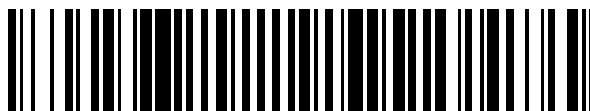


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 402 240**

51 Int. Cl.:

G21C 9/012 (2006.01)

G21C 13/00 (2006.01)

G21C 13/02 (2006.01)

G21C 15/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.11.2008 E 08850515 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.01.2013 EP 2218077**

54 Título: **Vasija de contención sumergida para un reactor nuclear**

30 Prioridad:

15.11.2007 US 941024

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

30.04.2013

73 Titular/es:

THE STATE OF OREGON ACTING BY AND THROUGH THE STATE BOARD OF HIGHER EDUCATION ON BEHALF OF OREGON STATE UNIVERSITY (100.0%)
Oregon State University Office of Technology Transfer, Kerr 312
Corvallis, OR 97331-2140, US

72 Inventor/es:

REYES, JR., JOSE N. y
GROOME, JOHN T.

74 Agente/Representante:

TORNER LASALLE, Elisabet

ES 2 402 240 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Vasija de contención sumergida para un reactor nuclear.

Campo técnico

La presente invención versa acerca de un sistema para eliminar el calor de decaimiento de un reactor nuclear.

5 Antecedentes

10 En la búsqueda por obtener energía barata y fiable, algunos reactores nucleares han sido diseñados con el objetivo de ser operados de forma pasiva. En estos sistemas pasivos puede emplearse las leyes de la física para garantizar que se mantiene la operación segura del reactor nuclear durante la operación normal o incluso en una situación de emergencia sin la intervención o la supervisión de un operario, al menos durante algún periodo predefinido de tiempo. Un objetivo de los sistemas operativos pasivos es minimizar el número de motores, bombas u otros dispositivos eléctricos o mecánicos de los que tradicionalmente se ha dependido para operar el reactor nuclear.

15 Un proyecto de reactor pequeño de agua ligera para aplicaciones múltiples realizado con la colaboración del Laboratorio Nacional de Ingeniería y Medio Ambiente de Idaho, NEXANT y el Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad de Oregón buscaba desarrollar un reactor seguro y económico de agua ligera natural. Los resultados de este proyecto se describen en la monografía técnica "Multi-Application Small Light Water Reactor — Final Report", de S. M. Modro y otros, XP002533314. La Figura 1 ilustra un diseño 20 de reactor nuclear resultado de ese proyecto.

20 El diseño 20 de reactor nuclear incluye un núcleo 6 de reactor rodeado por una vasija 2 de reactor. El agua 10 de la vasija 2 del reactor rodea el núcleo 6 del reactor. El núcleo 6 del reactor está situado, además, en una envuelta 22 del núcleo que rodea el núcleo 6 del reactor en torno a sus lados. Cuando el agua 10 es calentada por el núcleo 6 del reactor como consecuencia de eventos de fisión, el agua 10 se dirige desde la envuelta 22 subiendo hasta el interior de un anillo 23 situado por encima del núcleo 6 del reactor y saliendo de una tubería ascendente 24. Esto da como resultado que se lleve más agua 10 al interior de la envuelta 22 para ser calentada, a su vez, por el núcleo 6 del reactor, que lleva aún más agua 10 al interior de la envuelta 22. El agua 10 que emerge de la tubería ascendente 24 es refrigerada y dirigida hacia el exterior de la vasija 2 del reactor y luego vuelve al fondo de la vasija 2 del reactor mediante circulación natural. En la vasija 2 del reactor se produce vapor 11 a presión cuando el agua 10 se calienta.

25 Un cambiador 35 de calor hace circular agua de alimentación y vapor en un sistema secundario 30 de refrigeración para generar electricidad con una turbina 32 y un generador 34. El agua de alimentación pasa a través del cambiador 35 de calor y se convierte en vapor supercalentado. El sistema secundario 30 de refrigeración incluye un condensador 36 y una bomba 38 de agua de alimentación. El vapor y el agua de alimentación del sistema secundario 30 de refrigeración están aislados del agua 10 de la vasija 2 del reactor, de tal modo que no se les permite mezclarse ni entrar en contacto mutuo.

30 La vasija 2 del reactor está rodeada por una vasija 4 de contención. La vasija 4 de contención está situada en una piscina de agua 16. La piscina de agua 16 y la vasija 4 de contención están bajo tierra 28 en una dársena 26 del reactor. La vasija 4 de contención no permite que escape agua alguna ni vapor de la vasija 2 del reactor a la piscina de agua 16 ni al entorno circundante. En una situación de emergencia, se expulsa vapor 11 de la vasija 2 del reactor a través de la válvula 8 de vapor al interior de una mitad superior 14 de la vasija 4 de contención, y el agua 10 hierve súbitamente al ser liberada a través de una válvula 18 sumergida de purga que está situada en una piscina 12 de supresión. La piscina 12 de supresión incluye agua subenfriada. Por lo tanto, la presurización excesiva de la vasija 2 del reactor se reduce liberando tanto vapor 11 a través de la válvula 8 de vapor como agua 10 a través de la válvula 18 de purga al interior de la vasija 4 de contención. Las tasas de liberación del vapor 11 y el agua 10 al interior de la vasija 4 de contención varían según la presión dentro de la vasija 2 del reactor. El calor de decaimiento se elimina del núcleo 6 del reactor a través de una combinación de la condensación del vapor 11 y la transferencia de energía del agua 10 al agua de la piscina 12 de supresión.

35 El agua de la piscina 12 de supresión proporciona prestaciones de supresión de la presión y de aporte de líquido en caso de una pérdida de refrigerante o de la rotura de una tubería en la vasija 4 de contención. Sin embargo, esto también significa que los componentes eléctricos y mecánicos de la vasija 4 de contención están constantemente sometidos a un entorno corrosivo, que introduce problemas de fiabilidad. El aislamiento que rodea a la vasija 2 del reactor pierde alguna de sus propiedades aislantes cuando está situado en un entorno mojado o húmedo, y puede precisarse su sustitución a intervalos regulares. Pueden usarse materiales caros y exóticos para el aislamiento de la vasija del reactor. Además, debe llevarse a cabo el mantenimiento, la monitorización y la inspección de los componentes eléctricos y mecánicos para garantizar la fiabilidad continuada de su operación.

La presente invención aborda estos y otros problemas.

40 La patente estadounidense nº 3.865.688 da a conocer un diseño de central nuclear con un sistema de contención que evita que el combustible nuclear se caliente en demasía en caso de un accidente de pérdida de refrigerante

5 mediante un sistema de contrapresión de contención elevada y rellenado del reactor. La contención primaria consiste en varias celdas interconectadas, que incluyen una celda de la vasija del reactor, que aloja una vasija de reactor, cuatro celdas de generadores de vapor, cuatro celdas de bombas de refrigerante del reactor, etcétera. El refrigerante primario procedente de la vasija del reactor sale de la vasija del reactor al interior del lado primario de los generadores de vapor situados en las celdas de los generadores de vapor.

La presente invención está definida por las reivindicaciones independientes. Las reivindicaciones dependientes conciernen a características opcionales de algunas realizaciones de la invención.

Breve descripción de los dibujos

10 La FIG. 1 ilustra un sistema de energía nuclear conocido en la técnica.

La FIG. 2 ilustra un conjunto modular de energía novedoso que incluye una vasija de contención internamente seca.

La FIG. 3 ilustra el conjunto modular de energía de la FIG. 2 durante una operación de emergencia.

15 La FIG. 4 ilustra una tasa ejemplar de condensación del vapor liberado dentro de una vasija de contención.

La FIG. 5 ilustra una fluctuación ejemplar de la presión en una vasija de contención durante una incidencia de presurización excesiva.

20 La FIG. 6 ilustra una realización alternativa de un conjunto modular de energía que incluye una vasija de contención que tiene aletas de refrigeración.

La FIG. 7 ilustra una realización de un conjunto modular de energía que incluye múltiples zonas de contención.

25 La FIG. 8 ilustra un procedimiento novedoso de refrigeración de un conjunto modular de energía.

Resumen de la invención

30 En el presente documento se da a conocer un conjunto modular de energía que incluye un núcleo de reactor sumergido en un refrigerante y una vasija de reactor que aloja el refrigerante y el núcleo del reactor. Una vasija de contención seca internamente está sumergida en líquido y rodea sustancialmente la vasija del reactor en un entorno gaseoso. Durante una incidencia de presurización excesiva, la vasija del reactor está configurada para liberar el refrigerante al interior de la vasija de contención y eliminar el calor de decaimiento del núcleo del reactor por medio de la condensación del refrigerante sobre una superficie interna de la vasija de contención.

35 En el presente documento se da a conocer que un módulo del reactor nuclear incluye una vasija de contención diseñada para prohibir una liberación de líquido y una vasija de reactor montada dentro de la vasija de contención, estando expuesta una superficie externa de la vasija del reactor a una situación de presión por debajo de la atmosférica. El módulo del reactor nuclear incluye, además, un núcleo de reactor sumergido en el líquido y un respiradero de vapor conectado a la vasija del reactor, en los que, cuando el núcleo del reactor se calienta en exceso, el respiradero de vapor está configurado para expulsar vapor al interior de la vasija de contención.

40 En el presente documento se da a conocer un procedimiento de refrigeración de un reactor nuclear, incluyendo el procedimiento parar rápidamente el reactor nuclear en caso de una incidencia de presión elevada indicada en la vasija del reactor y liberar de forma controlada refrigerante en una zona de contención situada entre la vasija de contención y la vasija del reactor. La zona de contención rodea la vasija del reactor y está sustancialmente seca antes de la incidencia de presión elevada. El procedimiento incluye, además, condensar el refrigerante sobre una pared interna de la vasija de contención, transferir el calor de decaimiento a un medio líquido que rodea la vasija de contención y mantener la presión en la zona de contención dentro de los límites de diseño mediante la condensación del refrigerante sobre la pared interna.

45 La invención se volverá más inmediatamente evidente a partir de la siguiente descripción detallada de una realización preferente de la invención que procede con referencia a los dibujos adjuntos.

Descripción de realizaciones ejemplares

50 La obtención de los permisos para las instalaciones nucleares convencionales y la edificación de las mismas resultan caras, con una inversión por adelantado de costos significativos y un retorno de beneficios demorado. Además, de consideraciones del costo de la energía, requisitos de eficiencia e inquietudes por la fiabilidad, los diseños actuales de reactores nucleares también tienen que tener en cuenta cuestiones de proliferación nuclear, actividades terroristas y una conciencia aguzada de responsabilidad medioambiental.

55 Los países en vías de desarrollo que, en otra situación, podrían beneficiarse enormemente de la energía nuclear se ven obligados frecuentemente a tener que recurrir a otras fuentes de energía tales como el carbón, el gas o

generadores de energía hidroeléctrica que producen cantidades significativas de contaminación o tienen un impacto medioambiental perjudicial. Estos países en vías de desarrollo pueden no tener los recursos tecnológicos o naturales que les permitan construir una central nuclear. Los países que ya han desarrollado energía nuclear pueden vacilar a la hora de introducir estas tecnologías en países en vías de desarrollo por una preocupación por la pérdida de control de los materiales o la tecnología nucleares.

Los sistemas seguros de energía nuclear contribuyen a abordar algunas de estas inquietudes. Se espera que las mejoras adicionales de los sistemas y los diseños innovadores den lugar a una nueva era de energía nuclear como una fuente primaria de energía viable globalmente.

La Figura 2 ilustra un conjunto modular 50 de energía novedoso que incluye una vasija 54 de contención internamente seca. La vasija 54 de contención tiene forma cilíndrica y tiene extremos superior e inferior esféricos. Todo el conjunto modular 50 de energía puede estar sumergido en una piscina de agua 16 que sirve de disipador efectivo del calor. La vasija 54 de contención puede estar soldada o sellada de otra forma al entorno, de tal modo que líquidos o gas no escapen del conjunto modular 50 de energía ni entren en el mismo. La vasija 54 de contención puede estar soportada por el fondo, soportada por su parte superior o soportada en torno a su centro. Soportar la vasija 54 de contención por la parte superior puede facilitar el mantenimiento y la extracción del conjunto modular 50 de energía de la piscina de agua 16.

En una realización, la vasija 54 de contención está suspendida en la piscina de agua 16 por una o más conexiones 80 de fijación. Las conexiones 80 de fijación pueden estar unidas a la porción superior de la vasija 54 de contención. Las conexiones 80 de fijación pueden ser miembros rígidos o flexibles que contribuyan a situar la vasija 54 de contención aproximadamente en el centro de la piscina de agua 16. Durante episodios de actividad sísmica, como terremotos, la piscina de agua 16 actúa como cojín protector en torno a la vasija 54 de contención para evitar el daño que, si no, podría ocasionarse si la vasija 54 de contención hiciese contacto con la dársena 26 del reactor. Las conexiones flexibles de fijación, tales como cadenas o cables unidos a la pared de la dársena 26 del reactor, pueden reducir una cantidad de vibración o tensión que, de otra forma, podría transferirse a la vasija 54 de contención. En una realización, un conector flexible de amarre está unido al fondo de la vasija 54 de contención para reducir la oscilación o el movimiento lateral. El conjunto modular 50 de energía puede ser dispuesto para que flote en la piscina de agua 16 para minimizar los requisitos de apoyo y proporcionar resistencia sísmica. Puede proporcionarse una base de apoyo en el fondo de la vasija 54 de contención para soportar el conjunto modular 50 de energía en posición vertical.

Dentro de la vasija 54 de contención hay situada o montada una vasija 52 de reactor. Una superficie interna de la vasija 52 del reactor está expuesta a un entorno mojado que incluye un refrigerante 100 o líquido, como el agua, y una superficie externa está expuesta a un entorno seco como el aire. La vasija 52 del reactor puede estar fabricada de acero inoxidable o de acero al carbono, puede incluir un revestimiento metálico, y puede estar soportada dentro de la vasija 54 de contención.

El conjunto modular 50 de energía puede estar dimensionado para que pueda ser transportado en un vagón. Por ejemplo, la vasija 54 de contención puede construirse para que sea de aproximadamente 4,3 metros de diámetro y 17,7 metros de altura (longitud). Sellando completamente la vasija 54 de contención puede restringirse al acceso al núcleo 6 del reactor. Cualquier acceso no autorizado o cualquier manipulación indebida pueden ser monitorizados. Además, el perfil subterráneo de un sistema de energía nuclear lo hace menos visible y más fácil de esconder. La piscina de agua 16 puede ser cubierta con un blindaje protector (no mostrado) para aislar adicionalmente el conjunto modular 50 de energía de amenazas externas u objetos en vuelo, tales como aviones o misiles.

La recarga del núcleo 6 del reactor puede llevarse a cabo transportando todo el conjunto modular 50 de energía en vagón o en barco, por ejemplo, y sustituyéndolo con un conjunto modular de energía nuevo o reacondicionado que tenga un suministro nuevo de varillas de combustible. Las actividades de recarga y mantenimiento pueden llevarse a cabo quitando los pernos a las bridas o cortando las vasijas en la porción cilíndrica a una elevación por encima del núcleo 6 del reactor. La carga puede realizarse una vez cada 2 a 10 años o incluso más, dependiendo del tipo de combustible y de las especificaciones del sistema.

La vasija 54 de contención encapsula y, en algunas situaciones, enfría el núcleo 6 del reactor. Es relativamente pequeña, tiene gran resistencia y puede ser capaz de soportar seis o siete veces la presión de los diseños convencionales de contención debido, en parte, a sus menores dimensiones totales. Dada una rotura en el sistema de refrigeración primaria del conjunto modular 50 de energía, no se libera al entorno ningún producto de fisión. El calor de decaimiento se elimina del conjunto modular 50 de energía en situaciones de emergencia.

El núcleo 6 del reactor se ilustra sumergido o inmerso en un refrigerante primario 100, tal como agua. La vasija 52 del reactor aloja el refrigerante 100 y el núcleo 6 del reactor. Una envuelta 22 rodea el núcleo 6 del reactor en torno a sus lados y sirve para dirigir el refrigerante 100 ascendentemente a través de un anillo 23 y saliendo de una tubería ascendente 24 situada en la mitad superior de la vasija 52 del reactor como consecuencia de la circulación natural del refrigerante 100. En una realización, la vasija 52 del reactor es de aproximadamente 2,7 metros de diámetro e incluye una altura (longitud) total de 13,7 metros. La vasija 52 del reactor puede incluir una forma predominantemente cilíndrica con extremos superior e inferior esféricos. La vasija 52 del reactor está normalmente a

una presión y una temperatura operativas. La vasija 54 de contención está seca internamente y puede operar a la presión atmosférica con temperaturas de las paredes iguales a la temperatura de la piscina de agua 16 o cercanas a la misma.

5 La vasija 54 de contención rodea sustancialmente la vasija 52 del reactor en un entorno seco o gaseoso identificado como zona 44 de contención. La zona 44 de contención puede llenarse de aire. La vasija 54 de contención incluye una superficie interna 55 o pared interna que es adyacente a la zona 44 de contención. La zona 44 de contención puede incluir un gas o gases en lugar del aire o además del mismo. La zona 44 de contención se mantiene en una situación de presión por debajo de la atmosférica, por ejemplo como un vacío parcial. Se extraen el gas o los gases de la vasija de contención, de modo que la vasija 52 del reactor esté situada en un vacío total o parcial en la zona 44 de contención.

10 Durante la operación normal, la energía térmica procedente de los eventos de fisión en el núcleo 6 del reactor hace que el refrigerante 100 se caliente. A medida que el refrigerante 100 se calienta, se vuelve menos denso y tiende a ascender a través del anillo 23 y a salir de la tubería ascendente 24. A medida que el refrigerante 100 se enfría, se vuelve relativamente más denso que el refrigerante calentado y se hace que circule en torno al exterior del anillo 23, bajando hasta el fondo de la vasija 52 del reactor y subiendo a través de la envuelta 22 para volver a ser calentado por el núcleo 6 del reactor. Esta circulación natural hace que el refrigerante 100 realice un ciclo que atraviesa el núcleo 6 del reactor transfiriendo calor a un sistema secundario de refrigeración, tal como el sistema secundario 30 de refrigeración de la FIG. 1, para generar electricidad.

15 Puede mejorarse la circulación natural proporcionando una situación bifásica del refrigerante 100 en la tubería ascendente 24. En una realización, se inyecta gas en o cerca del núcleo 6 del reactor para crear o aumentar la situación bifásica y aumentar el caudal del refrigerante 100 que atraviesa la tubería ascendente 24. Aunque crear huecos en el núcleo 6 del reactor produce una inserción negativa de reactividad, una situación de estado estacionario seguida por una situación sin creación de huecos puede dar como resultado una inserción positiva de reactividad. En una realización, la reactividad se controla adicionalmente mediante una combinación de la gestión de las velocidades de inserción de las varillas de control y los disparos de las varillas de control sensibles a la temperatura.

20 La FIG. 3 ilustra el conjunto modular 50 de energía de la FIG. 2 en una operación de emergencia. La operación de emergencia puede incluir una respuesta, por ejemplo, a un calentamiento excesivo del núcleo 6 del reactor o a una incidencia de presurización excesiva de la vasija 52 del reactor. Durante la operación de emergencia, la vasija 6 del reactor está configurada para liberar el refrigerante 100 al interior de la zona 44 de contención de la vasija 54 de contención, seca si no. El calor de decaimiento del núcleo 6 del reactor se elimina mediante la condensación del refrigerante 100 sobre la superficie interna 55 de la vasija 54 de contención. Aunque la vasija 54 de contención puede estar sumergida en una piscina de agua 16, la superficie interna 55 de la vasija 54 de contención está completamente seca antes de la operación de emergencia o la incidencia de presurización excesiva. Por ejemplo, la piscina 12 de supresión de la FIG. 1 no existe en la vasija 54 de contención durante la operación normal.

30 En la vasija 52 del reactor hay montado un limitador 58 de flujo o respiradero de vapor para expulsar el refrigerante 100 al interior de la vasija 54 de contención durante la operación de emergencia. El refrigerante 100 puede liberarse en la vasija 54 de contención como un gas 41, tal como vapor. El limitador 58 de flujo puede conectarse o montarse directamente en una pared externa de la vasija 52 del reactor, sin ninguna estructura intermedia, tal como tuberías o conexiones. En una realización el limitador 58 de flujo está soldado directamente a la vasija 52 del reactor para minimizar la probabilidad de cualquier fuga o fallo estructural. El limitador 58 de flujo puede ser una válvula de flujo Venturi dimensionada para liberar refrigerante 100 en la vasija 54 de contención a una tasa controlada. En una realización, el refrigerante 100 se libera únicamente en forma de vapor procedente de la vasija 52 del reactor. La condensación del vapor 41 puede reducir la presión en la vasija 54 de contención a aproximadamente la misma velocidad que el vapor expulsado 41 añade presión a la vasija 54 de contención. En una realización, el limitador 58 de flujo está configurado para liberar aproximadamente cinco megavatios de calor contenidos en el vapor 41.

40 El refrigerante 100 que se libera como vapor 41 en la vasija 54 de contención se condensa sobre la superficie interna 55 de la vasija 54 de contención como un líquido, tal como agua. La condensación del vapor 41 hace que disminuya la presión en la vasija 54 de contención al transformarse el vapor 41 en el refrigerante líquido 100. Puede eliminarse una cantidad suficiente de calor del conjunto modular 50 de energía mediante la condensación del vapor 41 sobre la superficie interna 55 de la vasija de contención para gestionar la eliminación del calor de decaimiento procedente del núcleo 6 del reactor. En una realización, no hay liberación alguna del refrigerante líquido 100 desde la vasija 52 del reactor ni siquiera durante una operación de emergencia. El refrigerante condensado 100 desciende hasta el fondo de la vasija 54 de contención y se acumula como una piscina de líquido. A medida que se condensa más vapor 41 en la superficie interna 55, el nivel del refrigerante 100 en el fondo de la vasija 54 de contención asciende gradualmente. El calor guardado en el vapor 41 se transfiere a través de las paredes de la vasija 54 de contención a la piscina de agua 16, que actúa como un disipador máximo de calor. El calor guardado en el refrigerante 100 situado en el fondo de la vasija 54 de contención es transferido por convección líquida y transferencia de calor por conducción en la superficie interna 55.

5 El calor eliminado del vapor 41 puede transferirse a la superficie interna 55, relativamente fría, mediante condensación en las paredes internas de la vasija fría 54 de contención y por convección natural del refrigerante caliente a la superficie interna 55. Puede transferirse calor a la piscina de agua 16 mediante conducción a través de las paredes de la vasija de contención y a través de convección natural en una superficie externa de la vasija 54 de contención. El refrigerante 100 permanece confinado dentro del conjunto modular 50 de energía después de que el núcleo 6 del reactor se caliente en exceso y durante la operación de emergencia. El calor transferido a la piscina de agua 16 puede proporcionar una eliminación pasiva adecuada del calor de decaimiento durante tres o más días sin intervención alguna de operarios.

10 La vasija 54 de contención puede estar diseñada para soportar la máxima presión que resultaría, dada una liberación instantánea del fluido de alta presión de la vasija 52 del reactor al interior de la vasija 54 de contención. La presión dentro de la vasija 54 de contención puede estar diseñada para equilibrarse con la presión dentro de la vasija 52 del reactor, deteniendo el flujo de rotura causado por la diferencia de presión. Con el tiempo, puede hacerse que la cantidad de presión en la vasija 54 de contención se iguale con la cantidad de presión en la vasija 52 del reactor, dando como resultado el nivel 100A de refrigerante en la vasija 52 del reactor y el nivel 100B de refrigerante en la vasija 54 de contención, según se muestra en la FIG. 3. Se muestra el nivel 100B de refrigerante elevado con respecto al nivel 100A de refrigerante debido a las temperaturas más elevadas del refrigerante en la vasija 52 del reactor con respecto a las temperaturas en la vasija 54 de contención. La FIG. 3 muestra que los niveles 100A y 100B de refrigerante pueden equilibrarse de tal modo que el nivel 100A de refrigerante en la vasija 52 del reactor permanezca por encima de la parte superior del núcleo 6 del reactor, manteniendo el núcleo 6 del reactor cubierto de refrigerante 100 en todo momento.

20 Puede proporcionarse una válvula 57 de paso para permitir que el refrigerante 100 vuelva a fluir de la vasija 54 de contención a la vasija 52 del reactor una vez que se logre la situación de estado estacionario de los niveles 100A, 100B de refrigerante. El refrigerante 100 al que se permite volver a entrar en la vasija 52 del reactor a través de la válvula 57 de paso reponga el refrigerante 100 que se expulsó como vapor 41 a través del limitador 58 de flujo. El flujo de refrigerante 100 a través de la válvula 57 de paso puede lograrse mediante la circulación natural del sistema pasivo debido a las diferentes densidades del agua que resultan de las diferencias de temperatura en las vasijas 52, 54. No se requieren ninguna bomba mecánica ni eléctrica ni ningún motor. En una realización, la válvula 57 de paso restringe el flujo de refrigerante 100 en una sola dirección: de la vasija 54 de contención a la vasija 52 del reactor.

25 Cuando el núcleo 6 del reactor se calienta en exceso, el limitador 58 de flujo o respiradero de vapor está configurado para expulsar el refrigerante 100, por ejemplo como vapor 41, al interior de la vasija 54 de contención a una tasa que mantenga una presión aproximada constante en la vasija 54 de contención durante una situación de estado estacionario. En una realización, la vasija 54 de contención experimenta un pico inicial de presión antes de alcanzar la situación de estado estacionario. Controlando la tasa de aumento de la presión en la vasija 54 de contención, puede diseñarse el grosor de la pared de la vasija de contención con menor resistencia material por razón de las presiones, menores y controladas, en la misma. Disminuir el grosor de la pared puede aminorar el peso de transporte del conjunto modular 50 de energía y disminuir los costos de fabricación y entrega.

30 Aunque puede resultar comercial o técnicamente impráctico lograr o mantener un vacío total o perfecto, puede crearse un vacío parcial en la vasija 54 de contención. Por lo tanto, se entiende que cualquier referencia a un vacío en el presente documento es a un vacío parcial o total. En una realización, la zona 44 de contención se mantiene a una presión de vacío que reduce significativamente la transferencia convectiva y conductiva del calor a través de los gases de contención. Eliminando sustancialmente los gases de la zona 44 de contención, por ejemplo manteniendo un vacío dentro de la vasija 54 de contención, aumenta la tasa inicial de condensación del vapor 41 sobre la superficie interna 55. Aumentar la tasa de condensación incrementa la tasa de transferencia de calor a través de la vasija 54 de contención.

35 Un vacío dentro de la zona 44 de contención actúa como un tipo de aislamiento térmico durante la operación normal, reteniendo con ello calor y energía en la vasija 52 del reactor, lugar en el que pueden seguir siendo utilizados. En consecuencia, puede usarse menos aislamiento material en el diseño de la vasija 52 del reactor. En una realización, se usa un aislamiento reflectante en lugar o además de los aislamientos térmicos convencionales. Puede incluirse el aislamiento reflectante en la vasija 52 del reactor o la vasija 54 de contención, o en ambas. El aislamiento reflectante puede ser más resistente al daño causado por el agua que el aislamiento térmico convencional. Además, el aislamiento reflectante no impide tanto una transferencia de calor desde la vasija 52 del reactor como el aislamiento térmico convencional durante una situación de emergencia. Por lo tanto, la combinación de un vacío y un aislamiento reflectante proporciona aislamiento térmico durante la operación normal y promueve la transferencia de calor alejándolo del núcleo 6 del reactor durante la situación de emergencia.

50 En el caso de una pérdida del vacío en la zona 44 de contención, los gases o líquidos introducidos proporcionan un mecanismo pasivo adicional de enfriamiento de seguridad para transferir calor entre la vasija 52 del reactor y la vasija 54 de contención mediante convección natural. Por ejemplo, reduciendo o eliminando el aislamiento térmico convencional puede lograrse una transferencia más efectiva del calor procedente de la vasija 52 del reactor durante la operación de emergencia debido al refrigerante líquido condensado 100 que se acumula en el fondo de la vasija

54 de contención. Se puede transferir el calor desde la vasija 52 del reactor, por medio del refrigerante líquido 100, a la vasija 54 de contención.

Además, la eliminación de aire y otros gases de la zona 44 de contención reduce o elimina por completo la necesidad de cualquier recombinador de hidrógeno, usados normalmente para reducir las mezclas combustibles de gases que, si no, podrían desarrollarse. Durante una operación de emergencia, el vapor puede reaccionar químicamente con las varillas de combustible, produciendo un nivel elevado de hidrógeno. Cuando el hidrógeno se mezcla con aire u oxígeno se puede crear una mezcla combustible. Al eliminar una porción sustancial del aire o el oxígeno de la vasija 54 de contención, se minimiza o se elimina la cantidad de hidrógeno y oxígeno que se permite que se mezcle. En una realización, se eliminan o se vacían cualquier aire u otros gases que residan en la zona 44 de contención cuando se detecta una situación de emergencia.

La FIG. 4 ilustra una tasa ejemplar de condensación del refrigerante 100 liberado en el interior de la vasija 54 de contención. Según se ha descrito anteriormente, el refrigerante 100 puede ser expulsado como vapor 41 que se condensa sobre la superficie interna 55 de la vasija 54 de contención. El limitador 58 de flujo controla la tasa de liberación de refrigerante 100 como vapor 41 dentro de la vasija 54 de contención, de tal modo que pueda determinarse o administrarse la tasa de aumento del nivel 100B de refrigerante en la vasija 54 de contención. Según el gráfico de la FIG. 4, pueden acumularse aproximadamente 279,4 cm de refrigerante 100 en el fondo de la vasija 54 de contención después de un periodo de 9500 segundos, o aproximadamente 2 horas y 38 minutos. Por supuesto, esta tasa de aumento en el nivel 100B de refrigerante dependerá del tamaño de la vasija 52 del reactor y de la vasija 54 de contención, así como del diseño del limitador 58 de flujo.

En una realización, la tasa de aumento del nivel 100B de refrigerante se nivela en un valor constante, o casi, una vez que las presiones en la vasija 52 del reactor y la vasija 54 de contención se igualan o alcanzan un estado estacionario. Un flujo de refrigerante 100 a través de la válvula 57 de paso de la FIG. 3 al interior de la vasija 52 del reactor puede eliminar aproximadamente la misma cantidad de refrigerante 100 que se condensa como líquido sobre la superficie interna 55 de la vasija 54 de contención.

El limitador 58 de flujo conectado a la vasija 52 del reactor puede expulsar el vapor 41 a una tasa que mantiene una presión constante aproximada en la vasija 54 de contención durante una situación de estado estacionario. La FIG. 5 ilustra una fluctuación ejemplar de la presión en la vasija 54 de contención durante una incidencia de presurización excesiva. En una realización, la presión dentro de la vasija 54 de contención puede estar a la presión atmosférica, o cerca de ella, antes de la incidencia de presurización excesiva. En otra realización, la presión dentro de la vasija de contención se mantiene como un vacío. La vasija 54 de contención puede experimentar entonces un pico de presión que aumente la presión hasta cierto valor umbral superior predeterminado.

En una realización, el valor umbral superior de presión es de aproximadamente 2.068 kPaA. Una vez que la presión alcanza el valor umbral superior, el limitador 58 de flujo puede cerrarse o prohibir de otro modo la liberación adicional de refrigerante 100 como vapor 41 al interior de la vasija 54 de contención. La presión dentro de la vasija 54 de contención disminuye entonces, debido a la condensación del vapor 41 formando un líquido. Puede permitirse que la presión disminuya hasta cierto valor umbral inferior predeterminado. En una realización, el valor umbral inferior de presión es inferior a 1.034 kPaA. Una vez que la presión alcanza el valor umbral inferior, el limitador 58 de flujo puede abrirse o permitir de otro modo la liberación adicional de refrigerante 100 al interior de la vasija 54 de contención. La presión dentro de la vasija 54 de contención aumenta entonces hasta que vuelve a alcanzar el valor umbral superior, continuando el ciclo de presurización y despresurización mientras el calor de decaimiento es eliminado del núcleo 6 del reactor. Por lo tanto, la presión dentro de la contención 54 puede mantenerse entre los valores umbral superior e inferior.

Puede calcularse una sección de paso de caudal a través de la tobera de vapor del limitador 58 de flujo según las mediciones o los valores estimados de la tasa de condensación del vapor en la vasija 54 de contención, una tasa de eliminación de energía de la vasija 54 de contención y una tasa de calentamiento de la piscina de agua 16 de la FIG. 3. Una tasa de cambio del nivel de líquido en la vasija 54 de contención puede ser de aproximadamente 0,19 mm por segundo en una realización. Según el principio de conservación de la masa, el caudal de masa del vapor condensado formando líquido puede determinarse según la siguiente ecuación:

$$(1) \quad dM_L/dt = \rho_L A_C (dL/dt)_C = m$$

Puede darse la tasa de transferencia de calor a la superficie interna 55 de la vasija 54 de contención mediante la siguiente ecuación:

$$(2) \quad q = mh_{fg}$$

Puede determinarse la tasa de calentamiento para la piscina de agua 16 usando la ecuación siguiente:

$$(3) \quad MC_p \, dT/dt = q$$

Suponer que la masa de la piscina de enfriamiento, el calor específico del agua de la piscina de enfriamiento a presión constante y la entrada de calor son constantes permite integrar la Ecuación (2) para obtener el tiempo requerido para calentar la piscina de agua 16 según la ecuación siguiente:

$$(4) \quad \Delta t = MC_p \Delta T / q$$

5 En una realización, la temperatura superior de la piscina de agua 16 está fijada por debajo del punto de ebullición, tal como 93 grados Celsius. Por último, puede darse mediante la ecuación siguiente el flujo crítico del vapor:

$$(5) \quad m = C_d A \left[K g_c \rho_g P \right]^{(1/2)}$$

siendo C_d un coeficiente de descarga de aproximadamente 0,95 y siendo

$$K = \gamma \left[2 / (\gamma + 1) \right]^{(\gamma+1)(\gamma-1)}$$

10 El sistema primario de refrigeración puede experimentar un calor inicial de decaimiento del 6% durante los primeros 100 segundos de un escenario de purga de vapor; sin embargo, esto se nivela al 2% o el 3% en la situación del estado estacionario. Liberar la presión al interior de la vasija 54 de contención puede dar como resultado que aproximadamente el 3% del calor de decaimiento se transfiera de la vasija 52 del reactor, lo que acomoda la cantidad de calor de decaimiento que se libera en el estado estacionario. Esto se logra a través del sistema pasivo de emergencia de agua de alimentación y de eliminación del calor de decaimiento descrito en el presente documento sin la necesidad de una fuente preexistente de agua o de que haya situada una piscina de supresión dentro de la vasija 54 de contención.

15 La FIG. 6 ilustra una realización alternativa de un conjunto modular 60 de energía que incluye una vasija 64 de contención dotada de aletas 65 para aumentar el área de la superficie de refrigeración. Las aletas 65 de refrigeración pueden estar unidas a una pared externa de la vasija 64 de contención para eliminar el calor de decaimiento de un núcleo de reactor durante una operación de emergencia. Durante la operación normal del conjunto modular 60 de energía, el interior de la vasija 64 de contención permanece seco, mientras que la vasija 62 del reactor contiene un refrigerante así como un núcleo de reactor. En una realización, la vasija 64 de contención está en un estado despresurizado o de vacío durante situaciones operativas normales. El refrigerante puede ser un líquido o un gas. En la operación de emergencia, tal como la presurización excesiva de la vasija 62 del reactor, se libera refrigerante que sale del limitador 68 de flujo al interior de la vasija 64 de contención. El refrigerante circula dentro de la pared de la vasija 64 de contención y libera calor dentro de la misma. Después, el calor se elimina de la vasija de contención mediante convección o conducción al interior de un disipador circundante 66 de calor.

20 El disipador 66 de calor puede ser un fluido tal como agua o gas. En una realización, el disipador de calor está compuesto de tierra (por ejemplo, roca, tierra u otro material sólido) que rodea por completo a la vasija 64 de contención. Puede haber aletas 65 fijadas a la vasija 64 de contención que proporcionan un área de superficie adicional con la que transferir el calor de decaimiento al disipador 66 de calor. Las aletas 65 pueden rodear la vasija 64 de contención. En una realización, las aletas 65 están orientadas en planos horizontales. El disipador 66 de calor puede estar contenido en una estructura 61 de contención, tal como hormigón. Una cubierta 63, que también puede estar fabricada de hormigón, puede rodear por completo al conjunto modular 60 de energía y al disipador 66 de calor. La estructura 61 de contención y la cubierta 63 pueden servir para proteger contra un impacto de proyectiles extraños y operar también como escudo biológico.

35 La FIG. 7 ilustra una realización de un conjunto modular 70 de potencia que incluye múltiples zonas 71, 72 de contención. La zona de contención puede estar compartimentada en una primera zona 71 de contención y una segunda zona 72 de contención. La primera zona 71 de contención puede estar situada en una porción superior de la vasija 74 de contención y la segunda zona 72 de contención puede estar situada en una porción inferior de la vasija 74 de contención. La primera zona 71 de contención puede mantenerse a presión atmosférica, mientras que la segunda zona 72 de contención puede mantenerse a una presión por debajo de la atmosférica.

40 Pueden proporcionarse una o más válvulas 75 entre las zonas 71, 72 de contención primera y segunda. La válvula 75 puede operar en el caso de una situación de emergencia para liberar presión. En una realización, la válvula 75 opera transfiriendo refrigerante líquido que se condensa en la primera zona 71 de contención, de modo que se acumule en la segunda zona 72 de contención. En una realización hay incluido un aislamiento térmico convencional 76 en la primera zona 71 de contención y hay incluido un aislamiento reflectante 78 en la segunda zona 72 de contención. Puede proporcionarse un número cualquiera de zonas de contención, algunas o la totalidad de las cuales pueden mantenerse como un vacío.

La FIG. 8 ilustra un procedimiento novedoso de refrigeración de un sistema de energía, tal como el conjunto modular 50 de energía de la FIG. 3. En la operación 810, el conjunto modular 50 de energía es parado rápidamente en caso de una incidencia de presión elevada en una vasija de reactor, tal como la vasija 52 del reactor de la FIG. 3.

5 En la operación 820, se libera refrigerante al interior de una zona de contención, tal como la zona 44 de contención de la FIG. 3, situada entre una vasija de contención, tal como la vasija 54 de contención de la FIG. 3 y la vasija 52 del reactor. La zona 54 de contención rodea la vasija 52 del reactor y puede estar sustancialmente seca antes de la incidencia de presión elevada. El refrigerante, tal como el refrigerante 100, puede ser liberado como vapor 41 en el interior de la vasija 54 de contención. En una realización, el vapor que es liberado del sistema refrigerante secundario 30 de la FIG. 1 como consecuencia de un fallo o una pérdida de integridad de la presión también puede ser expulsado al interior de la vasija 54 de contención.

10 En la operación 830 el vapor 41 se condensa sobre una pared interna, tal como la pared interna 55 de la vasija 54 de contención. El vapor 41 puede condensarse formando un líquido, tal como agua.

15 En la operación 840, el calor de decaimiento es transferido a un medio líquido que rodea la vasija 54 de contención. El calor de decaimiento puede transferirse mediante la condensación del vapor 41, así como por convección y conducción del líquido condensado.

20 En la operación 850, la presión en la zona 44 de contención se limita o mantiene dentro de los límites del diseño mediante la condensación del refrigerante sobre la pared interna. Un limitador de flujo del vapor, tal como el limitador 58 de flujo de la FIG. 3, puede estar dimensionado para limitar una tasa de aumento de la presión en la vasija 54 de contención. La tasa de aumento de la presión puede alterarse sustancialmente por la condensación del vapor 41 formando líquido. El limitador 58 de flujo de vapor puede abrirse de manera selectiva o intermitente, de modo que la presión en la vasija 54 de contención esté limitada a un valor máximo y se permite que se despresurice cuando se cierra el limitador 58 de flujo.

25 La condensación del vapor 41 puede reducir la presión dentro de la zona 44 de contención en aproximadamente la misma cantidad que el refrigerante liberado aumenta la presión en la zona 44 de contención. El refrigerante 100 puede ser liberado en el interior de la zona 44 de contención como vapor 41, y el calor de decaimiento del núcleo 6 del reactor puede ser eliminado del conjunto modular 50 de energía por la condensación del vapor 41 sobre la pared interna 55 de la vasija 54 de contención.

30 Aunque las realizaciones proporcionadas en el presente documento han descrito fundamentalmente un reactor de agua a presión, debería resultar evidente para un experto en la técnica que las realizaciones pueden ser aplicadas a otros tipos de sistemas de energía nuclear según se describe o con alguna modificación obvia. Por ejemplo, las realizaciones o variaciones de las mismas también pueden hacerse operables con un reactor de agua en ebullición. Un reactor de agua en ebullición puede requerir vasijas mayores para producir el mismo rendimiento energético.

35 La tasa de liberación del refrigerante al interior de la vasija de contención, la tasa de condensación del refrigerante formando un líquido y la tasa de aumento de la presión en la vasija de contención, así como otras tasas y otros valores descritos en el presente documento son proporcionados únicamente a título de ejemplo. Pueden determinarse otras tasas y otros valores a través de experimentación, tal como la construcción de modelos de tamaño real o a escala del reactor nuclear.

40 Habiendo descrito e ilustrado los principios de la invención en una realización preferente de la misma, debería ser evidente que la invención puede ser modificada en disposición y detalle sin apartarse de tales principios. Se reivindican todas las modificaciones y las variaciones que se encuentren dentro del alcance de las reivindicaciones siguientes.

REIVINDICACIONES

1. Un conjunto modular (50) de energía que comprende:
un núcleo (6) de reactor sumergido en un refrigerante primario (100);
5 una vasija (52) de reactor que aloja el refrigerante primario (100) y el núcleo (6) del reactor;
una vasija (54) de contención sumergida en líquido (16), estando la vasija (54) de contención seca internamente y rodeando sustancialmente a la vasija (52) del reactor en una situación de presión por debajo de la atmosférica durante la operación normal del conjunto modular (50) de energía, en el que la vasija (54) de contención está configurada para prohibir una liberación del refrigerante primario (100) fuera de la vasija (54) de contención, en el que sustancialmente todo el refrigerante primario (100) contenido en la vasija (54) de contención está alojado en la vasija (52) del reactor durante la operación normal del conjunto modular (50) de energía; y
10 un respiradero (58) configurado para, durante una incidencia de presurización excesiva, liberar de forma controlable el refrigerante primario (100) en la vasija (54) de contención;
en el que el calor de decaimiento del núcleo (6) del reactor se elimina a través de la condensación del refrigerante primario (100) sobre una superficie interna (55) de la vasija (54) de contención.
2. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1
20 en el que el respiradero (58) comprende un limitador de flujo montado en la vasija (52) del reactor para expulsar el refrigerante primario (100) como vapor (41) que se condensa en la superficie interna (55) de la vasija (54) de contención y/o en el que la vasija (54) de contención está configurada para flotar en el líquido (16).
3. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1
25 en el que el conjunto modular (50) de energía está configurado para mantener la presión dentro de la vasija (54) de contención dentro de límites de diseño mediante la condensación del refrigerante primario (100).
4. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1
30 que incluye aletas de refrigeración unidas a una pared externa de la vasija (54) de contención para eliminar más calor de decaimiento del núcleo (6) del reactor, y/o en el que el conjunto modular (50) de energía está configurado para que sustancialmente todo el refrigerante primario (100) permanezca confinado dentro de la vasija (54) de contención durante la incidencia de presurización excesiva.
5. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1
35 en el que el conjunto modular (50) de energía está configurado para que la condensación del refrigerante primario (100) sobre la superficie interna (55) de la vasija (54) de contención reduzca la presión en la vasija (54) de contención a aproximadamente la misma velocidad que el refrigerante primario (100) expulsado al interior de la vasija (54) de contención añadida presión a la vasija (54) de contención, y/o
40 en el que el conjunto modular (50) de energía está configurado para que el calor de decaimiento se elimina, además, por conducción desde una superficie externa de la vasija (54) de contención con el líquido (16).
6. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1
45 en el que el conjunto modular (50) de energía está configurado para que el refrigerante primario (100) sea expulsado a una velocidad que mantenga una presión aproximada constante en la vasija (54) de contención durante una situación de estado estacionario.
7. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 6
50 en el que el conjunto modular (50) de energía está configurado para que la vasija (54) de contención experimente un pico inicial de presión antes de la situación de estado estacionario.
8. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1
55 en el que el respiradero (58) está conectado directamente a una pared externa de la vasija (52) del reactor sin ninguna estructura intermedia.
9. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1

en el que sustancialmente todo el aislamiento térmico de la vasija (52) del reactor está proporcionado por la situación de presión por debajo de la atmosférica.

5 10. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1

que, además, comprende un aislamiento reflectante situado entre la vasija (52) del reactor y la vasija (54) de contención, en el que sustancialmente todo el aislamiento térmico de la vasija (52) del reactor está proporcionado por una combinación de la situación de presión por debajo de la atmosférica y el aislamiento reflectante.

10 11. El conjunto modular (50) de energía según la reivindicación 1

en el que la vasija (52) del reactor comprende acero inoxidable o acero al carbono y en el que una superficie externa de la vasija (52) del reactor está expuesta directamente a una situación de presión por debajo de la atmosférica.

12. Un procedimiento de refrigeración de un reactor nuclear que comprende:

15 parar rápidamente el reactor nuclear en caso de una incidencia de presión elevada indicada en la vasija (52) del reactor;

20 liberar de forma controlada refrigerante primario (100) como vapor (41) en una zona (44) de contención situada entre la vasija (54) de contención y la vasija (52) del reactor, estando la zona (44) de contención sustancialmente seca antes de la incidencia de presión elevada;

condensar el vapor (41) sobre una pared interna (55) de la vasija (54) de contención;

transferir el calor de decaimiento a un medio líquido que rodea la vasija (54) de contención; y

25 mantener una presión de contención dentro de los límites de diseño mediante la condensación del vapor (41) sobre la pared interna (55).

13. El procedimiento según la reivindicación 12

30 en el que la condensación del vapor (41) reduce la presión dentro de la zona (44) de contención en aproximadamente la misma cantidad que el vapor liberado (41) aumenta la presión en la zona (44) de contención.

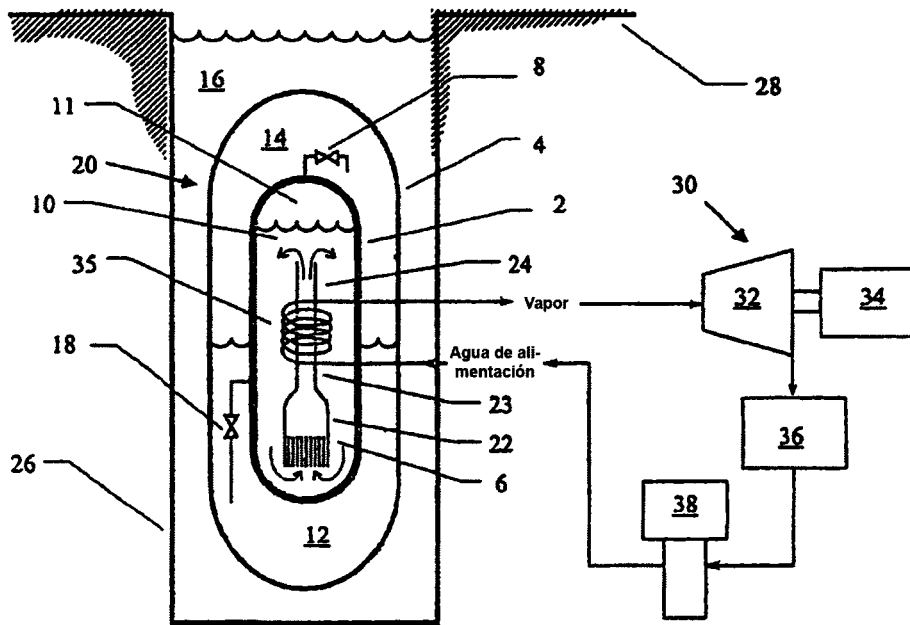
14. El procedimiento según la reivindicación 13.

en el que la zona (44) de contención se mantiene en una situación de presión por debajo de la atmosférica antes de la incidencia de presión elevada.

35 15. El procedimiento según la reivindicación 12

40 en el que el vapor condensado (41) forma una piscina del refrigerante primario (100) que se extiende entre una pared externa de la vasija (52) del reactor y la pared interna (55) de la vasija (54) de contención, e incluyendo el procedimiento volver a hacer circular la piscina del refrigerante primario (100) al interior de la vasija (52) del reactor y a través del núcleo (6) del reactor, en el que la piscina del refrigerante primario (100) no existía antes de la incidencia de presión elevada y/o que incluye el mantenimiento de la zona (44) de contención a una situación de presión por debajo de la atmosférica antes de liberar de forma controlada el refrigerante primario (100) como vapor (41).

FIG. 1



TÉCNICA ANTERIOR

FIG. 2

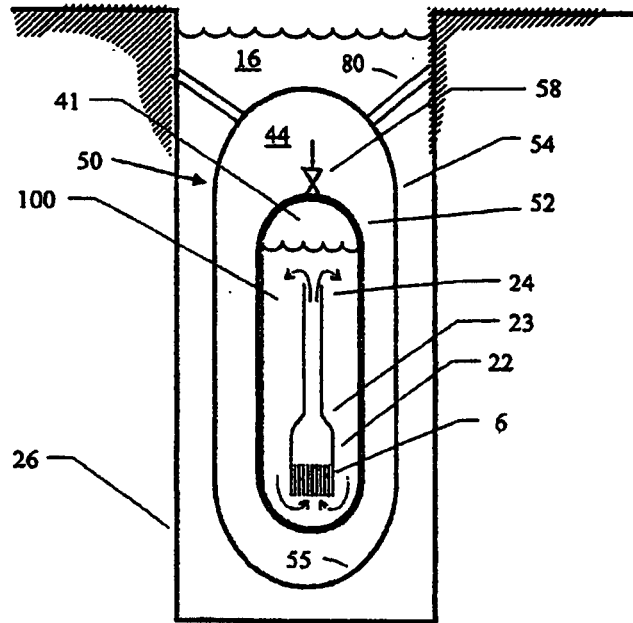


FIG. 3

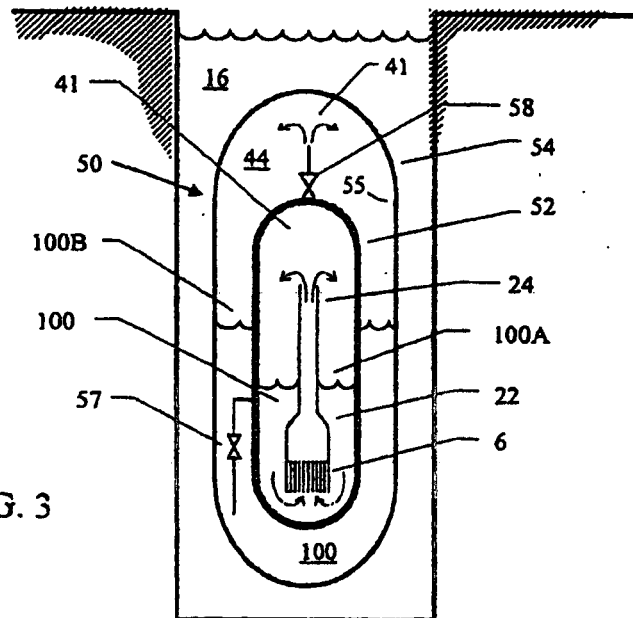


FIG. 4

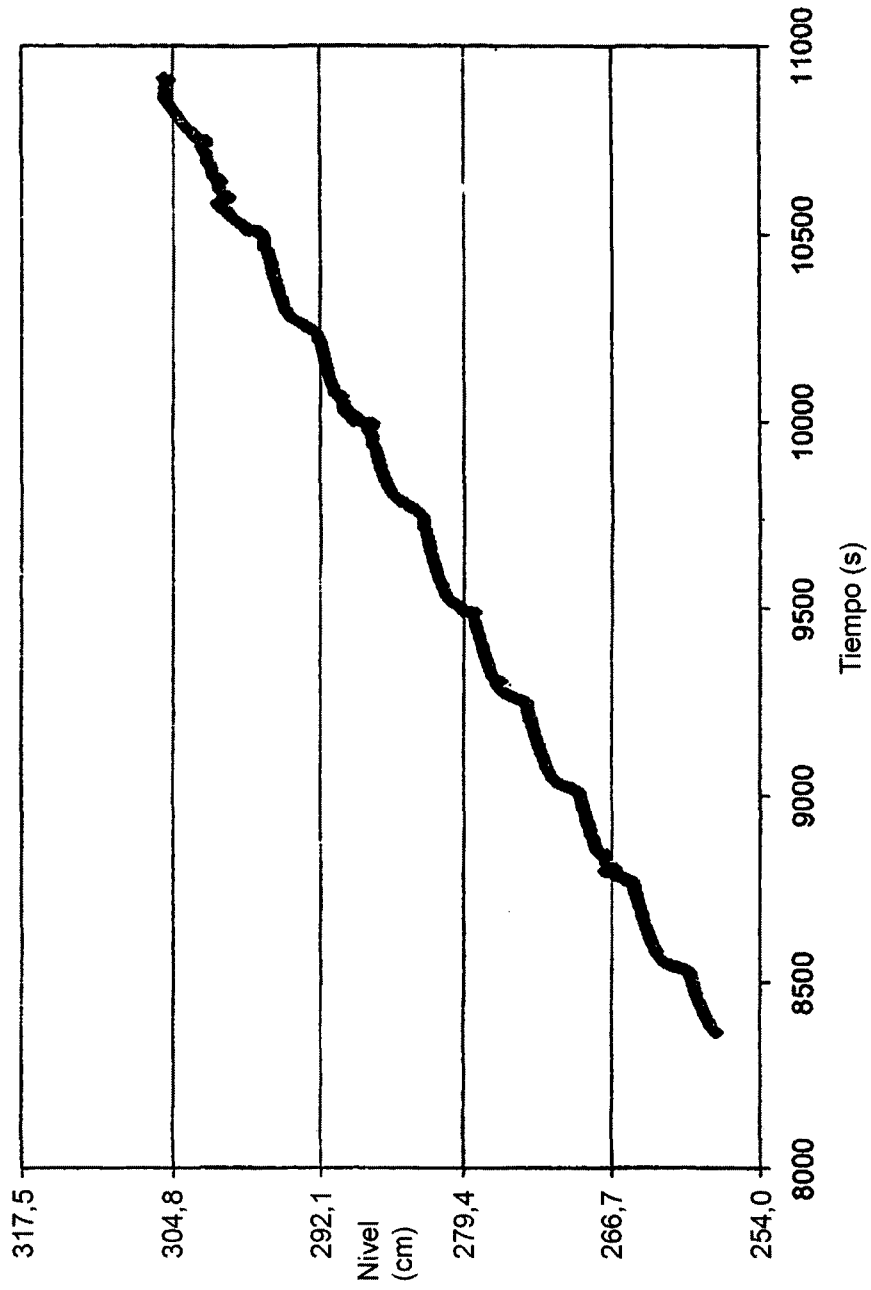
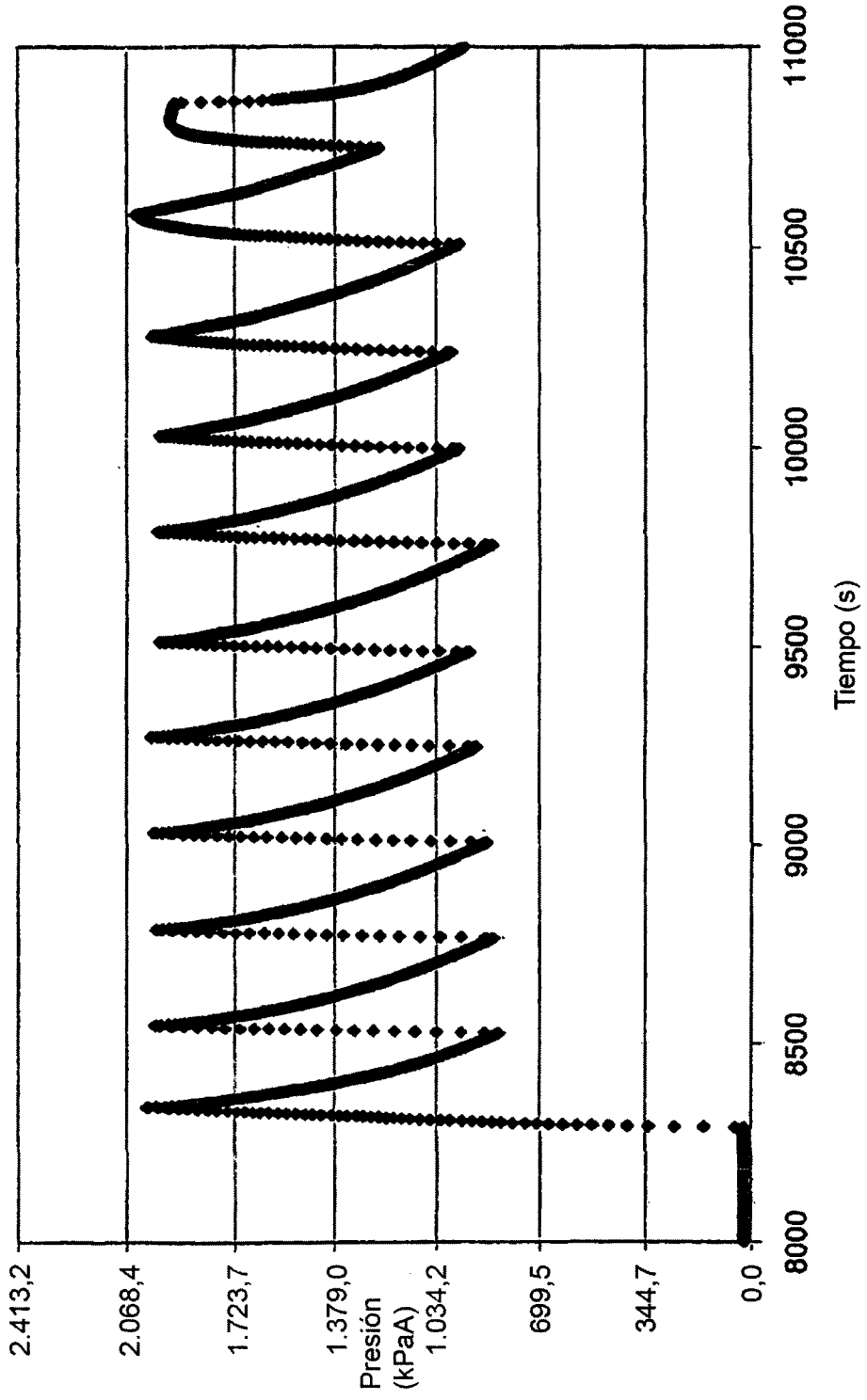


FIG. 5



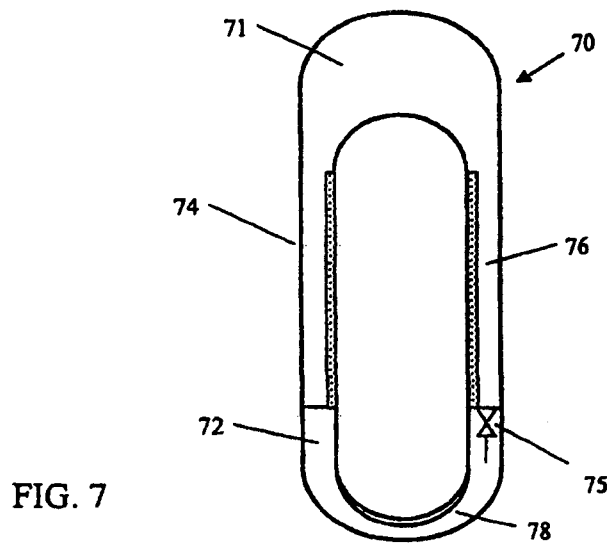
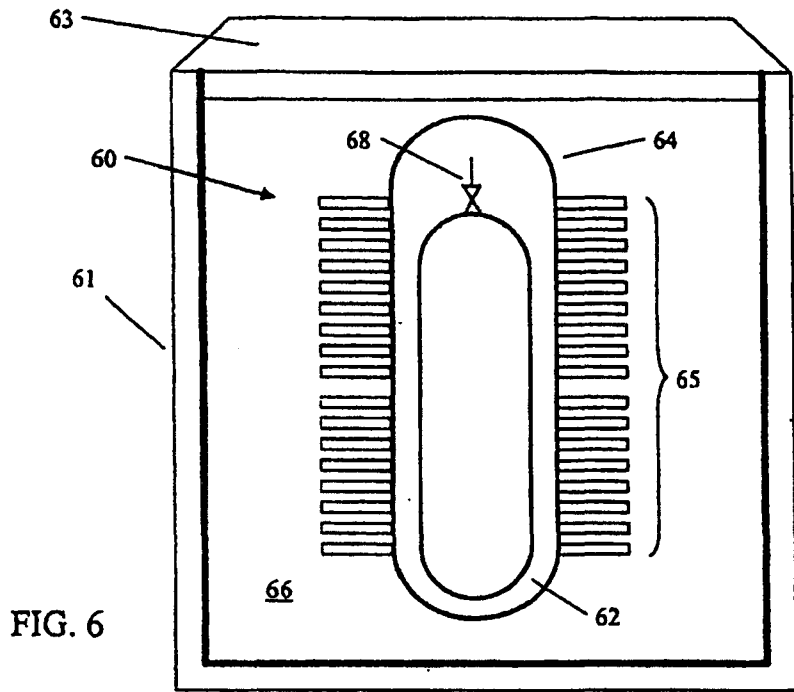


FIG. 8

