

Accidente por apagón en **FUKUSHIMA**





Estudio de causas y efectos del siniestro en la central nuclear japonesa



En este artículo se ha llevado a cabo un análisis fenomenológico del accidente provocado por la interrupción total del suministro eléctrico en la central japonesa de Fukushima Daiichi a causa de un terremoto y un tsunami, así como de sus repercusiones. Se cree que en las unidades 1, 2 y 3 se produjeron daños sustanciales en el combustible y fusiones parciales del núcleo, con inundación de los sótanos de los reactores como consecuencia de posibles fugas en las conducciones que iban hasta las vasijas de contención. Cinco horas después de ser alcanzada por la combinación del terremoto y el tsunami se produjo un descubrimiento del núcleo en la unidad 1, con lo que la temperatura del combustible alcanzó los 2.800° C a las seis horas del suceso. Dieciséis horas después del accidente se produjeron daños parciales en el núcleo de la unidad 1, formándose un lecho de residuos en el fondo del núcleo y con el sótano del edificio de su reactor inundado hasta 4,2 metros de agua. Es probable que las vasijas de presión de las unidades 2 y 3 estén deterioradas y pierdan agua por el fondo. Las unidades de la 4 a la 6 no estaban operativas y se habían parado para realizar labores de mantenimiento. Sin embargo, el hidrógeno producido al deteriorarse el combustible de la unidad 3 llegó a través de una tubería de tratamiento de gases hasta la unidad 4 pasando por válvulas deterioradas; posteriormente se filtró por los conductos de las plantas 2, 3 y 4 y provocó un incendio y una explosión. Se produjeron explosiones de hidrógeno en las unidades de la 1 a la 4. Gracias a la acertada aplicación de refrigeración complementaria se evitó una posible fusión total del núcleo, en la que el corio fundido podría haberse abierto paso por la vasija de presión. Asimismo, se examinan las implicaciones del accidente.

Por el **DR. MAGDI RAGHEB**, Departamento de Ingeniería Nuclear, de Plasma y Radiológica, Universidad de Illinois, Campus de Urbana-Champaign, 216 Talbot Laboratory, 104 South Wright Street, Urbana, Illinois 61801, EE.UU. <https://netfiles.uiuc.edu/www/mragheb, mragheb@illinois.edu>

El 29% de la energía eléctrica que se genera en Japón proviene de centrales nucleares. Sus instalaciones están diseñadas para resistir los frecuentes terremotos y tsunamis que tienen lugar en ese país. La electricidad que producen estas instalaciones se obtiene de un total de 17 centrales con 54 reactores nucleares, 24 de ellos de agua a presión (PWR, por sus siglas en inglés), 30 de agua en ebullición (en inglés, BWR) y dos que se están construyendo en este momento.

El viernes 11 de marzo de 2011, la Agencia de Seguridad Nuclear e Industrial japonesa (en inglés, NISA) declaró el estado de emergencia en el BWR de Fukushima Daiichi (número 1) y posteriormente en el de Fukushima Daini (número 2) después de que se vieran afectados por la combinación de un terremoto de magnitud 8,9-9,0 en la escala de Richter próximo a la costa oriental de Honshu y un tsunami que produjo una ola de 15-24 m de altura. Este movimiento sísmico se ha denominado terremoto de Tohoku-Chihou-Taiheiyo-Oki. Los registros oficiales que se remontan al año 1600 inspiraron el diseño del análisis de seguridad determinista o mecanicista de la central para resistir los terremotos más intensos de una magnitud de 8,6 en la prefectura de Fukushima. El terremoto que tuvo lugar en Jogan en el año 869 produjo un tsunami que penetró 4 km en tierra firme, con olas de 8 m de altura en Soma, situada a unos 40 km al norte del emplazamiento de la central. Ésta se construyó sobre un acantilado de 4,3-6,3 m de altura, que ofrecía una protección natural contra los tsunamis. Unos rompeolas en el mar de 5,7 m de altura la protegían de los tifones, pero aparentemente no de los tsunamis. Un tsunami de 3,5 m de altura que se produjo en 1960 en Chile como consecuencia de un terremoto de magnitud 9,5 se utilizó como referencia pa-



Recuperación del suministro proveniente del exterior a las unidades 1 y 2 y del suministro a la sala de control de la unidad 2 el 26 de marzo de 2011. Las placas del techo quedaron colgando como consecuencia del terremoto. Fuente: Tepco.

ra un punto de diseño de 5,7 m, por debajo de los 8,2 m alcanzados en Soma. La central está situada a 250 km al norte de la zona metropolitana de Tokio, donde residen 30 millones de personas, y a 65 km del epicentro del terremoto en el océano Pacífico. Se trata del fenómeno más intenso que se produce en Japón desde que comenzó a llevarse un registro histórico de ellos en el siglo XIX.

Magnitud e intensidad del terremoto

Escala de magnitud

Denominado en Japón como *san ten ichi ichi* o del 11 de marzo, se calcula que el terremoto afectó a dos placas tectónicas en subducción de 80 km de espesor que liberaron una energía equivalente a unos 480 Mt de TNT, lo cual desplazó parte de la línea costera 3,6 m hacia el este. La potencia equivalente del dispositivo nuclear de Nagasaki osciló entre 20-22 kT de TNT. Así pues, la energía liberada en el terremoto fue comparable a la de $480.000 / 20 = 24.000$ dispositivos. Como consecuencia de esa gigan-

tesca cantidad de energía, el lecho marino se deformó en una franja de 300 km a lo largo de la línea de falla afectada. Se calcula que 67 km^3 de agua oceánica cayeron sobre 860 km del litoral japonés, con una ola que alcanzó cerca de 24 m de altura.

El terremoto de magnitud 9,0 detectado fue más potente que el de 8,6 que se utilizó como base de diseño. La diferencia entre ambas magnitudes en la escala de Richter viene dada por:

$$\Delta M = \log_{10} \frac{M_2}{M_1} = \log_{10} M_2 - \log_{10} M_1 \quad (1)$$

La proporción entre magnitudes se puede calcular mediante la relación:

$$e^{\ln x} = 10^{\log_{10} x} = x$$

$$\frac{M_2}{M_1} = 10^{\log_{10} \frac{M_2}{M_1}} = 10^{\Delta M} \quad (2)$$

Dado que la de Richter es una escala logarítmica en base 10, cada incremento de un entero corresponde a un aumento de un factor de 10 en la amplitud medida:

$$\Delta M = \log_{10} \frac{10 M_1}{M_1} = \log_{10} 10 = 1$$

Esto implica que la proporción entre la M_1 del diseño y la M_2 experimentada en los terremotos según la escala de magnitudes es un factor de:

$$\frac{M_2}{M_1} = 10^{(9.0 - 8.6)} = 10^{0.4} = 2.5$$

Intensidad, liberación de energía y poder de destrucción

La escala de magnitudes compara la amplitud de las ondas registrada en un sismógrafo, y no describe directamente la magnitud de la energía liberada como consecuencia de un terremoto. Esta ener-

gía es la que afecta a las estructuras y provoca los daños. Para calcular la energía liberada E suele utilizarse una fórmula empírica que la relaciona con la magnitud M del modo siguiente:

$$\log_{10} E \propto 1.5M \quad (3)$$

La intensidad o la cantidad de energía liberada se puede calcular a partir de:

$$\begin{aligned} 10^{\log_{10} E} &\propto 10^{1.5M} \\ E &\propto 10^{1.5M} \end{aligned} \quad (4)$$

De donde:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{10^{1.5M_2}}{10^{1.5M_1}} = 10^{1.5(M_2 - M_1)} \quad (5)$$

La proporción entre las intensidades o la cantidad de energía liberada E_2 en el terremoto de magnitud 9 con respecto a la E_1 del terremoto de magnitud 8,6 utilizado como referencia para el diseño se puede calcular del modo siguiente:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(10^{1.5})^{9.0}}{(10^{1.5})^{8.6}} = 10^{(1.5)(9.0 - 8.6)} = 10^{(1.5)(0.4)} = 10^{0.6} = 3.98; 15$$

Así pues, la intensidad del terremoto real fue 15 veces superior a la del utilizado para el diseño, y de ahí su poder destructivo. Evidentemente, los grandes terremotos se caracterizan por tener factores de intensidad o de liberación de energía muy superiores a los pequeños, lo que los convierte en fenómenos mucho más devastadores.

Evolución del accidente

Hasta la fecha no se había producido ninguna sucesión de fallos semejante en dos instalaciones y con varias unidades de reactores afectadas simultáneamente tras un accidente por apagón total con caída del suministro eléctrico exterior e interior. Una situación de estas características representa una amenaza simultánea para las funciones de control y de refrigeración de la central. Esta situación se considera como un «accidente que supera al de base de diseño» (*beyond-design-basis*).

El terremoto desencadenó una parada segura de las tres reacciones de fisión en cadena en los reactores que estaban funcionando en ese momento en la central según su diseño. Los otros tres ya se encontraban parados desde antes para realizar tareas de mantenimiento. En las



Consecuencias del accidente de Fukushima Daiichi el 18 de marzo de 2011, una semana después de producirse. Por toda la zona aparecen escombros de las explosiones de hidrógeno que tuvieron lugar en las unidades 1, 3 y 4. A lo largo de la línea costera se aprecian los desperfectos causados por el terremoto y el tsunami en los sistemas eléctricos. Aún emana vapor de la unidad 2.

instalaciones había 6.415 personas, de las cuales 5.500 estaban subcontratadas.

El terremoto dejó fuera de servicio un transformador situado a unos 10 km de la central, lo que cortó su conexión con la red eléctrica. Como consecuencia de ello, aunque se restableció el suministro en la red a los 50 minutos de producirse el terremoto, la central siguió sin poder recibir electricidad del exterior.

Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo

Debido a la parada del reactor como consecuencia del terremoto, el disyuntor de las turbinas también se disparó, ya que las válvulas de aislamiento del vapor principal cerraron el suministro de vapor a las turbinas. Esto dio lugar a que las turbinas principales no pudieran generar electricidad para los sistemas de la central y su instrumentación asociada.

A pesar de haberse interrumpido el suministro eléctrico tanto interno como externo, existía otra línea de defensa en el sistema de refrigeración de emergencia del núcleo (ECCS, por sus siglas en inglés). La central todavía podía recibir electricidad mediante los 13 generadores diésel de emergencia situados dentro y fuera del recinto, cada uno de los cuales disponía de combustible suficiente para proporcionar 6 MWh de energía. Ocho de estos generadores diésel, cada uno del tamaño de una locomotora, se hallaban en el sótano número 1 de la sala de turbinas. Éstas se sitúan a unos 140 m de la línea costera. Otros dos generadores diésel se encontraban en la planta baja, detrás de la unidad 4, que estaba cerrada por mantenimiento, y tres más estaban dentro y fuera del recinto



Imagen aérea de la unidad 4 de la planta nuclear, inoperativa en el momento del terremoto, que sufrió un incendio y una explosión.

de la unidad 6, también desconectada por el mismo motivo.

Al llegar la ola del tsunami unos 15 minutos después del terremoto, colisionó contra un rompeolas de 2,5 km formado por 60.000 bloques de hormigón y tetrápodos de 25 toneladas, así como contra un muro de 5,6 m de altura que se ele-

vaba sobre el lecho marino frente a la central. Ésta estaba construida sobre roca sólida a unos 10 m por encima del nivel del mar.

A pesar de estos medios de defensa, que habrían podido resistir los efectos de un huracán importante, una ola de 15 m de altura anegó varias partes de la central bajo 6 m de agua antes de volver al océano. Aparentemente, estaban afectadas las estructuras de entrada de agua marina de los sistemas de agua de servicios normal y de emergencia, posiblemente debido a la presencia de sedimentos.

HASTA AHORA NO SE HABÍA PRODUCIDO NINGUNA SUCESIÓN DE FALLOS SEMEJANTES EN DOS INSTALACIONES Y CON VARIAS UNIDADES DE REACTORES AFECTADAS SIMULTÁNEAMENTE TRAS UN ACCIDENTE POR APAGÓN TOTAL

El efecto más notable fue la inundación de ciertas zonas subterráneas de la central, sobre todo de los sótanos de las salas de turbinas, así como otras instalaciones. El nivel del agua llegó a una altura de alrededor de 4,2 m en uno de los edificios de turbinas. Esto inutilizó 12 de los 13 generadores diésel de emergencia y afectó a sus conmutadores eléctricos asociados cuando el agua del mar provocó un cortocircuito en los sistemas eléctricos. A las 15:41, una hora después del terremoto, que comenzó a las 14:46, ninguno de los generadores diésel suministraba energía, sumiendo a la central en una interrupción completa del suministro eléctrico o «apagón total».

Energía de los acumuladores de emergencia

Aun así, se disponía de bancos de acumuladores eléctricos de reserva cargados, los cuales se utilizaron para proporcionar refrigeración de emergencia. Estos acumuladores podrían suministrar energía a la central durante unas 12 horas hasta que ésta pudiera recibir de nuevo suministro eléctrico externo o interno.

Los equipos de vigilancia y control fallaron, probablemente debido a un mal funcionamiento de los circuitos eléctricos, lo que impidió a los operarios recibir información sobre el estado de la central. A las 16:36, dos horas después del terremoto, la compañía Tepco reconoció la situación, y 9 minutos más tarde la puso en conocimiento de las autoridades. A las 19:03 se declaró un estado de «emergencia nuclear», con lo que se inició la evacuación de la población circundante, zona que 24 horas después se amplió hasta un radio de 20 km.

Sistema de evacuación del calor residual

El terremoto desencadenó una parada automática de las centrales mediante la inserción de las barras de control

según su diseño. Las centrales nucleares difieren de otros motores térmicos en que, una vez detenida la reacción en cadena, los productos resultantes de la fisión de los elementos fisibles del núcleo siguen emitiendo radiación de partículas gamma y beta, que posteriormente disminuye a un ritmo exponencial. Es preciso extraer y eliminar este «calor residual» o «de desintegración» hasta que transcurridos unos días haya descendido hasta un nivel en el que ya no necesite refrigeración activa.

En condiciones normales, el exceso de calor en un BWR se elimina purgando el vapor de las conducciones correspondientes y enfriándolo en los condensadores principales de la zona de turbinas de la central. El diseño de estas instalaciones incluye también con este fin un sistema de evacuación del calor residual (RHR, por sus siglas en inglés) para em-

plearlo tras una parada o durante las labores de reparación y mantenimiento. Se utilizan bombas de calor residual e intercambiadores de calor hasta que llega un punto en el que el calor que generan es similar al que produce el simple bombeo del agua. En ese momento se pueden desconectar las bombas del RHR. Por lo general, éste se compone de cuatro bombas, de dos intercambiadores de calor y de las conducciones, válvulas e instrumentos correspondientes.

El RHR posee un modo de funcionamiento que permite eliminar el calor de la contención primaria tras producirse un accidente con pérdida de refrigerante (LOCA, por sus siglas en inglés). Otro de sus modos de funcionamiento es como inyección de refrigerante de baja presión (en inglés, LPCI) después de que el reactor se haya despresurizado a resultas de un posible LOCA.

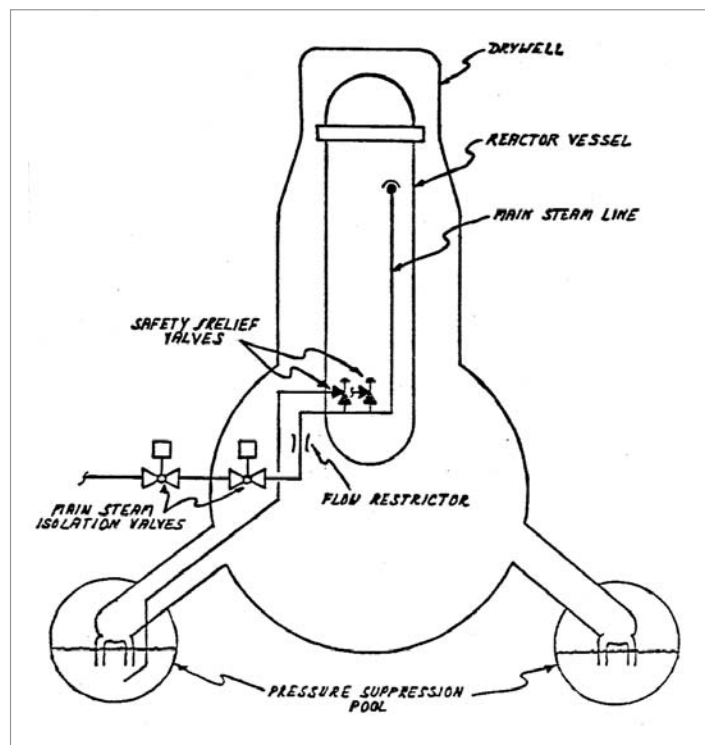


Figura 1. Válvulas de aislamiento principales y de alivio y seguridad que se utilizan en la despresurización de una central BWR. Fuente: GE.

Pérdida del sistema de refrigeración del núcleo aislado

En las unidades 1, 2 y 3 de las instalaciones de Fukushima Daiichi y en la unidad 4 de Fukushima Daini se produjo un fallo en la refrigeración del reactor a causa del sistema de refrigeración del núcleo aislado (RCIC, por sus siglas en inglés), situación que está contemplada en el artículo 15, apartado 1 de la Ley sobre medidas especiales relativas a la preparación frente a emergencias nucleares de Japón.

El RCIC proporciona agua de aporte al núcleo durante la parada del reactor si no se dispone de agua de alimentación. Se activa automáticamente cuando se recibe una señal de nivel bajo de agua en el reactor desde el sistema de control, o bien manualmente por el operario del reactor. Se bombea agua de refrigeración en el núcleo mediante una bomba accionada por turbinas utilizando vapor del sistema del reactor. Por lo general, la aspiración proviene del depósito de almacenamiento del condensado a través de una conducción común hasta la entrada de aspiración de la bomba del sistema de inyección de refrigerante de alta presión (en inglés, HPCI). El RCIC también puede bombear agua desde la piscina supresora de presión.

Sistema de alivio de presión nuclear

El sistema de alivio de presión nuclear protege la barrera de presión del refrigerante del reactor (RPCB, por sus siglas en inglés) frente a posibles desperfectos por exceso de presión. Existen unas válvulas de alivio y seguridad (en inglés, SRV) que son accionadas mediante presión para evacuar el vapor del sistema nuclear de generación de vapor (NSSS, por sus siglas en inglés) a la piscina supresora de presión.

Uno de sus componentes es el sistema de despresurización automática (en inglés, ADS), que despresuriza el NSSS

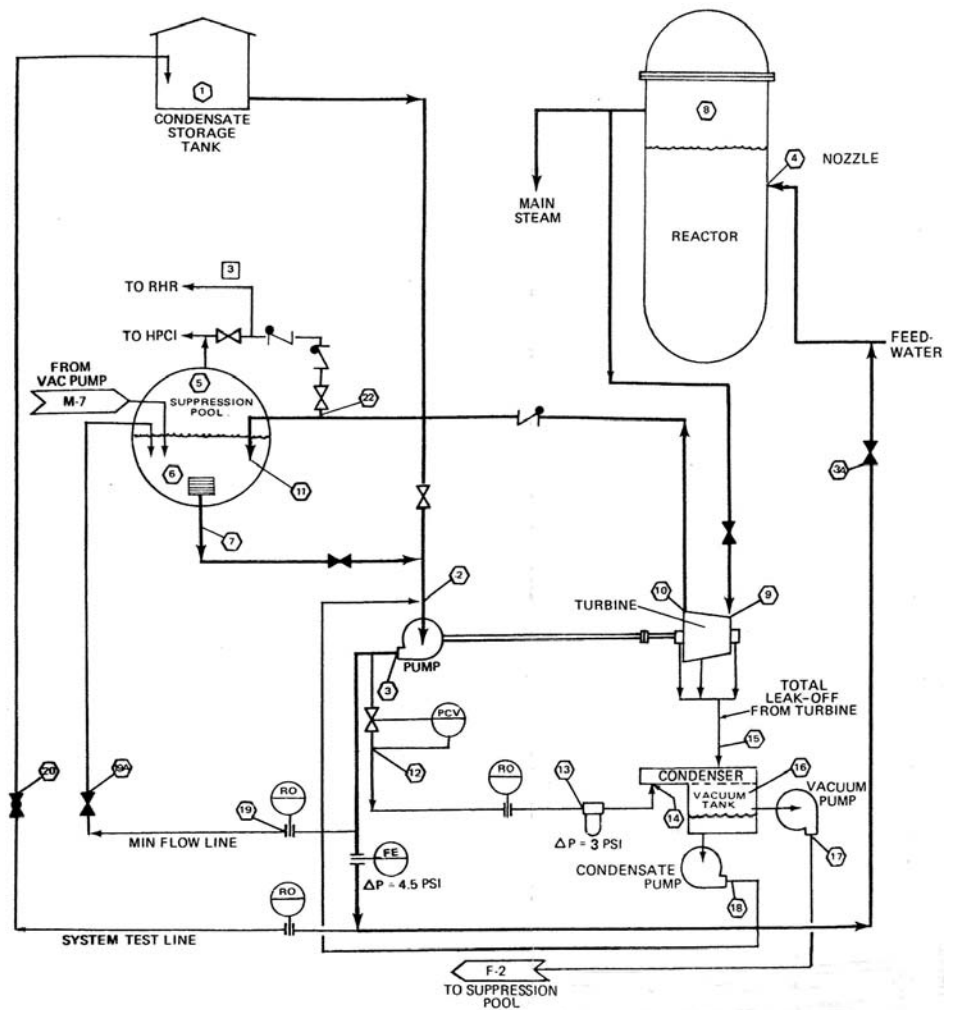


Figura 2. Sistema de refrigeración del núcleo aislado (RCIC) del BWR. Una turbina de vapor utiliza éste para impulsar una bomba que inyecta agua extraída del depósito de almacenamiento del condensado en el núcleo. La salida de la turbina de vapor se dirige hacia la piscina supresora de presión. HPCI: sistema de inyección de refrigerante de alta presión, RHR: sistema de evacuación del calor residual. Fuente: GE.

en caso de producirse un LOCA en el que el sistema de inyección de refrigerante de alta presión (HPCI) no logre mantener el nivel de agua de la vasija de presión del reactor (RPV). Las bombas del HPCI generan un nivel elevado y, por consiguiente, un caudal bajo.

La despresurización del NSSS permite accionar el sistema de refrigerante de baja presión (LPCI) con un nivel bajo pero con un gran caudal para refrigerar adecuadamente el combustible del núcleo.

Válvulas de aislamiento del vapor principal

En condiciones estables y transitorias, el sistema principal de vapor del BWR realiza las funciones siguientes:

- Recoge el vapor generado en el núcleo y lo envía a la turbina para generar energía eléctrica.
- Desvía hacia el condensador el vapor que exceda la cantidad que necesiten la turbina y sus dispositivos auxiliares.

En cada conducción de vapor del interior de la contención primaria existen limitadores tipo Venturi para el caudal de la tubería de vapor principal. Estos dispositivos limitan la pérdida de refrigerante hacia fuera de la contención primaria como consecuencia de alguna grieta existente en la tubería de vapor principal. La pérdida de refrigerante se limita, de manera que el nivel de agua de la vasija del reactor permanece por encima de lo más alto del núcleo durante el tiempo necesario para que las válvulas de aislamiento del vapor principal (MSIV) se cierren con el fin de proteger la barrera de combustible.

Por lo general existen tres MSIV en cada tubería de vapor principal: se trata de dos MSIV, una situada dentro y otra fuera de la contención primaria, y de una de cierre del vapor principal (MSSV, por sus siglas en inglés) situada más adelante de la MSIV exterior.

La sección del sistema de alimentación de la tubería de vapor principal situada entre la MSIV exterior y la MSSV está diseñada para facilitar la eliminación de fugas de aire de las MSIV tras un posible accidente. En caso de rotura de una tubería de vapor principal dentro de la contención, se cerraría la válvula de aislamiento del interior o del exterior de la contención primaria para sellar ésta.

Las MSIV primarias se cierran automáticamente para aislar la barrera de presión del refrigerante del reactor (en inglés, RCPB) en caso de rotura de una conducción más adelante de la válvula de aislamiento exterior. Este procedimiento limita la pérdida de refrigerante y la posible emisión de radiactividad desde el NSSS.

Despresurización, evacuación del vapor

Dado que no se proporcionó circulación al núcleo, éste quedó al descubierto al convertirse el agua en vapor. En la mayoría de los BWR existe un sistema de

LA INTENSIDAD DEL TERREMOTO REAL FUE 15 VECES SUPERIOR A LA DEL UTILIZADO PARA EL DISEÑO DE LA CENTRAL NUCLEAR DE FUKUSHIMA, DE AHÍ SU PODER DESTRUCTIVO

rociado del núcleo para refrigerar los elementos combustibles. Se generó vapor, lo cual incrementó la presión del sistema. Las válvulas de alivio y seguridad evacuaron automáticamente el vapor hacia la piscina supresora de presión, enfriándolo rápidamente y condensándolo.

Durante el proceso de evacuación del vapor para reducir la presión en el sistema de contención se produjo supuestamente una explosión de hidrógeno en la unidad 1 de Fukushima Daiichi el 13 de marzo de 2011, con daños asociados en el combustible y en la estructura de contención, fusión parcial del núcleo y emisión de productos de fisión. Se evacuaron pequeñas cantidades de radiactividad. En el núcleo del reactor había cargados 400 elementos combustibles, y 292 en la piscina de almacenamiento de combustible. Los escombros del tejado cayeron sobre la cubierta de carga del reactor y se precipitaron hacia la piscina de almacenamiento de combustible.

En caso de descubrimiento del núcleo, las vainas de circonio interactúan con el vapor caliente liberando hidrógeno, un gas incondensable. En condiciones normales, el vapor y el hidrógeno se dirigen hacia el sistema de ventilación con filtro y se extraen de la chimenea de evacuación para liberarlos en un lugar elevado. En la mayoría de los BWR existen recombinadores de hidrógeno que queman éste de manera controlada rociándolo sobre agua. Debido a la situación de apagón total, es posible que no hayan funcionado el sistema de evacuación y los recombinadores de hidrógeno, y que se hayan acumulado el vapor y el hidrógeno dentro de la estructura de contención secundaria. El hidrógeno es combustible

a concentraciones en el aire superiores al 4%, y reacciona de forma explosiva con el oxígeno si su concentración supera el 8%. El proceso puede iniciarse como consecuencia de una chispa o por autoignición.

El 15 de marzo de 2011 se comunicó una explosión en la unidad 2 que supuestamente dañó su piscina supresora de presión. Según parece, se produjeron daños en el combustible y una fusión parcial del núcleo con evacuación de algunos productos de fisión. El núcleo contaba con 548 elementos combustibles, y la piscina de almacenamiento de combustible tenía 587.

El 14 de marzo de 2011 se produjo en la unidad 3 una explosión de hidrógeno supuestamente más intensa asociada a la despresurización de vapor, que fue acompañada de un incendio y que podría haber producido desperfectos en la piscina supresora de presión. Esta unidad utilizaba una mezcla de combustible de óxidos mixtos (MOX, por sus siglas en inglés) con UO_2 y PuO_2 , lo que incrementó la preocupación debido a que el punto de fusión del Pu es más bajo que el del U, así como por la toxicidad química y radiactiva combinada del Pu. El núcleo del reactor disponía de 548 elementos combustibles, y la piscina de almacenamiento de combustible tenía 587. La vasija de contención del reactor podría haberse dañado y dejado al descubierto el combustible gastado. Un directivo de la compañía comunicó la posible existencia de una «larga grieta vertical» en un lado de la vasija de contención. También se sospecha de la existencia de un escape de corio fundido hacia la losa de sustentación de hormigón y de una posible interacción con ella. Esta poten-

te explosión podría haber expulsado componentes de la parte superior del reactor, como tapas del blindaje de hormigón y piezas de una grúa de carga.

El hidrógeno producido al deteriorarse el combustible de la unidad 3 pasó mediante una tubería de tratamiento de gases a la unidad 4 a través de válvulas deterioradas y se filtró por las conducciones de las plantas 2, 3 y 4, causando un incendio y una explosión. A las 18:00 horas del 15 de marzo de 2011 se produjo una posible explosión de hidrógeno en la unidad 4 previamente apagada, cuyo combustible, al estar en situación de parada, se había trasladado desde el núcleo hasta su piscina de almacenamiento. Al parecer, la piscina contenía 1.331 elementos combustibles, de los cuales 548 se habían extraído del núcleo para realizar el mantenimiento. La liberación de hidrógeno produce corrosión de las vainas y daños en el combustible.

En la unidad 4 se desató un incendio que duró dos horas y que se extinguió a las 14:00 del 15 de marzo de 2011; al día siguiente se reavivó y fue extinguido de nuevo. Las unidades 5 y 6 ya estaban paradas cuando el terremoto y el tsunami afectaron a los edificios de los reactores. La refrigeración de las piscinas de almacenamiento de combustible comenzó a ser un problema. La unidad 5 tenía 548 elementos combustibles en el núcleo y 946 en la piscina de almacenamiento. Por su parte, la unidad 6 contaba con 764 elementos combustibles en el núcleo y con 876 en la piscina de almacenamiento.

Al parecer, tuvo lugar una explosión de hidrógeno en la unidad 4 de la central de Fukushima Daini, que, según se dijo, había tenido acceso a suministro eléctrico del exterior a través de la red eléctrica y, por tanto, se había recuperado del terremoto y del tsunami según lo previsto en su diseño.

Se establecieron un plan de evacuación de la población y unos cortes de su-



Vix perspicax apparatus bellis vocificat quadrupel. Umbraculi agnascor oratori. Rures praemuniet catelli Quadrupel miscere Medusa. Aegre bellus matrimonii iocari suis. Incredibiliter tremulus sa

ministro eléctrico intermitentes temporales. Una plantilla mínima de entre 70 y 250 empleados voluntarios se encargaron de la refrigeración de los reactores dañados. Las piscinas de almacenamiento de combustible empezaron a correr el riesgo de perder el agua de refrigeración y de que el combustible sufriera daños.

Terremotos anteriores

Las centrales nucleares están diseñadas para resistir el terremoto de mayor magnitud en la escala de Richter del lugar donde se encuentran. Según parece, la central de Fukushima estaba diseñada para resistir un terremoto de magnitud 8,6 en la escala de Richter, aunque el que sufrió fue de mayor intensidad, entre 8,9 y 9,0.

El terremoto y el tsunami que afectaron en 2004 a Sumatra provocaron la parada de la central nuclear de Kalpakkam, próxima a Chennai, en India, y de cuatro centrales en Taiwán. El peor terremoto de Japón tuvo lugar en Kanto en 1923 y fue de una magnitud de 8,3, causando 143.000 víctimas. Otro de magnitud 7,2 ocurrido en Kobe en 1995 mató a 6.400 personas. Japón se halla cerca del Cinturón de Fuego del Pacífico, zona de gran actividad sísmica donde se produce el 90% de los terremotos del mundo. El terremoto y el consiguiente tsunami ocurrido el 26 de diciembre de 2004 en Sumatra (Indonesia) se cobró la vida de 230.000 personas y afectó a una docena de países. En febrero de 2010, un terremoto de magnitud 8,8 que sacudió el centro de Chile causó un tsunami que mató a 524 personas.

El terremoto de marzo de 2011 ha sido el más intenso registrado jamás en Japón

y el quinto más violento de la historia. Como consecuencia de este movimiento sísmico, la isla principal de Japón se desplazó 2,5 m, y el eje terrestre 10 cm.

Las reacciones de fisión en cadena de los reactores BWR, según su diseño, se detuvieron con éxito mediante la inserción satisfactoria de las barras de control gracias a su sistema de control automático, pero el sistema de evacuación no funcionó según lo previsto para extraer el calor de desintegración de los productos de la fisión, dando lugar así a un accidente por pérdida de refrigeración. Los generadores diésel de los componentes eléctricos del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo (ECCS) de la central supuestamente se vieron afectados por la inundación provocada por el tsunami, propiciando su parada al afectar a sus sistemas de conmutación en las zonas más bajas de la central, que habían quedado inundadas.

El 17 de junio de 2010, la unidad BWR 2 de Fukushima fue parada de emergencia debido a un problema con el generador. Se interrumpió el suministro

LA COMBINACIÓN DEL TERREMOTO Y EL TSUNAMI PROVOCÓ UNA PÉRDIDA DE SUMINISTRO ELÉCTRICO EN LA CENTRAL DE FUKUSHIMA, LO QUE DERIVÓ EN UN «ACCIDENTE POR APAGÓN TOTAL»

eléctrico durante un breve periodo porque no se pudo cambiar al suministro eléctrico externo. La bomba de agua de alimentación se detuvo, y el nivel de agua del reactor descendió unos 2 m. Los generadores diésel de emergencia entraron en funcionamiento correctamente. No fue necesario activar el ECCS, ya que la bomba del sistema de refrigeración del núcleo aislado (CICS, por sus siglas en inglés) restauró el nivel de agua del núcleo.

La combinación del terremoto y el tsunami causó una pérdida de suministro eléctrico en la central. Cuando no se puede obtener suministro eléctrico del exterior ni del interior de las instalaciones, se produce el denominado «accidente por apagón total». Esto dio lugar a un accidente con pérdida de refrigerante (LOCA) que deterioró el combustible y pro-

vocó un escape de radiación similar al de la Isla de las Tres Millas.

Los niveles de radiación se elevaron hasta 103 veces el normal en la sala de control de la unidad 1, y hasta 8 veces el nivel de fondo normal fuera de las instalaciones como consecuencia del deterioro del combustible y de la liberación de productos de fisión. La refrigeración se vio amenazada en otras dos unidades de las seis que componen las instalaciones de Fukushima Daiichi. Apparentemente, la capacidad de refrigeración también se vio amenazada en las instalaciones cercanas de Fukushima Daini, donde se conservó el suministro eléctrico externo y se pudo recuperar según lo previsto en su diseño.

Los generadores diésel de emergencia de la central nuclear de Fukushima no se pudieron utilizar debido a los daños comunicados en los sistemas eléctricos de la central como consecuencia del tsunami. La compañía eléctrica Tokyo Electric Power Company desplazó hasta allí generadores de emergencia y dotaciones de bomberos para suministrar energía capaz de enfriar los reactores.

Simultáneamente, como consecuencia del terremoto se produjo un incendio que fue extinguido en un transformador de la central nuclear de Onagawa, propiedad de la compañía eléctrica Tohoku, en el noroeste de Japón. Uno de los reactores de la central de Onagawa experimentó una fuga de refrigerante. Se activó una parada segura en las once centrales nucleares más próximas al epicentro de un total de 55 reactores, lo que representa el 20% de toda la potencia eléctrica nuclear instalada en Japón.



El terremoto de Kobe (Japón), en 1995, con una magnitud de 7,2 grados en la escala de Richter, provocó grandes daños materiales y la pérdida de 6.400 vidas humanas.

Eliminación del calor de desintegración

Una vez detenida la producción de energía de fisión mediante las barras de control, siguió generándose calor de desintegración hasta un nivel inicial cercano al 3% de la potencia de fisión un minuto después de la parada. Dicho calor disminuye exponencialmente a lo largo del tiempo, pero es necesario seguir aplicando refrigeración durante varios días mediante el sistema de evacuación del calor residual (RHR).

La proporción entre la potencia y el calor de desintegración está en función de [10]:

$$\frac{P[\text{MWth}]}{P_0[\text{MWth}]} = 6.48 \times 10^{-3} P_0 [t^{-0.2} - (t + T_0)^{-0.2}] \quad (6)$$

Donde:

- P_0 es la potencia de fisión del reactor antes de la parada en MWt,
- P es la generación de potencia térmica de desintegración en MWt,
- t es el tiempo transcurrido después de la parada en días,
- T_0 es el tiempo de funcionamiento del reactor al nivel de potencia P_0 en días.

Al cabo de un segundo o inmediatamente después de la parada, la proporción de potencia de desintegración para un reactor que funcionara durante un periodo de $T_0 = 1$ año = 365 días sería:

$$\begin{aligned} \frac{P(t)}{P_0} &= 6.48 \times 10^{-3} [t^{-0.2} - (t + T_0)^{-0.2}] \\ &= 6.48 \times 10^{-3} \left[\left(\frac{1}{24 \times 60 \times 60} \right)^{-0.2} - \left(\frac{1}{24 \times 60 \times 60} + 365 \right)^{-0.2} \right] \\ &= 0.06094 \approx 6\% \end{aligned}$$

Suponiendo que el rendimiento térmico de la central sea de 1/3, la potencia térmica de la unidad 1 sería de 460 / (1/3) = 460 x 3 = 1.380 MWt. Así pues, inicialmente, al cabo de un segundo o in-

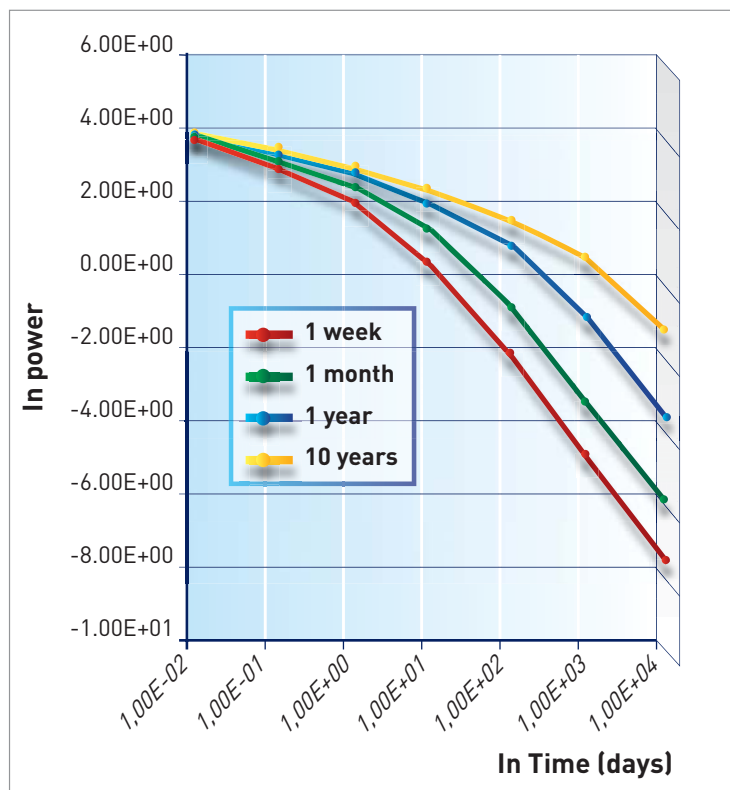


Figura 3. Liberación de potencia térmica de desintegración en un reactor de agua ligera de 3.000 MWt durante diversos periodos de funcionamiento. La potencia de generación de calor de desintegración disminuye exponencialmente al cabo de varios días tras la parada.

mediatamente después de la parada es necesario proporcionar refrigeración para $1.380 \times (6/100) = 82,8$ MWt de potencia térmica. Un minuto después de la parada desciende rápidamente a la mitad del valor inicial, con lo que hay que suministrar refrigeración para $1.380 \times (3/100) = 41,4$ MWt de potencia térmica.

Si se logra refrigerar el sistema satisfactoriamente durante una semana (siete días) después de la parada, la cantidad de refrigeración necesaria se reduce considerablemente hasta:

$$\begin{aligned} \frac{P(t)}{P_0} &= 6.48 \times 10^{-3} [t^{-0.2} - (t + T_0)^{-0.2}] \\ &= 6.48 \times 10^{-3} [(7)^{-0.2} - (7 + 365)^{-0.2}] \\ &= 0.0024 \approx 0.24\% \end{aligned}$$

La cantidad de refrigeración necesaria una semana después de la parada será ya solo de $1.380 \times (0,24/100) = 3,31$ MWt.

Liberación de productos de fisión

Es necesario seguir suministrando activamente refrigeración para el calor de desintegración durante al menos 24-48 horas. De lo contrario, se oxidarán las vainas de zircaloy del combustible, formando hidrógeno, deteriorando el combustible y liberando productos de fisión en la estructura de contención. Si el sistema de supresión de la presión no es capaz de enfriar rápidamente el vapor y de reducir la presión en la carcasa de contención, la acumulación de presión en la contención –a menos que se libere de forma controlada– provocaría deficiencias en ésta por sus uniones más débiles, que son los puntos de penetración de conducciones e instrumentos. El terremoto también pudo ha-

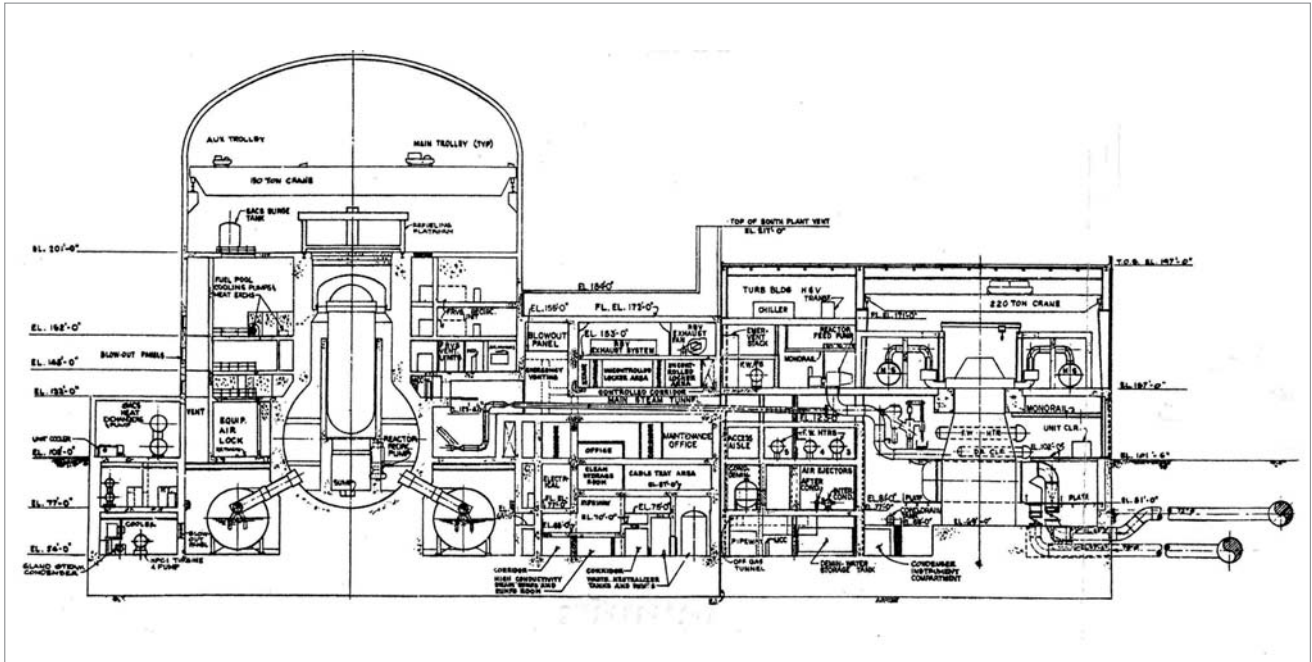
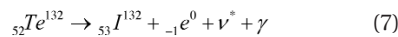


Figura 4. Corte transversal de la contención y de la sala de turbinas donde se muestra la ubicación de la piscina de almacenamiento de combustible en un BWR típico. Los elementos situados por debajo del nivel del suelo y, por tanto, afectados por la inundación causada por el tsunami incluyen bombas y dispositivos eléctricos. El pozo seco cuenta con un sumidero. Cualquier fuga de corio fundido que pase por las juntas de estanqueidad de las barras de control puede interactuar con el agua del sumidero y con la losa de hormigón, provocando una explosión de vapor e incrustándose en el hormigón. Fuente: GE.

ber afectado a la integridad de estos puntos de penetración. En este caso, la emisión al entorno de especies gaseosas radiactivas volátiles, como I^{131} , con una semivida breve de 8,04 días, y Te^{132} , que genera I^{132} y los gases nobles Kr^{87} y Xe^{131} como consecuencia de los daños producidos en el combustible, se produce unas 24-48 horas después del accidente.

El isótopo I^{131} se utiliza para el tratamiento de nódulos tiroideos y de la enfermedad de Graves-Basedow, ya que el yodo tiende a acumularse en la glándula tiroidea. Esto representa también un riesgo para la salud a corto plazo en los accidentes con reactores. El principal riesgo que suponen los isótopos de vida corta proviene del I^{132} que surge del producto de fisión Te^{132} : la desintegración del Te^{132} produce I^{132} . Por cada megavatio térmico de potencia del reactor se generan 38 ki-

locorios de I^{132} . El Te^{132} liberado como consecuencia de un accidente en el reactor producirá también I^{132} fuera de éste según la reacción siguiente:



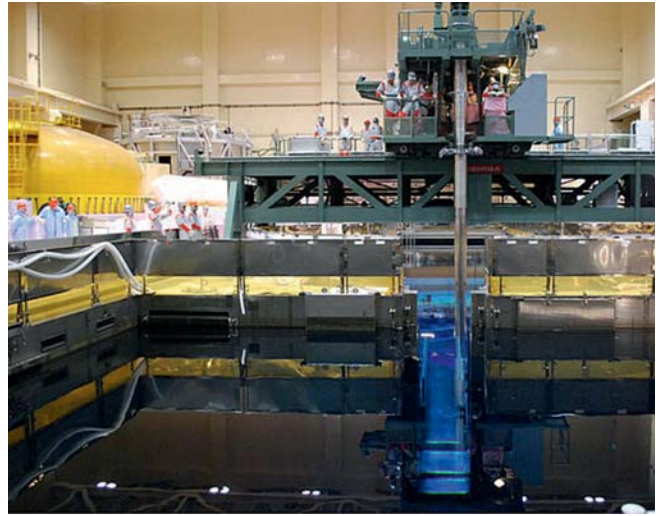
Su semivida es de 2,3 horas; se dirige hacia la tiroides y puede producir nódulos en esta glándula.

En el caso más grave de daños en el núcleo asociados a altas temperaturas también se pueden liberar productos de fisión menos volátiles, como Cs^{137} y Sr^{90} .

Cabe destacar que, por lo que respecta a la exposición humana, la semivida

biológica del Cs^{137} es de solo 110 días, mientras que la del Sr^{90} , compuesto que se fija a los huesos, es nada menos que de 18 años, lo cual lo convierte en el aspecto más grave a tener en cuenta. Por otra parte, el Sr^{90} (punto de ebullición = 1.336° C) se considera moderadamente volátil y sólo se libera si se alcanzan temperaturas más elevadas en un posible accidente, de manera que se emite menos cantidad de este isótopo que del enormemente volátil Cs^{137} (punto de ebullición = 670° C). En las pruebas nucleares atmosféricas se liberan totalmente ambos isótopos. La emisión de Cs^{137} sobre una región del océano daría lugar a

EL TERREMOTO DESENCADENÓ UNA PARADA SEGURA DE LAS TRES REACCIONES DE FISIÓN EN CADENA EN LOS REACTORES QUE ESTABAN FUNCIONANDO EN ESE MOMENTO EN LA CENTRAL NUCLEAR

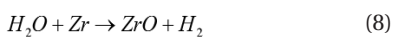


Piscinas de combustible gastado (arriba) mostrando un elemento combustible a su paso por la compuerta situada entre la piscina y la parte superior del reactor. El objeto de color amarillo es la cúpula del núcleo retirada.

la formación de hidróxido de cesio (CsOH) y a su dilución inocua en el inmenso volumen de agua oceánica.

Explosiones de hidrógeno

Si el sistema de refrigeración permanece inactivo durante muchas horas, el agua podría hervir y evaporarse, la vaina se oxidaría y el combustible comenzaría a fundirse. En la interacción con la vaina se puede formar hidrógeno a partir del vapor y del circonio metálico:



Sin evacuación o sin controlar la combustión del hidrógeno generado en las centrales equipadas con recombinadores de hidrógeno, se puede producir un pulso de presión como consecuencia de la interacción del hidrógeno con el oxígeno en la atmósfera de la contención:



De hecho, en el accidente ocurrido en la Isla de las Tres Millas se comunicó un posible pulso de presión de hidrógeno, pero no causó daños tan significativos

en el sistema de contención como los observados en el accidente de Fukushima. Una tonelada de Zr puede interactuar con 360 kg de agua para generar 40 kg de gas H_2 . Cada metro lineal de las vainas de las barras de combustible contiene unas 15,4 toneladas de Zr.

Al evaporarse de repente, el agua se expande hasta alcanzar un gran volumen. Una situación frecuente es cuando se produce una explosión repentina de vapor al abrir inadvertidamente la tapa del radiador de un vehículo cuando el agua se halla bajo presión. Cuando el agua presurizada detecta una presión atmosférica más baja que la existente dentro del radiador y alcanza su presión de saturación, provoca una explosión de vapor y se pierde el refrigerante del radiador. Otra situación habitual es la expansión explosiva del agua que se encuentra en el interior de los granos de maíz, gracias a la cual se producen las palomitas.

Se han observado explosiones de vapor en la industria siderúrgica al enfriar rápidamente lingotes de acero fundido con agua. El enfriamiento repentino da lugar a la desintegración del acero fundido, con una gran zona de transferencia de calor que evapora el agua y produce una expansión explosiva del vapor.

Otros episodios similares serían las explosiones de polvo surgidas al cargar los elevadores de grano en el Medio Oeste estadounidense. Al depositar el grano en los fosos de almacenamiento se emiten grandes cantidades de polvo. Debido a su extensa superficie, el polvo puede prenderse, por ejemplo, al saltar una chispa de un motor en marcha o por un cigarrillo encendido, causando una deflagración e importantes daños.

Otra situación posible es que el núcleo se funda con el corio fundido infiltrado a través de la vasija del reactor de acero y se incruste en la losa de sustentación de hormigón del reactor. Si el diseño es defectuoso, como en el caso del RBMK-1000, de manera que el agua de la piscina supresora de presión se halla directamente debajo del núcleo del reactor, se puede producir una explosión de vapor como en el accidente de Chernóbil. Cabe destacar que en el diseño Mark I de BWR de GE, la piscina supresora de presión se halla en un nivel inferior al del núcleo, pero no directamente debajo de éste, lo que evita que se produzca una explosión de vapor grave. Sin embargo, una despresurización repentina también puede dar lugar a una transformación brusca del agua presurizada

en vapor y a una expansión explosiva con pérdida asociada del refrigerante existente para enfriar el núcleo.

A consecuencia de la explosión, fragmentos o partículas de combustible nuclear procedentes de las piscinas de combustible gastado situadas encima de los reactores fueron proyectadas «hasta 1,5 km de distancia de las unidades», y, según parece, fragmentos de material altamente radiactivo cayeron entre dos unidades (supuestamente la 3 y la 4), y fue necesario retirarlos con una excavadora para proteger a los trabajadores de la central. La eyección de fragmentos de combustible de la unidad 3 sería un acontecimiento más grave que una explosión de hidrógeno por tratarse de una excursión de criticidad y de una explosión de vapor asociada a una fusión del núcleo.

Se ha sugerido que un emplazamiento más lógico para la piscina supresora de presión sería encima del núcleo del

reactor, lo cual evitaría dicha eventualidad y tendría la ventaja de proporcionar al núcleo refrigeración por convección debido a la circulación natural pasiva, tras igualar la presión existente entre el núcleo y la piscina supresora de presión, sin necesidad de proporcionar un bombeo activo que requiera suministro eléctrico. También sería importante eliminar la posibilidad de que exista contacto entre el corio fundido y el agua para evitar una posible explosión de vapor.

Fuga antes de rotura, fuga de la vasija o penetración de material fundido

Richard Lahey, responsable principal de las investigaciones sobre seguridad de los reactores de agua en ebullición de General Electric Company, apuntó que al menos parte del corio que contenía

barras de combustible y vainas de zircaloy fundidas podría haberse hundido y traspasado la tapa inferior de acero de la vasija de presión en la unidad 2, y que al menos parte de él se encuentra sobre el suelo del pozo seco.

Cuando el combustible fundido se filtra por una vasija de contención, el principal problema es que reacciona con el suelo de hormigón del pozo seco que se encuentra debajo, emitiendo gases como CO, CO₂, H₂ y vapor hacia las zonas circundantes. En la unidad 2 de Fukushima, el pozo seco se había inundado de agua de mar, capaz de refrigerar el combustible fundido que escapara del reactor. El corio no saldría como una masa compacta, sino que se filtraría como la lava, lo cual es deseable, ya que resulta más fácil de enfriar.

El pozo seco está rodeado por una estructura secundaria de acero y hormigón diseñada para evitar emisiones de material radiactivo al entorno. Sin embargo, una explosión anterior de hidrógeno en el reactor puede haberlo deteriorado.

El motivo por el que se ha apuntado esta posibilidad es que se ha detectado fuera de la zona de contención agua muy radiactiva que solo puede provenir del núcleo del reactor. La tasa de dosis efectiva comunicada el 25 de marzo de 2011 en una piscina de agua de la sala de turbinas de la unidad 3 fue de 20 cSv/hora o de 20 rem/hora de radiación gamma. Según los niveles de dosis máxima efectiva al año de 5 rems que establecen las normas laborales estadounidenses, los trabajadores que realizaron las tareas de emergencia podrían permanecer en la zona durante $(5 \times 60) / 20 = 15$ minutos.

La dosis de radiación efectiva en el suelo fuera de las estructuras del reactor es significativamente más baja, ya que se ha comunicado que es de 0,2 cSv/hora o de 0,2 rem/hora. Es incluso más baja en las comunidades próximas, como en



La explosión de gran intensidad que expulsó en vertical hidrógeno o posiblemente vapor en el BWR de la unidad 3 de Fukushima Daiichi el 14 de marzo de 2011 fue seguida de un incendio y de posibles daños en el combustible del reactor. En la fotografía se observa cómo se proyectan verticalmente y después caen escombros pesados, entre los que posiblemente se encuentren la tapa del blindaje de hormigón o fragmentos de la grúa. No se puede inferir la existencia de daños en la vasija de presión del reactor debido a la ausencia de la tapa superior de éste entre el material eyectado. Fuente: NTV / NNN Japón.

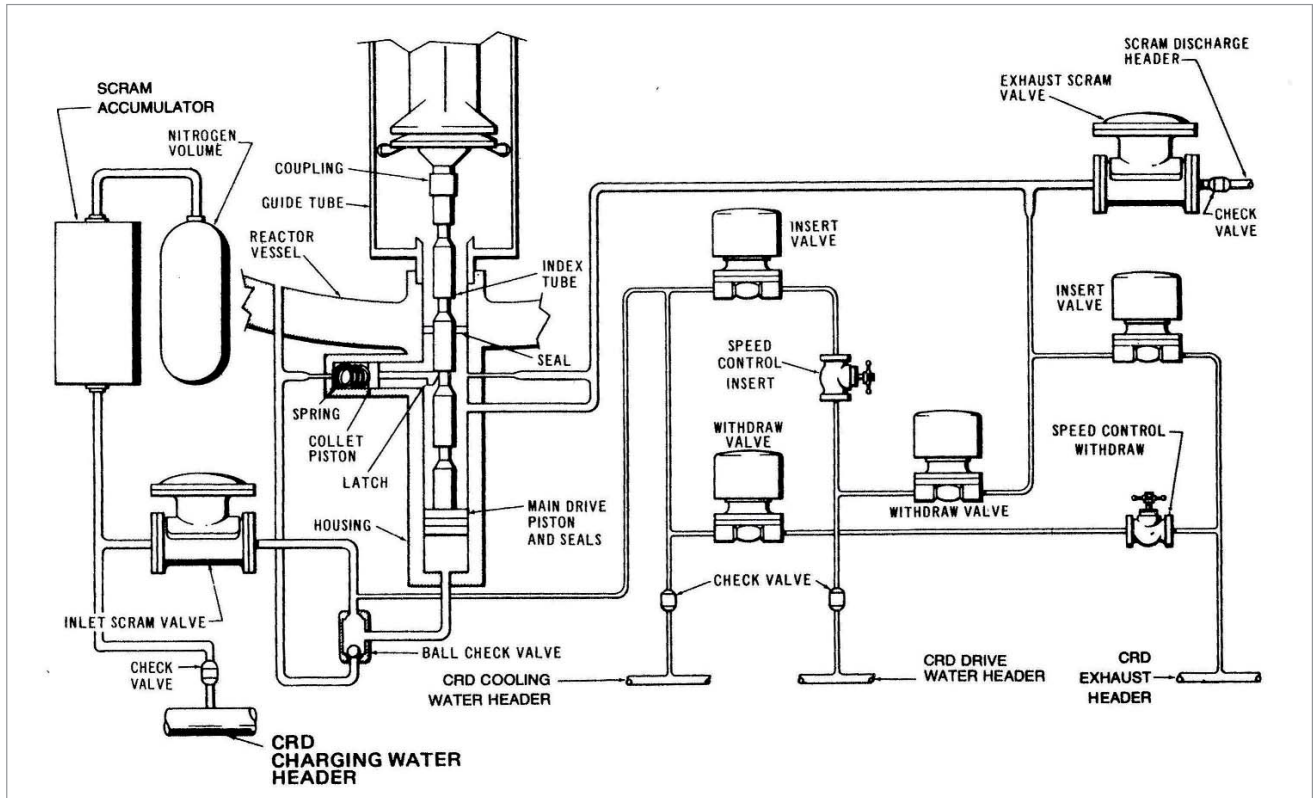


Figura 5. Mecanismo de accionamiento de las barras de control de un BWR en el fondo de una vasija de reactor BWR mostrando la ubicación de las juntas de estanqueidad [2].

el pueblo de Iitate, situado a 40 km al noroeste de la central, que presentaba 0,0013 cSv/hora o rem/hora, mientras que en la ciudad de Fukushima, que se encuentra a 61 km al noroeste de la central, era de 0,0008 cSv/hora o rem/hora.

Según el principio de la «fuga antes de rotura» en el análisis de accidentes, se ha aventurado otra explicación al suceso como posiblemente relacionado con una fuga a través de las juntas de estanqueidad de las barras de control situadas al fondo de la vasija del reactor. En los reactores de agua en ebullición, las barras de control se introducen desde debajo del núcleo. Están equipadas con una junta de grafito que cubre el punto de penetración de cada barra de control y que impide el paso de agua de refrigeración primaria. A temperaturas superiores a los 175° C comen-

zarían a deteriorarse las propiedades mecánicas de las juntas de grafito.

Se ha señalado que estas juntas pueden haberse deteriorado por las elevadas temperaturas alcanzadas como consecuencia de la acumulación de residuos de las barras de combustible deterioradas en el fondo de la vasija del reactor. Si fallan las juntas de estanqueidad de grafito, el agua del reactor puede filtrarse hacia la red de conducciones de las estructuras de contención y a los edificios auxiliares asociados al reactor.

Medidas para mitigar el accidente

Inicialmente se evacuó a unos 3.000 habitantes situados en un radio de 3 km

de la central nuclear Fukushima Daiichi, propiedad de Tokyo Electric Power (Tepco). A los residentes –en mayor número– situados en un radio de 10 km se les indicó al principio que permanecieran en sus hogares. El riesgo potencial de los accidentes producidos como consecuencia del pánico al conducir durante la evacuación por la red de carreteras sería mayor que el riesgo de irradiación corporal total por exposición a los productos de fisión gaseosos emitidos en el interior de los edificios. Posteriormente se emprendió la evacuación de los 45.000-51.000 habitantes que había en ese radio de 10 km. Más tarde se ampliaría con acierto el radio de evacuación a 20 km, lo cual afectó a 170.000 residentes.

Tokyo Electric Power evacuó vapor de las centrales para aliviar la presión de la

estructura de contención del reactor y expulsar el hidrógeno acumulado potencialmente reactivo resultante de la oxidación de las vainas de combustible y de su deterioro.

El viento que soplaba en dirección hacia el océano haría que los productos gaseosos de fisión emitidos se desintegraran, se diluyeran y se disiparan de forma inocua sobre el océano Pacífico. La composición de los productos de fisión emitidos depende de la temperatura alcanzada por el combustible dañado. Al parecer, hubo emisiones de Cs^{137} , pero no se han comunicado mediciones sobre la liberación de $\text{Sr}90$, isótopo menos volátil. Si el sistema de ventilación de la contención funciona, el aire evacuado se envía hacia filtros de aire de alta eficacia para partículas (HEPA) y lechos de adsorción de gases de

carbón activo, reduciendo las emisiones de productos de fisión en un factor de 100-1.000.

Emisión de radionúclidos

Unos vehículos de vigilancia obtuvieron muestras del aire y midieron la densidad de la actividad de los radionúclidos peligrosos en la entrada occidental de la central de Fukushima Daiichi. Las muestras se analizaron en la central de Fukushima Daini mediante un contador de germanio de estado sólido durante un periodo de 500 s. Los niveles de yodo¹³¹ llegaron solo al 45% del nivel de densidad de la radiactividad legalmente establecido para los trabajadores que intervienen en tareas asociadas con la radiación.

En muestras de agua de mar se han detectado densidades mayores de radiactividad midiendo 500 ml durante 1.000 segundos con un detector de germanio de estado sólido. La mayoría son isótopos de vida corta, salvo el Cs^{134} , cuya semivida es de dos años, y el Cs^{137} , con una semivida de 30,17 años.

La ley japonesa sobre higiene alimentaria estipula unos «índices relacionados con los límites de ingestión en los alimentos y en la bebida» establecidos por la Comisión de Seguridad Nuclear de Japón. No se pueden utilizar materiales que superen una radiactividad específica de 100 Bq/kg en la leche destinada a la fabricación de leche en polvo para bebés ni para el consumo directo por parte de niños pequeños. Se retiraron del mercado espinacas y leche contaminadas.

Tabla 1. Análisis de los núclidos presentes en el aire en la entrada occidental de Fukushima Daiichi el 27 de marzo de 2011. Datos: Tepco.

	Núclido	Densidad de radiactividad [Bq/cm ³]	Límite de detección [Bq/cm ³]	Límite legal medio de densidad de radiactividad durante tres meses presente en el aire para trabajadores que participan en tareas asociadas a la radiación [Bq/cm ³]	Índice de densidad de radiactividad
Volátiles	Co^{58}	–	–	$1,0 \times 10^{-2}$	–
	I^{131}	$4,5 \times 10^{-4}$	$8,2 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-3}$	0,4500
	I^{132}	$1,8 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-2}$	0,0026
	I^{133}	–	–	$5,0 \times 10^{-3}$	–
	Cs^{134}	$1,2 \times 10^{-5}$	$6,4 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-3}$	0,0060
	Cs^{136}	–	–	$1,0 \times 10^{-2}$	–
	Cs^{137}	$1,4 \times 10^{-5}$	$6,2 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-3}$	0,0047
Partículas	Co^{58}	–	–	$1,0 \times 10^{-2}$	–
	I^{131}	$2,1 \times 10^{-4}$	$9,5 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-3}$	0,2100
	I^{132}	–	–	$7,0 \times 10^{-2}$	–
	Cs^{134}	$1,6 \times 10^{-5}$	$8,8 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-3}$	0,0080
	Cs^{136}	–	–	$1,0 \times 10^{-2}$	–
	Cs^{136}	$1,4 \times 10^{-5}$	$9,5 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-3}$	0,0047
Otros núclidos detectados	Te^{129}	$2,6 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$4,0 \times 10^{-1}$	0,0650
	Te^{129m}	$1,9 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-3}$	0,0475
	Te^{132}	$1,2 \times 10^{-4}$	$5,7 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-3}$	0,0171

Tabla 2. Análisis de los núclidos presentes en el agua de mar de Fukushima Daiichi, 30 m al norte del canal de descarga de las unidades 5 y 6 el 29 de marzo de 2011. Datos: Tepco.

Núclido	Semivida	Densidad de radiactividad [Bq/cm ³]	Límite de detección [Bq/cm ³]	Límite legal medio de densidad de radiactividad durante tres meses presente en el aire para trabajadores que participan en tareas asociadas a la radiación [Bq/cm ³]	Índice de densidad de radiactividad
I ¹³¹	8,041 d	2,7 x 10 ⁻¹	4,2 x 10 ⁻²	4,0 x 10 ⁻²	665,8
Cs ¹³⁴	2,062 a	5,6 x 10 ⁻⁰	3,2 x 10 ⁻²	6,0 x 10 ⁻²	93,8
Cs ¹³⁶	13,10 d	5,6 x 10 ⁻¹	3,2 x 10 ⁻²	3,0 x 10 ⁻¹	1,9
Cs ¹³⁷	30,17 a	5,7x 10 ⁻⁰	2,8 x 10 ⁻²	9,0 x 10 ⁻²	63,5
Ba ¹⁴⁰	12,79 d	8,8 x 10 ⁻¹	1,2 x 10 ⁻¹	3,0 x 10 ⁻¹	2,9
La ¹⁴⁰	40,23 h	3,7 x 10 ⁻¹	8,5 x 10 ⁻³	4,0 x 10 ⁻¹	0,9

Consecuencias

Esta combinación sin precedentes de terremoto y tsunami acabó con la vida de unas 28.000 personas y destruyó o causó daños en 20.820 estructuras. Millones de personas quedaron sin cobijo, agua o fuentes de calor. Las autoridades distribuyeron 230.000 unidades de yodo estable en los centros de evacuación de los alrededores de las centrales nucleares de Fukushima Daiichi y Daini. La ingestión de yodo estable puede ayudar a prevenir la acumulación de yodo¹³¹ radiactivo en la glándula tiroides.

Un trabajador resultó herido grave al quedar atrapado en la consola de control de la grúa de la chimenea de escape de la unidad 1 de Fukushima Daiichi, y, según se comunicó, dos empleados de Tepco dados por desaparecidos fueron hallados ahogados en la sala de turbinas inundada de la central. Cuatro trabajadores resultaron heridos por la explosión de hidrógeno, un contratista fue hallado inconsciente y trasladado al hospital, y dos trabajadores de una empresa colaboradora resultaron heridos y han sido hospitalizados, uno de ellos con una fractura ósea. En la unidad 3 de Fukus-

hima Daini un trabajador recibió una dosis efectiva de 10,6 cSv o rem. Es probable que se detecten otros casos de exposición a radiación.

Repercusiones

Mediante la acertada provisión de refrigeración complementaria se evitó una posible fusión total del núcleo en la que el corio fundido podría haberse abierto paso a través de la vasija de presión. El uso de fuentes de refrigeración alternativas en las instalaciones afectadas debería mejorar la situación día a día.

Sin embargo, pueden haberse producido daños significativos. Con el tiempo irá remitiendo la generación de calor a medida que el combustible deteriorado se vaya dispersando en el agua de refrigeración, se colapse y forme un lecho de residuos, se queme y quede privado del exceso de agua para alcanzar

una configuración crítica. Dicha configuración requiere una proporción óptima entre combustible y moderador y entre superficie y volumen, así como la ausencia de elementos absorbentes de neutrones.

Los lechos de residuos que ahora se sospecha que existen en los reactores dañados y el combustible deteriorado de las piscinas de almacenamiento con el tiempo se irán parando hasta llegar al estado que alcanzaron los reactores naturales de Oklo, que se apagaron por sí solos al quedar privados de la acción moderadora del agua debido al movimiento terrestre.

Al principio, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) asignó al accidente el nivel 4 de 7 en la escala internacional de accidentes nucleares, para después elevarlo al nivel 5 de «accidente con consecuencias de mayor alcance». A los incidentes de Windscale y de la Isla de las Tres Millas se les asignó un nivel 5, y al de Chernóbil el 7. Una

EL ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA ASIGNÓ INICIALMENTE AL SINIESTRO UN NIVEL 4 DE UN TOTAL DE 7, PARA DESPUÉS ELEVARLO AL NIVEL 5 DE «ACCIDENTE CON CONSECUENCIAS DE MAYOR ALCANCE»

característica única de este accidente ha sido la sucesión de fallos en cascada y la afectación de varias unidades.

El accidente de Fukushima provocó daños en el combustible y emisiones de productos de fisión, como I^{131} e I^{132} , algo que no sucedió en el de la Isla de las Tres Millas. Sus consecuencias parecen más graves que las de este último accidente. Por este motivo, las autoridades francesas lo han considerado extraoficialmente de nivel 6.

El 12 de abril de 2011, la Agencia de Seguridad Nuclear e Industrial de Japón (NISA) elevó la clasificación del accidente al nivel 7. La Escala Internacional de Accidentes Nucleares y Radiológicos (en inglés, INES) oscila del nivel 0 al 7, siendo este último el correspondiente a un accidente grave.

La radiación normal de fondo de la tasa de dosis absorbida procedente de las

radiaciones cósmicas y terrestres se halla en torno a los 80 nGy/hora. En algunas ciudades de los alrededores se registraron lecturas de tasas de dosis entre 1.213 y 3.024 nSy/hora. En comparación, una radiografía abdominal se asocia a una dosis absorbida efectiva (no tasa de dosis) de 1 mSv o de 1.000 nSv.

La tasa de dosis equivalente de radiación se ha estabilizado en 0,05 cSv/hora o 0,05 rem/hora en la central. Hay que tener en cuenta que, en el caso de los rayos gamma, el factor de calidad de la radiación $Q = 1$ y, por tanto, la unidad Gray (Gy) de dosis absorbida y la unidad Sievert (Sv) de dosis efectiva se convierten en equivalentes. Nótese también que $1 \text{ cSv} = 1 \text{ rem}$.

Se ha comunicado que algunos trabajadores se han visto expuestos a una dosis efectiva o equivalente de 100 mSv, 10 cSv o 10 rem. La tasa de dosis ocupacio-

nal máxima permitida en Estados Unidos es de 5 rem / (año.persona) o un promedio de 2 rem/año a lo largo de un periodo de cinco años. La tasa equivalente de dosis máxima permitida para los individuos en la población en general es de 170 mrem / (año.persona), en comparación con la de la radiación natural de fondo, que es de alrededor de 220 mrem / (año.persona).

Poco después del accidente, el Ministerio de Sanidad de Japón elevó temporalmente el nivel máximo de radiación al que podían estar expuestos los trabajadores con seguridad desde 10 cSv/año o rem/año hasta 25 cSv o rem/año para que pudieran pasar más tiempo en las zonas contaminadas.

A fecha de 1 de abril de 2011, la NISA declaró que 21 trabajadores habían quedado expuestos a niveles de radiación superiores a 10 cSv o rem, aunque las

Tabla 3. Niveles de la escala INES asignados a algunos incidentes nucleares.

Nivel INES	Incidente	Descripción
1	Mihama (Japón), 2004	Fuga de agua caliente y vapor de una tubería rota sin emisión de radiación. Cinco muertos y 7 heridos.
4	Tokaimura (Japón), 1999	Planta de reciclaje de combustible nuclear. Los trabajadores mezclan en los recipientes cantidades de material mayores de lo indicado, quebrantando las normas de seguridad. Se produjo un accidente de criticidad. Dos fallecidos entre los trabajadores. Cuarenta trabajadores heridos tuvieron que recibir tratamiento.
5	Isla de las Tres Millas (Estados Unidos), 1986	Accidente con pérdida de refrigerante por rotura pequeña en la unidad 2. Daños en el combustible y en el núcleo. Emisión leve de radiactividad. Sin víctimas. La unidad 1 sigue en funcionamiento.
5	Windscale, Sellafield (Reino Unido), 1957	Incendio en el núcleo de grafito del reactor. Emisión de radiactividad. Restricción de la venta de leche durante un mes. El reactor se enterró en hormigón. Descontaminación de la zona. Construcción de reactores nuevos en el mismo lugar.
6	Mayak, Kyshtym, Chelyabinsk, (URSS), 1957	Fallo en el sistema de refrigeración. Explosión química en el depósito de residuos. Emisión de 70-80 toneladas de material radiactivo. Contaminación de los alrededores.
7	Chernóbil (Ucrania), 1986	Criticidad en el núcleo, incendio en el núcleo de grafito, explosión de vapor en uno de los cuatro reactores. El incendio se prolonga durante nueve días. Fallecieron dos personas a causa de la explosión de vapor y otros 47 miembros del equipo inicial de emergencia por exposición a la radiación. Escape de radiactividad.
7	Fukushima (Japón), 2011	Apagón total causado por un terremoto y un tsunami. Explosiones de hidrógeno y posiblemente de vapor, incendios y daños en el combustible. Cuatro de las seis unidades de la central serán desmanteladas. Escape de radiactividad.

pruebas realizadas mostraron que ninguno de ellos había estado expuesto a una radiación suficientemente elevada como para perjudicar a su salud.

Se calcula que alrededor de 28.000 personas han muerto o desaparecido como consecuencia del terremoto y del tsunami. Más de 166.200 viven en refugios en lugares elevados por encima de las extensas llanuras de escombros cubiertos de barro.

El coste de los daños ocasionados asciende a unos 300.000 millones de euros, lo que convierte a esta catástrofe natural en la más costosa de la historia, seguida por el terremoto que tuvo lugar en 1995 en Kobe (Japón), que costó 70.000 millones de euros, y el huracán Katrina, que en 2005 causó en Estados Unidos 56 millones de euros en pérdidas.

Conclusiones

■ La acertada aplicación de refrigeración complementaria evitó una posible fusión total del núcleo en la que el corio fundido podría haberse abierto paso por la vasija de presión.

■ Como consecuencia de otro accidente anterior causado también por un terremoto en la central Kashiwasaki-Kariwa de Tepco en julio de 2007, se ha hecho hincapié en proteger los componentes de los reactores frente a movimientos sísmicos. La central se paró de inmediato y se refrigeró adecuadamente a pesar de haberse producido una fuga de agua con una cantidad menor de material radiactivo que se emitió al océano sin perjudicar a las personas ni al entorno.

■ En el nivel del suelo de la unidad 1 de Fukushima se obtuvieron niveles de tasa de dosis efectiva de 100-200 cSv/hora o rem/hora. Dado que el límite máximo de dosis efectiva ocupacional es en Japón de 25 cSv / (persona.año) o rem /



El terremoto y el tsunami que afectó a la costa japonesa en marzo, con 28.000 muertos o desaparecidos, está considerado como la catástrofe natural económicamente más costosa de la historia.

(persona.año), esto restringe el tiempo de exposición máxima en estas zonas a 4-5 horas, lo que suponía un obstáculo para las labores de recuperación y requirió el uso de sistemas robóticos.

■ Cerca del 20% de los reactores nucleares del mundo se encuentran en las proximidades de zonas tectónicamente activas. Está previsto llevar a cabo una profunda revisión de la construcción de nuevas centrales nucleares en zonas activas desde el punto de vista tectónico alrededor del Cinturón de Fuego del Pacífico y en Oriente Próximo en cuanto a la necesaria implantación en ellas de medidas de seguridad pasivas en lugar de activas como las que existen en los diseños que se están estudiando en la actualidad.

Es probable que durante algunos años se produzca un interés renovado por el

desarrollo de fuentes de energía renovables eólicas, solares, geotérmicas, mareomotrices y bioenergéticas. Se buscarán intensivamente soluciones para el almacenamiento de energía con el fin de subsanar los problemas que plantea el carácter intermitente de las fuentes de energía eólica y solar. Esto incluiría el uso de hidrógeno como medio de transporte energético, así como técnicas de almacenamiento mediante sistemas térmicos, volantes de inercia, acumulación por bombeo, baterías y otros. Mientras tanto, la inevitabilidad y la necesidad de que la energía nuclear esté presente dentro de la combinación energética irá adquiriendo un reconocimiento cada vez mayor para la generación de carga de base que sustituya a los combustibles fósiles que se están agotando



y sus emisiones de carbono. El enfoque bioenergético puede desencadenar una mayor adquisición de terrenos y de recursos hídricos por parte de los países ricos en capital. Ya se han adquirido cerca de 56 millones de hectáreas de terreno con potencial agrícola en regiones de Sudán y Etiopía para la producción de alimentos y combustible. Se prevé una intensificación del debate acerca de los alimentos frente a la energía, con el surgimiento de posibles conflictos relacionados con los derechos históricos sobre el agua, como sucede en la cuenca del Nilo.

■ El hidrógeno producido al deteriorarse el combustible de la unidad 3 circuló por una tubería de tratamiento de gases hacia la unidad 4 pasando por válvulas dañadas, se filtró por las conduc-

ciones de las plantas 2, 3 y 4 y causó un incendio y una explosión en una unidad que ya se encontraba parada. Este error de diseño dio lugar a una serie de fallos en cascada que deben evitarse en los diseños futuros.

■ Es posible que en todo el mundo haya perdido interés la necesidad de sustituir las centrales nucleares que van quedando obsoletas por tecnologías inherentemente pasivas y seguras más novedosas como consecuencia de las presiones económicas para prolongar la vida de las centrales existentes. Puesta en marcha el 26 de marzo de 1971, la unidad BWR 1 de Fukushima tenía una antigüedad de 40 años, es decir, se hallaba al final del periodo de uso previsto en su diseño inicial. En Estados Unidos, las centrales nucleares suelen recibir una licencia de explotación de 20 años con una ampliación incorporada de otros 20, hasta llegar a un total de 40 años si se considera que su nivel de seguridad es favorable. El reactor de la unidad 1 afectada iba a ser desmantelado en febrero de 2011, pero se amplió su licencia para otros 10 años, habiendo superado su periodo de explotación inicial de 40 años tras ser sometido a una revisión de seguridad y a diversas actualizaciones. En Estados Unidos, las licencias para la explotación de centrales se están ampliando 20 años más con respecto a los 40 iniciales, hasta alcanzar los 60 tras una revisión minuciosa de su nivel operativo de seguridad. La mayoría de sus componentes, como los generadores de vapor, se han sustituido o renovado de acuerdo con estas ampliaciones de la licencia, excepto las vasijas de presión.

El proyecto de incrementar la proporción de electricidad de origen nuclear en Japón de un 30 a un 50% se enfrenta a importantes obstáculos. Probablemente se acabe redirigiendo el interés hacia la sustitución de las centrales actuales obsoletas por otras de nuevo diseño que aprovechen los conocimientos acumulados y las tecnologías y diseños avanzados de seguridad pasiva e inherente.

En los modelos más recientes se ha tenido en cuenta e implantado la necesidad de utilizar diseños de refrigeración pasiva. En los modelos ABWR y ESBWR se ha aprovechado el principio del tiro de chimenea, y el ESBWR depende únicamente de una refrigeración por convección originada por circulación natural.

Aún no está claro cuál ha sido el papel del sistema de rociado del núcleo en el accidente de Fukushima. El periodo de activación del sistema de rociado del núcleo requiere un nuevo análisis teórico y experimental. Está claro que el sistema de rociado del núcleo enfriaría los elementos combustibles en caso de descubrimiento del núcleo si su temperatura no ha llegado a un nivel crítico. Pero por encima de cierto nivel de temperatura, el rociado de las vainas calientes generaría vapor, con posible oxidación de las vainas y producción de hidrógeno. Si inicialmente la fuente de agua está relativamente fría con respecto al depósito de almacenamiento del condensado, también cabe esperar que se produzcan tensiones térmicas capaces de provocar daños en las vainas.

Dado que se ha establecido que la inundación de los equipos de bombeo de la sala de turbinas y de otros sótanos de los edificios a causa del tsunami ha sido un

EL 20% DE LOS REACTORES NUCLEARES DEL MUNDO SE UBICAN CERCA DE ZONAS TECTÓNICAMENTE ACTIVAS. PRÓXIMAMENTE SE REVISARÁ LA CONSTRUCCIÓN DE NUEVAS CENTRALES EN ESTE TIPO DE ZONAS

factor que ha contribuido a la secuencia de acontecimientos del accidente, esta situación deberá tenerse en cuenta a la hora de realizar planes de emergencia para los reactores situados en la costa y en el interior que puedan ser susceptibles de experimentar otros tipos de inundaciones, como por ejemplo, las cuencas de los ríos Ohio y Misisipi en Estados Unidos.

Los análisis de seguridad determinista y probabilísticos de los posibles accidentes en el reactor se complementan entre sí. En el análisis determinista de la seguridad, es necesario hacer hincapié en la magnitud máxima histórica de los terremotos o de la altura de las olas en los tsunamis, tal como se hizo en el emplazamiento de los reactores de Fukushima. El análisis probabilístico de terremotos o de tsunamis de distintas magnitudes tal vez no se lleve a cabo en Japón con tanta profundidad como en Estados Unidos.

Cantidades minúsculas de los productos de fisión I^{131} y Xe^{133} han circulado por el planeta y fueron detectados el 27 de marzo de 2011 en Nevada (Estados Unidos) sin que supusieran un riesgo destacado para la salud.

Los terremotos son una forma de vida en Japón, ya que, por término medio, se produce uno cada cinco minutos. Las estructuras se construyen para resistir movimientos telúricos. Se ha reconocido que la cifra de víctimas, cercana a las 28.000, se debió a una trágica combinación de los efectos del terremoto y del tsunami, y son claramente ajenos al accidente del reactor. Podría argumentarse que el accidente sucedido en Fukushima Daiichi, al haber sido causado por un terremoto y un tsunami, fue un accidente «superior al de base de diseño». De hecho, un alto cargo de Tepco lo calificó de *sotegai*, «fuera de nuestra imaginación».

Richard K. Lester, del MIT, ha señalado que en este año 2011 se cumple el centenario del descubrimiento del núcleo atómico: «En términos históricos, esto sitúa actualmente al campo de la ingeniería nuclear prácticamente en el mismo sitio donde se hallaba la ingeniería eléctrica en 1900. Un ingeniero eléctrico en 1900 no podía haber previsto la creación de la red eléctrica, la televisión y las telecomunicaciones. Igualmente, nadie puede en la actuali-

dad prever el futuro de la tecnología relacionada con la energía nuclear. Lo único que podemos asegurar con certeza ahora mismo es que las centrales nucleares del año 2100 se asemejarán mucho a las actuales: el mismo parecido que entre un coche moderno y el modelo T de 1911. Continuamente surgen nuevos materiales y sistemas para que la tecnología nuclear sea más segura. Nunca ha sido mayor que ahora la necesidad de vitalidad, flexibilidad y creatividad intelectuales».

Historicamente, entre otras causas naturales y creadas por el hombre, este incidente ha puesto a prueba el valor, la perseverancia, la resistencia y la tenacidad de los 127 millones de personas que habitan Japón, que ante la adversidad siempre han sabido recuperarse, reconstruir y prosperar. ♦

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer enormemente los comentarios y las revisiones realizadas por mis alumnos, mis colegas y por la Dra. Madeline Feltus, de la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC, por sus siglas en inglés) acerca de las versiones anteriores del original.

PARA SABER MÁS

- [1] McCormick, Norman J., «Reliability and risk analysis, methods and nuclear power applications», Academic Press, 1981.
- [2] Lahey, R. T., Jr. y Moody, F. J., «The thermal-hydraulics of a boiling water nuclear reactor», ANS/AEC Monograph Series on Nuclear Science and Technology, The Division of Technical Information, United States Energy Research and Development Administration, American Nuclear Society, 1977.
- [3] Ragheb, M., Uluoyol, O., Jones, B. J., (Univ. de Illinois), Ho, S. A. y Endicott, R., (PSE&G, Hancocks Bridge), «Station blackout simulation model for a BWR plant», Accident Analysis, Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 62, 11-15 de noviembre de 1990, 362-364.
- [4] Ragheb, M., Ikononopoulos, A., Jones, B. J., Ho, S. A. y Endicott, R., «Best estimate analysis of station-blackout for a PWR plant», Joint Relap5 and Trac-BWR International User Seminar, Idaho National Engineering Laboratory and Commonwealth Edison Company, 17-21 de septiembre de 1990, 117-122.
- [5] Ragheb, M., Ikononopoulos, A., Jones, B. G., (Univ. de Illinois), Ho, S. A., R. Endicott, R., (PSE&G, Hancocks Bridge), «Best-estimate analysis of a small-break loss-of-coolant accident for a PWR plant», Accident Analysis, Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 62, 11-15 de noviembre de 1990, 358-360.
- [6] Ragheb M., Ikononopoulos, A., Jones, B. G., Ho, S. A., Endicott, R., «Best estimate analysis of complete loss of normal feedwater without reactor scram for a PWR plant», «Power Plants Transients», The American Society of Mechanical Engineers, FED-Vol. 104, 25-30 de noviembre de 1990, 117-122.
- [7] Tsoukalas, L., Lee, G. W., Ragheb, M., McDonough, T., Niziolek, F. y Parker, M., «On-line model-based system for nuclear plant monitoring», Applications of Artificial Intelligence VII, Proc. Of SPIE-The International Society of Optical Engineering, Vol. 1095, 1989, 372-380.
- [8] Tokyo Electrical Power Company, Tepco, <http://www.tepco.co.jp/en/index-e.html>, marzo de 2011.
- [9] Ragheb, M., «Boiling water reactors», Nuclear, Plasma and Radiation Science. Inventing the Future, <https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20402%20ME%20405%20Nuclear%20Power%20Engineering%20Boiling%20Water%20Reactors.pdf>, 2011.
- [10] Ragheb, M., «Decay heat generation in fission reactors», Probabilistic, Possibilistic and Deterministic Safety Analysis. Nuclear Applications, <https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20457%20CSE%20462%20Safety%20Analysis%20of%20Nuclear%20Reactor%20Systems/Decay%20Heat%20generation%20in%20Fission%20Reactors.pdf>, 2011.