009) del orden de 100 000 muertes por año en China y hay estimados de las Naciones Unidas de 1

millón de muertes anuales en todo el mundo. Mucho más modesto, pero aún superior a la mortalidad de Chernóbyl, es el accidente en Venezuela de la planta eléctrica de Tocoa. Planta de generación eléctrica “Ricardo Zuloaga” en Arrecifes, Estado Vargas. Ocurrida el 9 de diciembre de 1982 a las 06:30 am (1^{ra} Explosión) y 12:45 pm (2^{da} Explosión). Fue causada por el estallido de dos tanques de combustible. La falta de adecuado control de la población curiosa y de los periodistas determinó que la segunda explosión afectó a estas personas con un estimado de fallecidos de 180 personas.

Finalmente vale la pena poner en evidencia

estadísticas publicadas por el Observatorio Venezolano de Violencia⁽¹⁰⁾. El reporte anual de esa ONG alega que un total de 27.875 personas murieron de manera violenta en 2015, una cifra que supera considerablemente la aducida para el año 2014, de 24.980.

Alternativa: El Torio como nuevo combustible nuclear

Ante el hecho que la energía es ESENCIAL para el mundo moderno. Cabe la pregunta: ¿Cómo atender la demanda mundial de energía eléctrica? La figura 8 muestra que la demanda de energía eléctrica mundial, en los últimos 150 años, se duplica aproximadamente cada 30 o 35 años, es decir, crece más de un 2% anual. Si bien actualmente se habla mucho del uso de las energías renovables (eólica y solar), es bien conocido que con la tecnología actual y las mejoras previstas, estas alternativas no serán capaces, a largo plazo, de suministrar la “sed humana” por energía eléctrica. Ante esta disyuntiva la energía nuclear actual basada en aproximadamente 422 reactores de combustible sólido (PWR-BWR-HTGR) surge como la única tecnología, actualmente desarrollada, capaz de suministrar la electricidad que demanda la población.

Sin embargo esta tecnología adolece de serias deficiencias. El problema más grave para su utilización es la no-aceptación por la sociedad, ¡aún después de casi 70 años de desarrollo! Los problemas más importantes

que determinan la generalizada opinión negativa sobre los reactores nucleares son:

- 1.- La producción y acumulación de desechos altamente radio tóxicos de vida media de miles de años.
- 2.- El uso de reactores con un núcleo que es una caldera a muy alta presión y que es un peligro potencial de accidente grave por explosión.
- 3.- El peligro de la proliferación de armas nucleares. Por ejemplo: Un reactor grande de potencia, de 1000 MW, con combustible de uranio produce al año del orden de 230 kg de plutonio (Pu-239). El plutonio es el material ideal para la fabricación de armas nucleares. Su masa crítica es del orden de 900 gramos y actualmente se puede hacer una bomba atómica con unos 5 kg ⁽¹⁵⁾. Un escenario de gran desarrollo de la energía nuclear a nivel mundial, con miles de reactores con la tecnología actual, sería una pesadilla en lo que se refiere a la posible proliferación de armas nucleares.
- 4.- La utilización ineficiente (~ 3%) de la energía contenida en el combustible. Una información poco publicitada por la industria nuclear es que los elementos de combustible sólido que contiene el material fisionable, U-235 o Pu-239, sufren daños por la radiación dentro del reactor. Esto determina que deben ser cambiados cada 2-3 años para evitar la posibilidad de fallas. El

combustible usado se convierte en desecho nuclear conteniendo productos de la fisión, actínidos y combustible fisionable no usado. Los productos de fisión son elementos con vidas medias de hasta 50 años, mientras que los actínidos o elementos transuránicos, producidos por la reacción de captura de neutrones, son elementos con vidas medias de miles de años. Uno de ellos es el plutonio (Pu-239) que tiene una vida media de 10 000 años. El combustible no usado es el remanente del material fisionable que contenían originalmente las barras de combustible más el plutonio 239 producido durante el uso de las barras. La cantidad de energía utilizada es del orden de 3% del potencial energético del combustible. Por lo tanto, el desecho radioactivo de los reactores actuales contiene una cantidad enorme de energía que no se utiliza. Si se sigue la política de ciclo nuclear abierto (Uso una sola vez del combustible) que es la política actual en USA, es evidente que la utilización de la energía es altamente ineficiente. Con la política de ciclo nuclear cerrado (Reprocesamiento del combustible), se logra reutilizar el potencial energético del combustible pero con el alto costo que significa la destrucción del material del desecho (las barras, sólidas y protegidas por recubrimientos de aleaciones especiales), el procesamiento químico del material altamente radioactivo y la fabricación de nuevo combustible. Todo un proceso altamente oneroso, complejo y de alta tecnología.

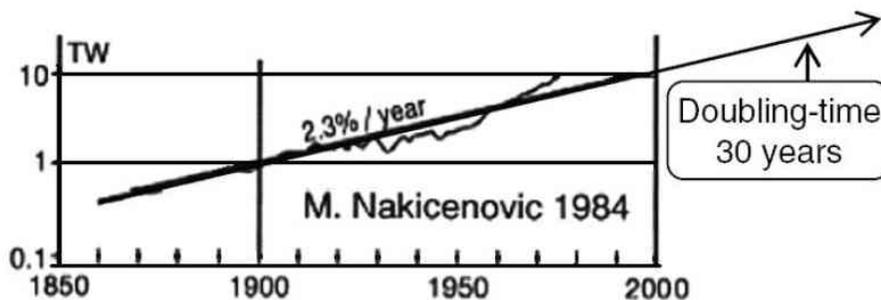


Figura 8. Energía eléctrica consumida a nivel mundial en función del tiempo y proyección al futuro.

El reactor de torio de sal fundida

La nueva alternativa a la energía nuclear actual es el reactor de sal fundida o MSR como es conocido por sus siglas en inglés (Molten Salt Reactor). Es un reactor que puede usar como combustible tanto uranio-235 o plutonio-239 como torio para producir uranio-233. Esta es la llamada “Nueva energía nuclear verde” por cuanto

que tiene características que resuelven los problemas reseñados anteriormente siendo una de las alternativas de la llamada “Generación IV” de reactores⁽¹⁾.

El reactor de sal fundida fue ideado por Eugene Wigner (~1950). La idea fue desarrollada por Alvin Weinberg en el Oak Ridge National Laboratory (ORNL) en USA cuando el Departamento de Defensa de ese país le solicitó diseñar un reactor nuclear para aviones que pudieran volar desde USA hasta Rusia. El primer prototipo del “Aircraft Reactor Experiment” funcionó durante 200 horas en 1954. Una década después Weinberg liderizó la construcción y operación de un reactor con combustible líquido llamado el “Molten Salt Reactor Experiment, en el período 1965-1969. Este reactor operó durante este período sin ningún problema y su diseño y operación fueron documentados profusamente por el ORNL. El diseño fue tomado por los japoneses y continuado por Kazuo Furukawa y colaboradores en el período (1983-2011) quienes produjeron varios diseños: el MiniFUJI, el reactor FUJI y un reactor llamado el “Accelerator Driven Molten Salt Reactor” (ADMSR)⁽⁶⁾.

Antes de describir esta alternativa debemos contestar la pregunta: ¿Qué es lo que queremos desde el punto de vista energético? De ser aceptada la opción Nuclear, ¿qué requerimos de ella?

1.- Queremos diversidad en las fuentes de energía, una tecnología nuclear incluyente que se incorpore junto a las energías alternativas: hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, fósil, uso del hidrógeno, etc., no como sustituto sino actuando en sinergia.

2.- Queremos una tecnología LIMPIA, libre de CO₂ con una solución a los desechos nucleares.

3.- Queremos una tecnología SEGURA, queremos poder ver el futuro con optimismo!

4.- Queremos que la tecnología incluya el uso de nuestros propios recursos humanos, el uso de los recursos humanos de nuestras instituciones.

5. Queremos una tecnología que incluya recursos naturales locales de cada país o región geográfica.

6.- Queremos gozar de independencia, soberanía y el control de nuestro futuro. En materia nuclear debemos oponernos a políticas nucleares impuestas, tales como se concibe en ciertos programas como el “Global Nuclear Energy Partnership” o como se llama ahora “The International Framework for Nuclear Energy Cooperation (IFNEC)” (World Nuclear Association 2016) que contempla dos clases de países: Los países del tercer mundo usuarios de la tecnología nuclear sin el conocimiento o desarrollo nuclear y los países poseedores de la tecnología nuclear (los actuales países que la poseen) con el control completo de la fabricación de reactores, suministro del combustible y disposición de los desechos.

7.- Queremos una tecnología no proliferativa de armas nucleares: ¡Cero armas nucleares!

Descripción del reactor de torio de sal fundida

Las características de este reactor se observan en el diagrama de la Figura 9. La propiedad principal es que el combustible no es sólido, sino que es un LÍQUIDO. Este líquido constituido por una mezcla de fluoruros fundidos a alta temperatura (500 a 700 °C) contiene en solución mayormente torio como material fértil y uranio o plutonio como combustible fisionable. El combustible líquido circula entre el reactor y el intercambiador de calor. En el

reactor ocurre la fisión y el calentamiento y fluye el líquido al intercambiador de calor para transferir la energía. El torio que contiene, 100 % Th-232, se convierte durante la operación en uranio (U-233) el cual fisiona produciendo energía y los neutrones necesarios para fabricar a partir del torio más combustible de U-233 según la reacción.

El uso del torio en lugar del uranio tiene varias ventajas:

1.- El torio es muy abundante. Es 4 veces más abundante que el uranio en la corteza terrestre y por ende más barato. Torio es un sub-producto de la producción de tierras raras lo cual implica que hay mucho torio acumulado en los centros de producción de tierras raras. En USA existe un campo de “Containers” enterrado por el gobierno de USA debido al excedente de este elemento en sus depósitos de “Materiales estratégicos”. Venezuela tiene un gran depósito de torio: CERRO IMPACTO que contiene más de 300000 toneladas del elemento. Gracias a este depósito se posiciona al país en el quinto lugar a nivel mundial en recursos de torio.

2.- Los reactores que operan con el ciclo del torio producen menos desechos nucleares. El desecho de un reactor de torio contiene productos de fisión (con vidas medias de hasta ~50 años) y muy pocos (una fracción ~10⁻² a 10⁻³ comparado con uso de uranio) de elementos trans-uránicos (TRU) o Actínidos. Estos elementos son los que tienen vida media muy larga e incluyen al problemático plutonio (Pu-239). Es decir el desecho de reactores en el ciclo del torio es mucho más tolerable que el de reactores de uranio por cuanto que contienen una fracción muy pequeña de elementos de vida media larga.

3.- El torio es “resistente” a la proliferación

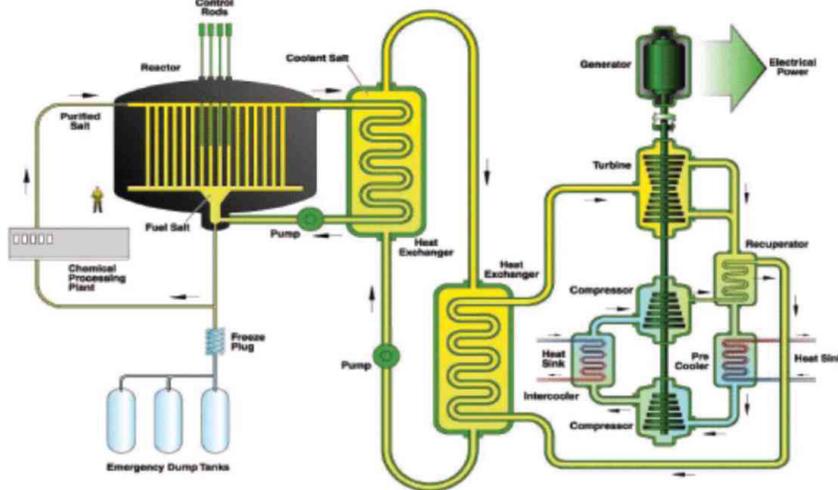
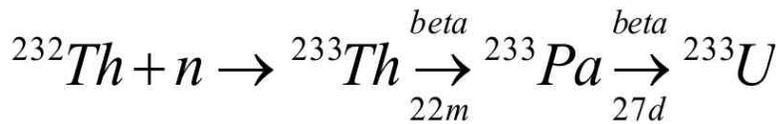


Figura 9. Diagrama esquemático del reactor de sal fundida. Fuente: Alvin Weinberg. Conferencia del 17 de junio de 2004.

de armas nucleares debido a que el reactor no produce plutonio en cantidades que se puedan usar para armas y el uranio fisionable que produce (U-233) no puede ser usado para armas nucleares debido a su alta radioactividad. La alta radioactividad es debida al U-232 que siempre se produce junto con el U-233. Un contenido de U-232 mayor a 10 ppm requiere manipulación remota del material. Las radiaciones gamma de alta energía que produce lo hacen impráctico para hacer bombas nucleares, muy peligroso para transportar y muy fácil de detectar.

El uso de un combustible líquido tiene una serie de ventajas adicionales. El líquido está constituido por un fluoruro fundido (FLiBe) que tiene una triple función a.- Es el combustible del reactor, b.- Es el medio utilizado para la transferencia del calor y c.- Es el medio para el procesamiento del combustible usado.

Estas tres funciones son reseñadas a continuación:

a.- La sal fundida (FLiBe) es una mezcla

eutéctica de sales de ${}^7\text{LiF}$ y BeF_2 a una temperatura entre 550° y 700°C . (Furukawa *et al.* 2012). Este líquido contiene el torio en forma de fluoruro de torio (ThF_4 para ser convertido en U-233) y el material fisionable, disueltos en forma de tetrafluoruro de Uranio (UF_4 como U-233 o U-235 o en forma de tri-fluoruro de plutonio (PuF_3). Puesto que el reactor puede utilizar tanto uranio como plutonio, requerido para su “encendido”, con esta capacidad se pronostica que este reactor sea utilizado para quemar y convertir en energía útil estos elementos que se encuentran en los arsenales de armas nucleares existentes y en los desechos radioactivos producidos por los reactores actuales.

b.- La sal fundida es el medio utilizado para la transferencia del calor. Es un líquido transparente como el agua con muy alto calor específico y muy baja viscosidad. Propiedades ideales para intercambiador de calor. El punto de ebullición del FLiBe es 1400°C , mucho más alto que la temperatura de operación (700°C). El FLiBe tiene baja sección eficaz para neutrones térmicos,

es decir no absorbe los neutrones que son necesarios para la producción de la fisión. Por ser un líquido no sufre daños con la radiación (como los elementos de combustible sólido) y es un buen solvente para materiales: para los elementos fértiles, los elementos fisionables y para los productos de fisión. Debido a lo anterior este combustible no necesita ser cambiado periódicamente sino que permanece en el reactor durante la vida del mismo con lo cual se evita la acumulación de desechos como es el caso de los reactores de combustible sólido. La presión en el núcleo es muy baja, solo la necesaria para circular el fluido entre el núcleo y el intercambiador de calor (Ver Figura 9) con valores de 0.5 MPa (72 psi, 5.1 kg/cm^2) (¡apenas el doble de la presión de las ruedas de un carro!). Por ello es prácticamente imposible de que ocurra un accidente severo o explosión en este reactor. La sal fundida, como casi todos los líquidos, se expande al calentarse. Esto le comunica al reactor una seguridad inherente: si por alguna eventualidad aumentara anormalmente la temperatura, la sal fundida se expande, disminuye su densidad y disminuye la reactividad con lo cual tiende a disminuir la temperatura. Esta propiedad se denomina “Coeficiente negativo de reactividad”

c.- La sal fundida es el medio para el procesamiento del combustible usado. Las propiedades químicas del FLiBe son ideales para esta función que se realiza en línea durante la operación del reactor. A la sal fundida se le burbujea helio para arrastrar los gases productos de la fisión. Estos gases se extraen del reactor y se pasan por filtros externos de carbón activado que retienen los gases y otros productos de fisión que no son solubles en la sal fundida. De esta manera el Xenon 135 es retirado del reactor durante su operación. Por esta razón en estos reactores no puede ocurrir el “Envenenamiento Xenón” y se pueden

usar a distintos valores de potencia según la demanda de energía. Cosa que no pueden hacer los reactores actuales.

La Figura 10 muestra la imagen del reactor FUJI. Es un reactor de potencia intermedia (200 MWe) diseñado en Japón bajo el liderato de Kazuo Furukawa (Furukawa *et al.* 2011). Posee un núcleo de grafito, para termalizar los neutrones, el cual ocupa el 93 % del volumen mientras que el espacio restante de 7 % es la sal fundida que circula por conductos en el grafito. El combustible en la sal fundida (< 1% U-233) solo es crítico (fisiona) en el grafito del núcleo. El reactor posee la “Freeze valve” o válvula congelada en la parte inferior del núcleo que se derrite en caso de pérdida de energía eléctrica. (Caso del accidente en Fukushima) En este caso el combustible fluye al tanque de drenaje con enfriamiento pasivo bajo el reactor, evitando cualquier tipo de accidente.

La simplicidad de los reactores de sal fundida son tales que el costo de inversión y costo de mantenimiento se estiman en valores inferiores al del uso del carbón para la generación de electricidad (Robert Hargraves 2009). Existe actualmente un movimiento mundial a favor del Reactor de Torio de Sal Fundida y una multitud de nuevos diseños, particularmente reactores de muy baja potencia para probar la factibilidad del concepto. Esto incluye reactores muy simples con una potencia eléctrica tan baja como 1 MWe⁽⁹⁾.

Conclusiones

Chernóbil fue un accidente con graves consecuencias debido a la realización de ensayos fuera de los parámetros de diseño, al manejo incorrecto del reactor por parte de los operarios y por problemas de diseño.

Si bien los efectos adversos a la salud del accidente son muy graves, la mortalidad por

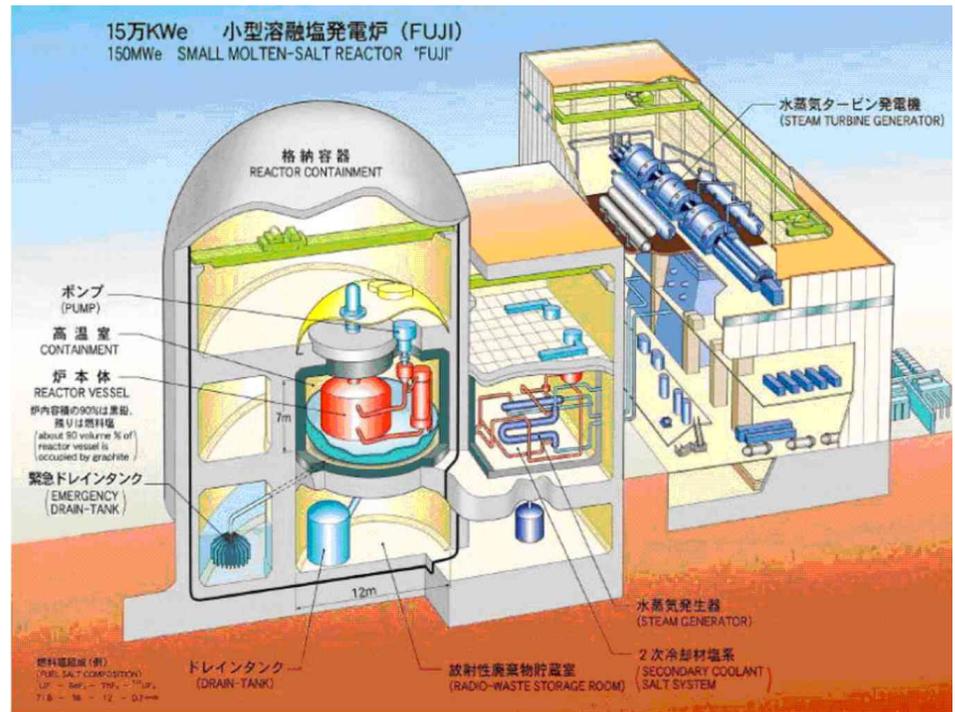


Figura 10. El reactor FUJI de sal fundida. Muestra las tres partes principales: Núcleo del reactor con intercambiador de calor y tanques de drenaje del combustible, zona de generación de vapor y zona de generación de electricidad.

el accidente ha sido exagerada por razones políticas y por la influencia del lobby de movimientos antinucleares, sin embargo la verdadera cifra de víctimas es muy pequeña en comparación a la causada por los ensayos nucleares u otros accidentes tecnológicos.

La energía nuclear actual adolece de diversas fallas que la hacen objetable a la sociedad.

La alternativa del reactor de torio de sal fundida (MSR) solventa casi todas las objeciones a la energía nuclear actual y es capaz de proveer la energía limpia, de alta seguridad y bajo costo que requiere la humanidad para su progreso.

Referencias

- (1) Abram Tim and Sue Ion (2008). Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. *Energy Policy* 36, 4323–4330.
- (2) Barros H. (2016). Comunicación

personal.

- (3) Burton Bennet, Michael Repacholi and Zhanat Carr. (2006) Health effects of the Chernobyl accident and special Health Care Program. Report of the UN Chernobyl Forum. Expert Group “Health” World Health Organization. Accesado mayo de 2016.

- (4) http://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/WHO%20Report%20on%20Chernobyl%20Health%20Effects%20July%202006.pdf Hyperphysics(2016) Georgia State University.

- (5) <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/cherno2.html#c4>.

- (6) Furukawa, K. Greaves E. D., Erbay L. B., Hron M. and Kato Y. (2011). New Sustainable Secure Nuclear Industry based on Thorium Molten-Salt Nuclear Energy Synergetics(THORIMS-NES) in *Nuclear Power, Book 1*, INTECH Pubs. Pavel

Tsvetkov Ed. Pp 407-444 (39 Pag) ISBN 978-953-307-185-5. (2011) <<http://j.mp/s4yNYh>>.

(7) Hargraves Robert (2009) Thorium Energy Cheaper than Coal. Accesado mayo de 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=ayIyiVua8cY>.

(8) Huffpost Science (2016). Accesado mayo 2016 http://www.huffingtonpost.com/entry/watch-every-nuclear-bomb-ever-explode-on-this-interactive-map_us_55dcd470e4b08cd3359db602.

(9) Kamei Tatashi (2015) Perspective of R&D of small molten salt reactor (MSR) Proposal of UNOMI. Nuclear Safety and Simulation, Vol. 6, Number 4, December 2015, pp 299-309.

(10) Observatorio Venezolano de Violencia (2016). Accesado mayo de 2016. <http://observatoriodeviolencia.org.ve/>.

(11) WHO/IAEA/UNDP (2005) Chernobyl: the true scale of the accident. 20 Years Later a UN Report Provides Definitive Answers and Ways to Repair Lives. Accesado Mayo de 2016. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/>.

(12) Wikipedia (2016A) Startup neutron source. Accesado mayo de 2016. https://en.wikipedia.org/wiki/Startup_neutron_source.

(13) Wikipedia (2016B). Accessed May 2016. <https://en.wikipedia.org/wiki/RBMK>.

(14) Wikipedia (2016C). Bhopal disaster. Accesado mayo 2016. https://en.wikipedia.org/wiki/Bhopal_disaster.

(15) Winsconsin Project on Nuclear Arms Control (2016) Accesado mayo de 2016.

<http://www.wisconsinproject.org/pubs/articles/2001/bomb%20facts.htm>.

Notas

¹ La cita textual de la referencia es “An international team of more than 100 scientists has concluded: As of mid-2005, however, fewer than 50 deaths had been directly attributed to radiation from the disaster, almost all being highly exposed rescue workers, many who died within months of the accident but others who died as late as 2004”.

² “The new numbers are presented in a landmark digest report, “Chernobyl’s Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts,” just released by the Chernobyl Forum. The digest, based on a three-volume, 600-page report and incorporating the work of hundreds of scientists, economists and health experts, assesses the 20-year impact of the largest nuclear accident in history”

³ La radiación producida fue detectada en Venezuela en los meses siguientes en un trabajo realizado por el Dr. Deig Sandoval y Eduardo D. Greaves. Muestras de lluvia fueron recolectadas en un dispositivo instalado en los jardines de la casa habitación del profesor Greaves. Las muestras fueron procesadas en la USB y en el IVIC y medidas por espectroscopía alfa en la USB. Adicionalmente la radiación producida por el Cs-137 proveniente del accidente ha sido detectada en muestras en la falda norte de la cordillera de la costa por el profesor Daniel Palacios del Departamento de Física de la USB.