

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 806 383**

51 Int. Cl.:

**G21C 15/18** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.05.2014 PCT/US2014/039842**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.12.2014 WO14193988**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.05.2014 E 14803488 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.04.2020 EP 3005373**

54 Título: **Sistema de refrigeración de reactor pasivo**

30 Prioridad:

**28.05.2013 US 201361827943 P**

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

**17.02.2021**

73 Titular/es:

**SMR INVENTEC, LLC (100.0%)  
One Holtec Drive  
Marlton, NJ 08053, US**

72 Inventor/es:

**SINGH, KRISHNA, P. y  
RAJKUMAR, JOSEPH**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

**ES 2 806 383 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

Sistema de refrigeración de reactor pasivo

### 5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a reactores nucleares, y más particularmente a un reactor y un sistema de contención de reactor con sistema de refrigeración de reactor pasivo para una operación de apagado de reactor.

### 10 **Antecedentes de la invención**

La contención para un reactor nuclear se define como el recinto que proporciona aislamiento de entorno al sistema de suministro de vapor nuclear (NSSS) de la planta en la que se aprovecha la fisión nuclear para producir vapor presurizado. Un reactor nuclear comercial se requiere que esté encerrado en una estructura de retención de presión que pueda soportar la temperatura y la presión resultantes del accidente más grave que puede plantearse para la instalación. Los accidentes de liberación de energía más graves que pueden plantearse para un reactor y su contención pueden ser generalmente de dos tipos.

20 Primero, un caso que sigue a un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA, *loss-of-coolant accident*, por sus siglas en inglés) e implica una gran liberación rápida de energía térmica del sistema de suministro de vapor nuclear (NSSS) de la planta debido a una liberación repentina del refrigerante del reactor en el espacio de contención. El refrigerante de reactor, repentinamente despresurizado, se vaporizaría de manera instantánea y violenta dando como resultado un rápido aumento de presión y temperatura en el espacio de contención. El espacio de contención interior se convierte en una mezcla de aire y vapor. Los LOCA pueden plantearse de manera creíble asumiendo un fallo repentino en una tubería que transporta el refrigerante de reactor.

Otro segundo caso térmico de riesgo potencial para la integridad de la contención es el escenario en el que se pierden todas las trayectorias de disipación de calor del sistema de suministro de vapor nuclear (NSSS) de la planta, forzando al reactor a una "paralización rápida". Un apagón de estación es un caso de este tipo. El calor de desintegración generado en el reactor debe retirarse para proteger al mismo de un aumento incontrolado de presión.

Más recientemente, la estructura de contención también se ha denominado por los reguladores para soportar el impacto de una aeronave estrellada. Las estructuras de contención se han construido normalmente como cúpulas reforzadas de hormigón en masa para soportar la presión interna de un LOCA. Aunque su gruesa pared de hormigón podría ser capaz de soportar un impacto de aeronave, desafortunadamente también es un buen aislante del calor, que requiere sistemas de disipación de calor bombeado (emplear intercambiadores de calor y bombas) para disipar su calor no deseado al entorno externo (para minimizar el aumento de presión o retirar calor de desintegración). Tales sistemas de disipación de calor, sin embargo, dependen de una fuente de energía robusta (generador de gasóleo externo o local, por ejemplo) para alimentar de energía las bombas. El apagón de estación en Fukushima tras el tsunami es un recordatorio aleccionador de la temeridad de confiar en bombas. Las deficiencias mencionadas en el estado de la técnica exigen un sistema de contención de reactor nuclear mejorado. Además de los anteriores problemas de refrigeración de contención, un reactor nuclear sigue produciendo una cantidad sustancial de energía térmica después de haberse apagado. La figura 20 muestra una curva de generación de calor típica de un reactor de agua ligera subsecuente a una paralización rápida (es decir, un cese repentino de la reacción en cadena por una rápida inserción de varillas de control u otros medios). En los diseños actuales de reactor, como se indicó anteriormente, el calor de desintegración del reactor se retira mediante el sistema de retirada de calor residual (RHR) de la planta, que utiliza un sistema de bombas e intercambiadores de calor para transmitir la energía térmica a una fuente adecuada de agua de refrigeración mantenida por la planta. Como puede verse en la figura 20, el calor de desintegración del reactor comienza a atenuarse exponencialmente con el tiempo, pero sigue siendo bastante significativo para amenazar la seguridad del reactor si no se retira el calor generado (como fue el caso de Fukushima, donde fallaron las bombas necesarias para extraer el calor de los reactores debido a la inmersión de sus motores eléctricos en la marea de agua provocada por el tsunami). El desastre de Fukushima proporcionó una dura lección sobre la vulnerabilidad de los sistemas de flujo forzado (dependientes de bomba) en condiciones ambientales extremas.

Ejemplos de sistemas de refrigeración de reactor conocidos se dan a conocer en los documentos US4765946 A, US2002/101951 A1 o EP0232186 A2.

Es deseable un sistema de refrigeración de reactor mejorado.

### 60 **Sumario de la invención**

Un sistema de refrigeración de reactor según la presente divulgación proporciona un medio completamente pasivo para disipar el calor de desintegración del reactor sin ninguna dependencia ni inconvenientes de bombas y motores que requieran un suministro de energía eléctrica disponible, tal como se ha descrito anteriormente. El sistema de refrigeración se basa completamente en la gravedad y las densidades de fluidos variables para inducir flujo a través

del sistema de refrigeración. En una realización, este sistema accionado por gravedad puede configurarse y denominarse sistema de refrigeración en haz sumergido (SBCS) por conveniencia (esta nomenclatura arbitraria no es limitante en ningún sentido). El sistema de refrigeración está diseñado para extraer pasivamente calor del refrigerante primario del reactor en el caso de un apagado de estación u otro escenario de accidente planteado en el que se pierde la trayectoria de disipación de calor normal del núcleo de combustible a través del ciclo Rankine de la planta de energía.

En una realización, un sistema de refrigeración de apagado de reactor nuclear pasivo, tal como se establece en la reivindicación 1 incluye un alojamiento de recipiente de reactor, un núcleo de combustible nuclear en el interior, conteniendo el recipiente de reactor un refrigerante primario calentado por el núcleo de combustible y un generador de vapor acoplado de manera fluida al recipiente de reactor y que contiene un refrigerante secundario líquido. El refrigerante primario circula en un primer circuito de flujo cerrado entre el recipiente de reactor y el generador de vapor, transfiriendo el refrigerante primario calor al refrigerante secundario en el generador de vapor y produciendo vapor de refrigerante secundario. Un intercambiador de calor incluye una reserva de un tercer refrigerante líquido y un haz de tubos, sumergiéndose el haz de tubos en el tercer refrigerante. El refrigerante secundario circula por flujo de gravedad en un segundo circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos sumergido y el generador de vapor. El vapor de refrigerante secundario se extrae del generador de vapor y fluye en el segundo circuito de flujo cerrado al haz de tubos, se condensa formando condensado, y el condensado fluye de vuelta al generador de vapor.

En otra realización, un sistema de refrigeración de apagado de reactor nuclear pasivo tal como se expone en la reivindicación 9 incluye un alojamiento de recipiente de reactor, un núcleo de combustible nuclear en el interior, conteniendo el recipiente de reactor un refrigerante primario calentado por el núcleo de combustible, y un intercambiador de calor que incluye una reserva de agua de refrigeración y un haz de tubos, sumergiéndose el haz de tubos en el agua de refrigeración. El refrigerante primario circula por flujo de gravedad en un primer circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos sumergido y el recipiente de reactor, en el que el refrigerante primario transfiere calor a la reserva de agua de refrigeración en el intercambiador de calor y se refrigera antes de fluir de vuelta al recipiente de reactor.

En otra realización, se proporciona un método tal como se expone en la reivindicación 11 para refrigerar de manera pasiva un reactor nuclear después del apagado. El método incluye: calentar un refrigerante primario en un recipiente de reactor con un núcleo de combustible nuclear; calentar un refrigerante secundario en un generador de vapor con el refrigerante primario calentado para producir vapor de refrigerante secundario; extraer el vapor de refrigerante secundario del generador de vapor; hacer fluir el vapor de refrigerante secundario extraído a través de un haz de tubos sumergido en una reserva de agua de refrigeración en un recipiente a presión; condensar el vapor de refrigerante secundario formando un condensado de refrigerante secundario; y devolver el condensado de refrigerante secundario al generador de vapor, en el que el vapor de refrigerante secundario y el condensado circulan a través de un primer circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos y el generador de vapor. El método incluye además: calentar el agua de refrigeración en el recipiente a presión por el vapor de refrigerante secundario; convertir una parte del agua de refrigeración en fase de vapor; extraer el vapor de agua de refrigeración del recipiente a presión; hacer fluir el vapor de agua de refrigeración extraído a través de conductos disipadores de calor unidos a un recipiente de contención de reactor en comunicación térmica con un disipador de calor; condensar el vapor de agua de refrigeración; y devolver el agua de refrigeración condensada al recipiente a presión para reponer la reserva de agua de refrigeración.

Se proporciona otro método como se expone en la reivindicación 12 para agrupar pasivamente un reactor nuclear después del apagado. El método incluye: calentar un refrigerante primario en un recipiente de reactor con un núcleo de combustible nuclear; extraer el refrigerante primario calentado del recipiente de reactor; hacer fluir el refrigerante primario calentado a través de un haz de tubos sumergido en una reserva de agua de refrigeración en un recipiente a presión; refrigerar el refrigerante primario calentado para bajar su temperatura; y devolver el refrigerante primario refrigerado al recipiente de reactor, en el que el refrigerante primario circula a través de un primer circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos y el recipiente de reactor. El método incluye además: calentar el agua de refrigeración en el recipiente a presión por el refrigerante primario, convertir una parte del agua de refrigeración en fase de vapor; extraer el vapor de agua de refrigeración del recipiente a presión; hacer fluir el vapor de agua de refrigeración extraído a través de conductos disipadores de calor unidos a un recipiente de contención de reactor en comunicación térmica con un disipador de calor; condensar el vapor de agua de refrigeración; y devolver el agua de refrigeración condensada al recipiente a presión para reponer la reserva de agua de refrigeración, en el que el refrigerante primario circula por gravedad a través de un primer circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos y el recipiente de reactor.

Según otros aspectos, la presente invención proporciona además un sistema de contención de reactor nuclear que supera las deficiencias de las anteriores disposiciones para disipar calor liberado en el entorno dentro de la contención por un caso térmico. El sistema de contención incluye generalmente un recipiente de contención interior que puede formarse de acero u otro material dúctil y una estructura de recinto de contención exterior (CES) formando de ese modo un sistema de contención de doble pared. En una realización, una zona anular llena de agua puede proporcionarse entre el recipiente de contención y la estructura de recinto de contención que proporciona un depósito de refrigeración anular. El recipiente de contención puede incluir una pluralidad de aletas de transferencia de calor longitudinales que se extienden (sustancialmente) radiales hacia el exterior desde el recipiente en la manera de "aleta". El recipiente de contención, por tanto, no solo sirven como la contención estructural primaria para el reactor, sino que se configura y puede hacerse funcionar para funcionar como un intercambiador de calor con el depósito de agua anular

actuando como disipador de calor. Por consiguiente, como se describió además en el presente documento, el recipiente de contención proporciona ventajosamente un sistema de disipación de calor pasivo (es decir, no bombeado) cuando es necesario durante un accidente de liberación de energía térmica como un LOCA o una paralización rápida de reactor para disipar el calor y refrigerar el reactor.

5 En una realización según la presente divulgación, un sistema de contención de reactor nuclear incluye un recipiente de contención configurado para alojar un reactor nuclear, una estructura de recinto de contención (CES) que rodea el recipiente de contención y un depósito anular formado entre el recipiente de contención y la estructura de recinto de contención (CES) para extraer energía térmica del espacio de contención. En el caso de un incidente de liberación de energía térmica dentro del recipiente de contención, el calor generado por el recipiente de contención se transfiere al depósito anular que se hace funcionar para refrigerar el recipiente de contención. En una realización, el depósito anular contiene agua para refrigerar el recipiente de contención. Una parte del recipiente de contención puede incluir aletas de transferencia de calor sustancialmente radiales dispuestas en el depósito anular y que se extienden entre el recipiente de contención y la estructura de recinto de contención (CES) para mejorar la disipación del calor al depósito anular lleno de agua. Cuando ocurre un incidente de liberación de energía térmica dentro del recipiente de contención, una parte del agua en la zona anular se evapora y se ventila a la atmósfera a través del depósito anular de la estructura de recinto de contención (CES) en forma de vapor de agua.

20 Realizaciones del sistema pueden incluir además un sistema de refrigeración de aire auxiliar que incluye una pluralidad de elementos de conducción de aire de entrada vertical espaciados circunferencialmente alrededor del recipiente de contención en el depósito anular. Los elementos de conducción de aire están en comunicación de fluido con el depósito anular y el aire de ambiente de exterior externo a la estructura de recinto de contención (CES). Cuando ocurre un incidente de liberación de energía térmica dentro del recipiente de contención y el agua en el depósito anular se agota sustancialmente por evaporación, el sistema de refrigeración de aire puede hacerse funcionar proporcionando una trayectoria de ventilación desde el espacio de depósito hasta el ambiente de exterior. El sistema de ventilación puede verse por tanto como un sistema secundario que puede continuar refrigerando la contención indefinidamente.

30 Según otra realización, un sistema de contención de reactor nuclear incluye un recipiente de contención configurado para alojar un reactor nuclear, una estructura de recinto de contención (CES) que rodea el recipiente de contención, una zona anular llena de agua formada entre el recipiente de contención y la estructura de recinto de contención (CES) para refrigerar el recipiente de contención, y una pluralidad de aletas sustancialmente radiales que sobresalen hacia fuera desde el recipiente de contención y se ubican en la zona anular. En el caso de un incidente de liberación de energía térmica dentro del recipiente de contención, el calor generado por el recipiente de contención se transfiere al depósito lleno de agua en la zona anular a través del contacto directo con la superficie externa del recipiente de contención y sus aletas sustancialmente radiales, refrigerando de ese modo el recipiente de contención. En una realización, cuando ocurre un incidente de liberación de energía térmica dentro del recipiente de contención y el agua en la zona anular se agota sustancialmente por evaporación, el sistema de refrigeración de aire puede hacerse funcionar para extraer aire de ambiente de exterior en la zona anular a través de los elementos de conducción de aire para refrigerar el calor generado en la contención (que disminuye exponencialmente con el tiempo) por convección natural. La existencia de agua en la región anular que rodea completamente el recipiente de contención mantendrá una distribución de temperatura constante en el recipiente de contención para evitar la deformación del recipiente de contención durante el incidente o accidente de liberación de energía térmica.

45 En otra realización, un sistema de contención de reactor nuclear incluye un recipiente de contención que incluye una carcasa cilíndrica configurada para alojar un reactor nuclear, una estructura de recinto de contención (CES) que rodea el recipiente de contención, un depósito anular que contiene agua formada entre la carcasa del recipiente de contención y la estructura de recinto de contención (CES) para refrigerar el recipiente de contención, una pluralidad de aletas (sustancialmente) radiales externas que sobresalen hacia el exterior desde el recipiente de contención al interior de la zona anular, y un sistema de refrigeración de aire que incluye una pluralidad de elementos de conducción de aire de entrada vertical espaciados circunferencialmente alrededor del recipiente de contención en el depósito anular. Los elementos de conducción de aire están en comunicación de fluido con el depósito anular y el aire de ambiente de exterior externo a la estructura de recinto de contención (CES). En el caso de un incidente de liberación de energía térmica dentro del recipiente de contención, el calor generado por el recipiente de contención se transfiere al depósito anular a través de la pared de contención (sustancialmente) radial junto con sus aletas internas y externas que se hacen funcionar para refrigerar el recipiente de contención.

Ventajas y aspectos de un sistema de contención de reactor nuclear según la presente divulgación incluyen lo siguiente:

60 Estructuras y sistemas de contención configurados de manera que un caso de liberación de energía grave, tal como se ha descrito anteriormente, pueda contenerse de manera pasiva (por ejemplo, sin depender de componentes activos como bombas, válvulas, intercambiadores de calor y motores);

65 Estructuras y sistemas de contención que continúan funcionando de manera autónoma durante una duración ilimitada (por ejemplo, sin límite de tiempo para la intervención humana);

Estructuras de contención fortificadas con nervaduras (aletas) internas y externas configuradas para soportar un impacto de proyectil, como una aeronave estrellada, sin perder su función primaria (es decir, retención de presión y radionúclidos (si existen) y disipación de calor); y

- 5 Recipiente de contención equipado con provisiones que permitan la pronta retirada (o instalación) del equipo principal a través de la estructura de contención.

**Breve descripción de los dibujos**

- 10 Las características de las realizaciones ilustrativas de la presente invención se describirán con referencia a los siguientes dibujos, donde elementos similares se etiquetan de manera similar, y en los que:

la figura 1 es una vista en alzado lateral de un recipiente de contención de reactor primario con aletas según la presente divulgación que forma parte de un sistema de contención de reactor nuclear, estando separadas las partes inferiores de algunas aletas en parte para revelar columnas de soporte verticales y una nervadura circunferencial;

la figura 2 es una vista transversal en sección transversal del mismo tomada a lo largo de la línea II-II;

la figura 3 es un detalle del punto III de la figura 2;

la figura 4 es una vista en sección transversal longitudinal del sistema de contención de reactor nuclear que muestra el recipiente de contención de la figura 1 y la estructura de recinto de contención exterior (CES) con depósito anular lleno de agua formado entre el recipiente y el recinto;

la figura 5 es una vista en sección transversal longitudinal a través del recipiente de contención y la estructura de recinto de contención (CES);

la figura 6 es una vista en alzado lateral del sistema de contención de reactor nuclear como se instala, pudiendo verse la estructura de recinto de contención exterior (CES) por encima del terreno rasante;

la figura 7 es una vista en planta superior del mismo;

la figura 8 es una vista en sección transversal longitudinal del mismo, tomada a lo largo de la línea VIII-VIII en la figura 7, que muestra partes tanto por encima como por debajo del terreno rasante del sistema de contención de reactor nuclear;

la figura 9 es una vista en alzado lateral del recipiente de contención de reactor primario que muestra diversos cortes en sección transversal para revelar equipos alojados en y detalles adicionales del recipiente de contención;

la figura 10 es una vista en planta superior del mismo;

la figura 11 es una vista en sección transversal longitudinal del mismo, tomada a lo largo de la línea XI-XI de la figura 10;

la figura 12 es una vista en sección transversal longitudinal del mismo, tomada a lo largo de la línea XII-XII de la figura 10;

la figura 13 es una vista transversal en sección transversal del mismo, tomada a lo largo de la línea XIII-XIII de la figura 9;

la figura 14 es una vista transversal en sección transversal del mismo, tomada a lo largo de la línea XIV-XIV de la figura 9;

la figura 15 es una vista transversal en sección transversal del mismo, tomada a lo largo de la línea XV-XV de la figura 9;

la figura 16 es una vista en sección transversal longitudinal parcial del sistema de contención de reactor nuclear que muestra un sistema de disipación de calor auxiliar;

la figura 17 es una vista isométrica del recipiente de contención con partes inferiores de las aletas (sustancialmente) radiales del recipiente de contención separadas en parte para revelar columnas de soporte verticales y una nervadura circunferencial;

la figura 18 es una vista en sección transversal longitudinal de una parte del sistema de disipación de calor de la figura 16 que muestra colectores de anillo superiores e inferiores y conductos unidos a la carcasa de recipiente de contención;

la figura 19 es una representación esquemática de una sección transversal generalizada del sistema de contención de reactor nuclear y el funcionamiento del depósito anular lleno de agua para disipar el calor y refrigerar el recipiente de contención durante un caso de liberación de energía térmica;

5 la figura 20 es un gráfico que muestra una curva de generación de calor típica de un reactor de agua ligera subsecuente a un caso de paralización rápida;

10 la figura 21 es un diagrama esquemático de un intercambiador de calor de haz sumergido (SBHX) según la presente divulgación;

la figura 22 es un diagrama esquemático que muestra una primera realización de un sistema de refrigeración de reactor y el método correspondiente para refrigerar un núcleo de reactor;

15 la figura 23 es un diagrama esquemático que muestra una segunda realización de un sistema de refrigeración de reactor y el método correspondiente para refrigerar un núcleo de reactor; y

la figura 24 es un diagrama esquemático que muestra el flujo de refrigerante primario y secundario a través del recipiente de reactor y el generador de vapor.

20 Todos los dibujos son esquemáticos y no necesariamente a escala.

### Descripción detallada de las realizaciones

25 Las características y beneficios de la invención se ilustran y describen en el presente documento por referencia a realizaciones ilustrativas. Esta descripción de realizaciones ilustrativas se pretende que se lea en conexión con los dibujos adjuntos, que deben considerarse parte de toda la descripción escrita. En la descripción de realizaciones dadas a conocer en el presente documento, cualquier referencia a la dirección u orientación se pretende simplemente para facilitar la descripción y no se pretende de ninguna manera para que limite el alcance de la presente invención.

30 Términos relativos como "inferior", "superior", "horizontal", "vertical", "por encima", "por debajo", "arriba", "abajo", "parte superior" y "parte inferior", así como derivados de los mismos (por ejemplo, "horizontalmente", "hacia abajo", "hacia arriba", etc.) deben interpretarse en el sentido de que se refiere a la orientación nominal tal como se describe entonces o como se muestra en el dibujo que se comenta. Estos términos relativos son solo para facilitar la descripción y no requieren que el aparato se construya o se haga funcionar en una orientación rigurosamente específica indicada por el término. Términos como "unido", "fijado", "conectado", "acoplado", "interconectado" y similares se refieren a una relación en la que las estructuras están aseguradas o unidas entre sí, directa o indirectamente, a través de estructuras intermedias, así como uniones o relaciones o bien móviles o bien rígidas, a menos que se describa expresamente de otro modo. Por consiguiente, la divulgación no debe limitarse expresamente a tales realizaciones ilustrativas que ilustran alguna posible combinación no limitante de características que pueden existir solas o en otras combinaciones de características.

Haciendo referencia a las figuras 1-15, se muestra un sistema de contención de reactor nuclear 100 según la presente divulgación. El sistema 100 incluye generalmente una estructura de contención interna como recipiente de contención 200 y una estructura de recinto de contención exterior (CES) 300 que define colectivamente un conjunto de recinto-recipiente de contención 200-300. El recipiente de contención 200 y la estructura de recinto de contención (CES) 300 son verticalmente alargados y orientados, y definen un eje vertical VA.

50 En una realización, el conjunto de recinto-recipiente de contención 200-300 está configurado para enterrarse en el subterreno rasante al menos parcialmente por debajo del terreno rasante (véase también las figuras 6-8). El conjunto de recinto-recipiente de contención 200-300 puede soportarse por una cimentación de hormigón 301 compuesta por una losa inferior 302 y paredes laterales que se extienden de manera vertical 303 que se elevan desde la losa formando una placa de base superior 304. Las paredes laterales 303 pueden encerrar circunferencialmente el recipiente de contención 200 como se muestra, en las que una parte inferior del recipiente de contención puede situarse dentro de las paredes laterales. En algunas realizaciones, las paredes laterales 303 pueden verse después de colocar el recipiente de contención 200 sobre la losa inferior 302 (que puede verse y establecerse primero), integrando de ese modo completamente la parte inferior del recipiente de contención 200 dentro de la cimentación. Las paredes de cimentación 303 pueden terminar por debajo del terreno rasante en algunas realizaciones, como se muestra para proporcionar protección adicional para el conjunto de recinto-recipiente de contención 200-300 de impactos de proyectil (por ejemplo, un avión estrellado, etc.). La cimentación 301 puede tener cualquier configuración adecuada en la vista en planta superior, incluyendo sin limitación, poligonal (por ejemplo, rectangular, hexagonal, circular, etc.).

65 En una realización, el peso del recipiente de contención 200 puede soportarse principalmente por la losa inferior 302 sobre la que descansa el recipiente de contención y la estructura de recinto de contención (CES) 300 puede soportarse por la placa de base 304 formada sobre las paredes laterales 303 de la cimentación 301. Pueden usarse otras disposiciones de soporte de recipiente y estructura de recinto de contención (CES) adecuadas.

Continuando con la referencia a las figuras 1-15, el recipiente de estructura de contención 200 puede ser un recipiente alargado que incluye una carcasa cilíndrica hueca 204 con sección transversal circular transversal que define un diámetro exterior D1, una cabeza superior 206 y una cabeza inferior 208. En una realización, el recipiente de contención 200 (es decir, carcasa y cabezas) puede hacerse a partir de una placa metálica adecuadamente dúctil y resistente y metal en barras que es fácilmente soldable (por ejemplo, acero bajo en carbono). En una realización, una carcasa de acero bajo en carbono 204 puede tener un grosor de al menos 1 pulgada (2,54 cm). Pueden utilizarse otros materiales metálicos adecuados de grosor apropiado correspondiente que incluyen diversas aleaciones.

La cabeza superior 206 puede unirse a la carcasa 204 a través de una junta embridada 210 compuesta por una primera brida anular 212 dispuesta en el extremo inferior o parte inferior de la cabeza superior y una segunda brida anular de emparejamiento 214 dispuesta en el extremo superior o parte superior de la carcasa. La junta embridada 210 puede ser una junta con pernos, que opcionalmente puede además soldarse de manera estanca después del montaje con una soldadura de estanqueidad anular que se extiende circunferencialmente que se realiza entre las bridas adyacentes 212 y 214.

La cabeza superior 206 del recipiente de contención 200 puede ser una cabeza convexa y embridada en forma de cúpula de ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos) para añadir resistencia estructural (es decir, retención de presión interna y resistencia al impacto externo); sin embargo, pueden usarse otras configuraciones posibles, incluyendo una cabeza superior plana. La cabeza inferior 208 puede ser de manera similar una cabeza convexa en forma de cúpula o, alternativamente, plana en otras posibles realizaciones. En una construcción de recipiente de contención, la cabeza inferior 208 puede soldarse directamente a el extremo o parte inferior de la carcasa 204 mediante una parte de brida recta integral (SF) de la cabeza que coincide con el diámetro de la carcasa. En una realización, la parte inferior del recipiente de contención 200 puede incluir un pie de soporte con nervaduras 208a o una estructura similar unida a la cabeza inferior 208 para ayudar a estabilizar y proporcionar soporte a nivel para el recipiente de contención en la losa 302 de la cimentación 301, como se describe además en el presente documento.

En algunas realizaciones, la parte superior 216 de la carcasa de recipiente de contención 204 puede ser un segmento diametralmente ampliado de la carcasa que forma un alojamiento para soportar y albergar una grúa polar (no mostrada) para mover equipo, combustible, etc. dentro del recipiente de contención. Esto proporcionará el acceso de la grúa a la periferia interior del recipiente de contención y permitirá la colocación del equipo muy cerca de la periferia del recipiente de contención 200 haciendo que la estructura del recipiente de contención sea compacta. En una configuración, por lo tanto, por encima de la parte de terreno rasante del recipiente de contención 200 puede parecerse a una estructura en forma de hongo.

En una posible realización, la parte superior ampliada 216 del recipiente de contención 200 puede tener un diámetro exterior D2 que es mayor que el diámetro exterior D1 del resto de la parte inferior adyacente 218 de la carcasa de recipiente de contención 204. En un ejemplo no limitante, la parte superior 216 puede tener un diámetro D2 que es aproximadamente 10 pies (3,048 m) más grande que el diámetro D1 de la parte inferior 218 de la carcasa 204. La parte superior 216 de la carcasa 204 puede tener una altura adecuada H2 seleccionada para albergar la grúa polar con margen para espacios de trabajo que pueden ser de menos del 50% de la altura total H1 del recipiente de contención 200. En un ejemplo no limitante, aproximadamente los diez primeros pies (3,048 m) del recipiente de contención 200 (H2) puede formarse por la parte superior de diámetro ampliado 216 en comparación con una altura total H1 de 200 pies (60,96 m) del recipiente de contención. La parte superior 216 del recipiente de contención 200 puede terminar en el extremo superior con una brida 214 en la conexión embridada a la cabeza superior 206 del recipiente de contención.

En una realización, la parte superior diametralmente ampliada 216 del recipiente de contención 200 tiene un diámetro D2 que es menor que el diámetro interior D3 de la estructura de recinto de contención (CES) 300 para proporcionar un hueco (sustancialmente) radial o zona anular secundaria 330 (véase, por ejemplo, la figura 4). Esto proporciona un colchón de espacio o región de amortiguación entre la estructura de recinto de contención (CES) 300 y la parte superior de recipiente de contención 216 en la aparición de un impacto de proyectil sobre la estructura de recinto de contención (CES). Asimismo, la zona anular 330 además crea significativamente una trayectoria de flujo entre la zona anular primaria 313 (entre las carcasas de la estructura de recinto de contención (CES) 300 y el recipiente de contención 200) y el espacio de cabeza 318 entre la cúpula 316 de la estructura de recinto de contención (CES) y la cabeza superior 206 del recipiente de contención 200 para que se ventile vapor y/o aire desde la estructura de recinto de contención (CES) como se describe además en el presente documento. Por consiguiente, la zona anular secundaria 330 está en comunicación de fluido con la zona anular primaria 313 y el espacio de cabeza 318 que a su vez está en comunicación de fluido con el orificio de ventilación 317 que penetra en la cúpula 316. En una realización, la zona anular secundaria 330 tiene una anchura (sustancialmente) radial menor que la zona anular primaria 313.

Haciendo referencia a las figuras 1-4, la estructura de recinto de contención (CES) 300 puede ser una estructura de doble pared que tiene en algunas realizaciones paredes laterales 320 formadas por dos carcasas concéntricas espaciadas (sustancialmente) de manera radial e interconectadas 310 (interior) y 311 (exterior) con hormigón simple o reforzado 312 instalado en el espacio anular entre las mismas. Las carcasas concéntricas 310, 311 pueden hacerse de cualquier material adecuadamente resistente, como, por ejemplo, sin limitación, placas metálicas dúctiles que son fácilmente soldables (por ejemplo, acero bajo en carbono). Pueden usarse otros materiales metálicos adecuados que

incluyen diversas aleaciones. En una realización, sin limitación, la estructura de recinto de contención de doble pared (CES) 300 puede tener un grosor de hormigón 312 de 6 pies (1,8288 m) o más, lo que garantiza una capacidad adecuada para soportar impactos de proyectil de alta energía, así como el de una aeronave.

5 La estructura de recinto de contención (CES) 300 circunscribe la carcasa de recipiente de contención 204 y se separa (sustancialmente) de manera radial de la carcasa 204, creando de ese modo una zona anular primaria 313. La zona anular 313 puede estar llena de agua en una realización para crear un disipador térmico para recibir y disipar calor del recipiente de contención 200 en el caso de un incidente de liberación de energía térmica dentro del recipiente de contención. Este depósito anular lleno de agua preferiblemente se extiende circunferencialmente un total de 360  
10 grados en una realización alrededor del perímetro de las partes superiores de la carcasa de recipiente de contención 204 situado por encima de la cimentación de hormigón 301. La figura 4 muestra una sección transversal de la zona anular llena de agua 313 sin las aletas (sustancialmente) radiales externas 221 en esta figura para mayor claridad. En una realización, la zona anular 313 se llena con agua desde la placa de base 304 en el extremo inferior 314 hasta aproximadamente el extremo superior 315 de las carcasas concéntricas 310, 311 de la estructura de recinto de contención (CES) 300 para formar un depósito de agua de refrigeración anular entre la carcasa de recipiente de contención 204 y la carcasa interior 310 de la estructura de recinto de contención (CES). Este depósito anular puede recubrirse o revestirse en algunas realizaciones con un material resistente a la corrosión adecuado como aluminio, acero inoxidable o un conservante adecuado para la protección contra la corrosión. En un ejemplo representativo, sin limitación, la zona anular 313 puede tener aproximadamente 10 pies (3,048 m) de ancho y aproximadamente 100 pies  
20 (30,48 m) de alto.

En una realización, la estructura de recinto de contención (CES) 300 incluye una cúpula de acero 316 que es gruesa y está reforzada adecuadamente para endurecerla contra el impacto de una aeronave y otros proyectiles incidentes. La cúpula 316 puede fijarse de manera retirable a las carcasas 310, 311 por una junta embridada robusta 318. En una  
25 realización, la estructura de recinto de contención (CES) 300 está completamente rodeada en todas las partes expuestas por encima del terreno rasante por la estructura de recinto de contención (CES) 300, que preferiblemente es suficientemente alta para proporcionar protección para el recipiente de contención contra el peligro de una aeronave o proyectil comparable para preservar la integridad estructural de la masa de agua en la zona anular 313 que rodea el recipiente de contención. En una realización, como se muestra, la estructura de recinto de contención (CES) 300 se extiende verticalmente por debajo del terreno rasante hasta una parte sustancial de la distancia a la parte superior de la placa de base 304.  
30

La estructura de recinto de contención (CES) 300 puede incluir además al menos un orificio de ventilación protegido contra la lluvia 317 que está en comunicación de fluido con el espacio de cabeza 318 debajo de la cúpula 316 y la zona anular llena de agua 313 para permitir que el vapor de agua fluya, escape, y se ventile a la atmósfera. En una  
35 realización, el orificio de ventilación 317 puede ubicarse en el centro de la cúpula 316. En otras realizaciones, una pluralidad de orificios de ventilación pueden proporcionarse espaciados de manera (sustancialmente) radial alrededor de la cúpula 316. El orificio de ventilación 317 puede formarse por una sección corta de tuberías en algunas realizaciones que está cubierta por una cubierta de lluvia de cualquier configuración adecuada que permite que el vapor escape de la estructura de recinto de contención (CES) pero minimiza la entrada de agua.  
40

En algunas posibles realizaciones, el espacio de cabeza 318 entre la cúpula 316 y la cabeza superior 206 del recipiente de contención 200 puede llenarse con un estructura o material de absorción de energía para minimizar la carga de impacto sobre la cúpula 316 de la estructura de recinto de contención (CES) de un impacto (caída) de proyección (por ejemplo, aeronave, etc.). En un ejemplo, una pluralidad de placas de aluminio deformables onduladas o corrugadas de construcción estanca puede estar dispuesta en parte o en todo el espacio de cabeza para formar una zona arrugada que ayudará a absorber y disipar las fuerzas de impacto sobre la cúpula 316.  
45

Haciendo referencia principalmente a las figuras 1-5 y 8-17, las partes enterradas del recipiente de contención 200 dentro de la cimentación de hormigón 301 debajo de la placa de base 304 pueden tener una carcasa plana 204 sin características externas. Sin embargo, partes de la carcasa de recipiente de contención 204 por encima de la placa de base 304 pueden incluir una pluralidad de nervaduras o aletas (sustancialmente) radiales longitudinales externas 220 que se extienden de manera (sustancialmente) axial paralelas al eje vertical VA del conjunto de recinto-recipiente de contención 200-300. Las aletas longitudinales externas 220 están espaciadas circunferencialmente alrededor del  
50 perímetro de la carcasa de recipiente de contención 204 y se extienden (sustancialmente) de manera radial hacia el exterior desde el recipiente de contención.  
55

Las nervaduras 220 sirven para múltiples funciones ventajosas que incluyen sin limitación (1) rigidizar la carcasa de recipiente de contención 204, (2) evitar el exceso de "chapoteo" de la reserva de agua en la zona anular 313 en la  
60 ocurrencia de un caso sísmico, y (3) actuar significativamente como "aletas" de transferencia de calor para disipar calor absorbido por conducción a través de la carcasa 204 al entorno de la zona anular 313 en la situación de un caso de liberación de fluido/vapor en el recipiente de contención.

Por consiguiente, en una realización para maximizar la eficacia de transferencia de calor, las aletas longitudinales 220 se extienden verticalmente durante sustancialmente toda la altura de la zona anular 313 llena de agua cubriendo las  
65 superficies de transferencia de calor efectiva del recipiente de contención 200 (es decir, partes no enterradas en la

cimentación de hormigón) para transferir calor desde el recipiente de contención 200 al depósito de agua, como se describe además en el presente documento. En una realización, las aletas longitudinales externas 220 tienen extremos horizontales superiores 220a que terminan en o próximos al lado inferior o parte inferior de la parte superior de mayor diámetro 216 del recipiente de contención 200, y extremos horizontales inferiores 220b que terminan en o próximos a la placa de base 304 de la cimentación de hormigón 301. En una realización, las aletas longitudinales externas 220 pueden tener una altura H3 que es igual o superior a la mitad de una altura total de la carcasa del recipiente de contención.

En una realización, los extremos horizontales superiores 220a de las aletas longitudinales 220 son extremos libres no unidos de manera permanente (por ejemplo, soldados) al recipiente de contención 200 u otra estructura. Al menos parte de los extremos horizontales inferiores 220b de las aletas longitudinales 220 puede entrar en contacto de manera que pueden ponerse a tope y apoyarse sobre una nervadura circunferencial horizontal 222 soldada a la superficie exterior de la carcasa de recipiente de contención 204 para ayudar a soportar el peso de las aletas longitudinales 220 y minimizar las tensiones en las soldaduras longitudinales de nervadura a carcasa. La nervadura circunferencial 222 es de forma anular y puede extenderse 360 grados completos alrededor de la circunferencia de la carcasa de recipiente de contención 204. En una realización, la nervadura circunferencial 222 se ubica para apoyarse sobre la placa de base 304 de la cimentación de hormigón 301 que transfiere las cargas de las aletas longitudinales 220 a la cimentación. Las aletas longitudinales 220 pueden tener una extensión o anchura lateral que sobresale hacia el exterior más allá del borde periférico exterior de la nervadura circunferencial 222. Por consiguiente, en esta realización, solo las partes internas del extremo horizontal inferior 220b de cada nervadura 220 entra en contacto con la nervadura circunferencial 222. En otras posibles realizaciones, la nervadura circunferencial 222 puede extenderse (sustancialmente) de manera radial hacia el exterior lo suficientemente lejos como para que sustancialmente todo el extremo horizontal inferior 220b de cada nervadura longitudinal 220 se apoye sobre la nervadura circunferencial 222. Los extremos horizontales inferiores 220b pueden soldarse a la nervadura circunferencial 222 en algunas realizaciones para además reforzar y rigidizar las aletas longitudinales 220.

Las aletas longitudinales externas 220 pueden hacerse de acero (por ejemplo, acero bajo en carbono) u otros materiales metálicos adecuados, que incluyen aleaciones que se sueldan cada una en uno de los lados que se extienden longitudinalmente al exterior de la carcasa de recipiente de contención 204. El lado que se extiende longitudinalmente opuesto de cada nervadura 220 se encuentra próximo a, pero preferiblemente no está unido de manera permanente al interior de la carcasa interna 310 de la estructura de recinto de contención (CES) 300 para maximizar la superficie de transferencia de calor de las nervaduras que actúan como aletas de disipación de calor. En una realización, las aletas longitudinales externas 220 se extienden (sustancialmente) de manera radial hacia el exterior más allá de la parte superior de mayor diámetro 216 del recipiente de contención 200 como se muestra. En un ejemplo representativo, sin limitación, las nervaduras de acero 220 pueden tener un grosor de aproximadamente 1 pulgada (2,54 cm). Puede usarse otro grosor adecuado de las nervaduras, según sea apropiado. Por consiguiente, en algunas realizaciones, las nervaduras 220 tienen una anchura radial que es más de 10 veces el grosor de las nervaduras.

En una realización, las aletas longitudinales 220 están orientadas en un ángulo oblicuo A1 con respecto a la carcasa de recipiente de contención 204 como se muestra mejor en las figuras 2-3 y 5. Esta orientación forma una zona arrugada que se extiende 360 grados alrededor de la circunferencia del recipiente de contención 200 para resistir mejor los impactos de proyectil, funcionando de manera conjunta con la estructura de recinto de contención externa (CES) 300. Por consiguiente, un impacto que provoca la deformación hacia el interior de las carcasas de la estructura de recinto de contención (CES) 210, 211 doblará las aletas longitudinales 220 que en el proceso distribuirán las fuerzas de impacto preferiblemente sin transferencia directa a y la ruptura de la carcasa interna del recipiente de contención 204 como puede ocurrir posiblemente con nervaduras orientadas 90 grados con respecto a la carcasa del recipiente de contención 204. En otras posibles realizaciones, dependiendo de la construcción de la estructura de recinto de contención (CES) 300 y otros factores, puede ser apropiada una disposición perpendicular de nervaduras 220 con respecto a la carcasa de recipiente de contención 204.

En una realización, haciendo referencia las figuras 6-8, partes de la carcasa de recipiente de contención 204 que tienen y están protegidas por las aletas externas (sustancialmente) radiales 220 contra impactos de proyectil pueden extenderse por debajo del terreno rasante para proporcionar protección contra ataques de proyectil en o ligeramente por debajo del terreno rasante en la estructura de recinto de contención (CBS) 300. Por consiguiente, la placa de base 304 formada en la parte superior de las paredes laterales que se extienden verticalmente 303 de la cimentación 301 donde las aletas 220 terminan en sus extremos inferiores pueden situarse varios pies por debajo del terreno rasante para mejorar la resistencia al impacto del sistema de contención de reactor nuclear.

En una realización, el recipiente de contención 200 puede incluir opcionalmente una pluralidad de aletas (sustancialmente) radiales internas separadas circunferencialmente 221, unidas a la superficie interior de la carcasa 204 (mostradas como discontinuas en las figuras 2 y 3). Las aletas internas 221 se extienden (sustancialmente) de manera radial hacia el interior desde la carcasa de recipiente de contención 204 y longitudinalmente en una dirección vertical de una altura adecuada. En una realización, las aletas (sustancialmente) radiales internas 221 pueden tener una altura sustancialmente coextensiva con la altura de la zona anular llena de agua 313 y se extienden desde la placa de base 304 hasta aproximadamente la parte superior de la carcasa 204. En una realización, sin limitación, las aletas

internas 221 pueden orientarse sustancialmente perpendiculares (es decir, 90 grados) a la carcasa de recipiente de contención 204. Pueden usarse otros ángulos y orientaciones oblicuas adecuados. Las aletas internas funcionan tanto para aumentar el área de superficie de transferencia de calor disponible como para reforzar estructuralmente la carcasa de recipiente de contención contra impactos externos (por ejemplo, proyectiles) o para aumentar la presión interna dentro del recipiente de contención 200 en el caso de un caso de presurización de contención (por ejemplo, LOCA o paralización rápida de reactor). En una realización, sin limitación, las aletas internas 221 pueden hacerse de acero.

Haciendo referencia a las figuras 1-15, puede unirse una pluralidad de columnas verticales de soporte estructural 331 a la superficie exterior de la carcasa de recipiente de contención 204 para ayudar a soportar la parte superior diametralmente más grande 216 del recipiente de contención 200 que tiene lados periféricos que están en voladizo (sustancialmente) de manera radial hacia el exterior más allá de la carcasa 204. Las columnas de soporte 331 están espaciadas circunferencialmente alrededor del perímetro de la carcasa de recipiente de contención 204. En una realización, las columnas de soporte 331 puede formarse de elementos estructurales huecos de acero, por ejemplo, sin limitación, de elementos en forma de C en sección transversal (es decir, canales estructurales), que se sueldan a la superficie exterior de la carcasa de recipiente de contención 204. Las dos patas paralelas de los canales pueden soldarse verticalmente a la carcasa de recipiente de contención 204 a lo largo de la altura de cada columna de soporte 331 usando o bien soldaduras continuas o bien discontinuas, como soldaduras de puntadas.

Las columnas de soporte 331 se extienden verticalmente hacia abajo, y pueden soldarse en sus extremos superiores a la parte inferior/lado inferior de la parte superior de mayor diámetro 216 del recipiente de contención que aloja la grúa polar. Los extremos inferiores de las columnas de soporte 331 se apoyan en o se sueldan a la nervadura circunferencial 222 que engancha la placa de base 304 de la cimentación de hormigón 301 cerca de la parte enterrada de la contención. Las columnas 331 ayudan a transferir parte de la carga o peso muerto de la grúa y la parte superior 216 del recipiente de contención 300 hacia la cimentación. En una realización, el espacio hueco dentro de las columnas de soporte puede llenarse con hormigón (con o sin barra de refuerzo) para ayudar a rigidizar y además soportar la carga o el peso muerto. En otras posibles realizaciones, pueden usarse otras formas de acero estructural que incluyen vigas de cajón llenas o sin llenar, vigas en I, tubulares, ángulos, etc. Las aletas longitudinales 220 pueden extenderse más lejos hacia el exterior en una dirección (sustancialmente) radial que las columnas de soporte 331, que desempeñan un papel estructural en lugar de un papel de transferencia de calor como las nervaduras 220. En determinadas realizaciones, las nervaduras 220 tienen una anchura (sustancialmente) radial que es al menos el doble de la anchura (sustancialmente) radial de las columnas de soporte.

Las figuras 11-15 muestran diversas secciones transversales (tanto longitudinales como transversales) del recipiente de contención 200 con equipamiento mostrado en el mismo. En una realización, el recipiente de contención 200 puede formar parte de un pequeño sistema de reactor modular (SMR) como el SMR-160 de Holtec International. El equipo puede incluir generalmente un recipiente de reactor nuclear 500 dispuesto en un pozo húmedo 504 y que define un espacio interior que aloja un núcleo de combustible nuclear en el interior y que hace circular refrigerante primario, y un generador de vapor 502 acoplado de manera fluida al reactor y que hace circular un refrigerante secundario que puede formar parte de un ciclo Rankine de generación de energía. Un sistema de este tipo se describe, por ejemplo, en la solicitud de patente internacional n.º PCT/US13/66777 presentada el 25 de octubre de 2013, que se incorpora en el presente documento por referencia en su totalidad. Pueden proporcionarse otros accesorios y equipos para crear un sistema completo de generación de vapor.

#### 45 Sistema de disipación de calor auxiliar

Haciendo referencia principalmente ahora a las figuras 2-3, 16, y 18, el recipiente de contención 200 puede incluir además un sistema de disipación de calor auxiliar 340 que comprende una serie o conjunto discreto de conductos disipadores térmicos 610 (HDD). En una realización, el sistema de disipación térmica auxiliar 340 y los conductos disipadores térmicos 610 asociados pueden formar parte de un sistema de refrigeración de núcleo de reactor pasivo descrito en más detalle a continuación y mostrado en las figuras 22 y 23.

Los conductos disipadores de calor 610 incluyen una pluralidad de conductos longitudinales internos 341 (es decir, elementos de conducción de flujo) espaciados circunferencialmente alrededor de la circunferencia de la carcasa de recipiente de contención 204. Los conductos 341 se extienden verticalmente paralelos al eje vertical VA y en una realización se unen a la superficie interior de la carcasa 204. Los conductos 341 pueden hacerse de metal como acero y se sueldan al interior de la carcasa 204. En una configuración posible, sin limitación, los conductos 341 pueden estar compuestos por canales estructurales en forma de C orientados verticalmente (en sección transversal) o medias secciones de tubería/tubo situadas de manera que las patas paralelas de los canales o tubería/tubos estén cada una soldadas por costura a la carcasa 204 en toda su altura para definir un elemento de conducción de flujo vertical sellado. El fluido (fase líquida o vapor) en los conductos disipadores térmicos en esta realización, por lo tanto, entra directamente en contacto con el recipiente de contención de reactor 200 para maximizar la transferencia de calor a través del recipiente al agua en el depósito anular (zona anular primaria 313) que forma un disipador térmico para el recipiente de contención de reactor 200 y los conductos disipadores térmicos. Para este tipo de construcción pueden proporcionarse otros conductos disipadores térmicos 341 de forma y configurados de manera adecuada, siempre que el fluido transportado en los conductos entre en contacto con al menos una parte de la carcasa interior de recipiente

de contención 204 para transferir calor a la zona anular llena de agua 313.

En otras realizaciones aceptables posibles, pero menos preferidas, los conductos disipadores térmicos 341 pueden formarse de elementos de conducción de flujo de paredes completamente tubulares (por ejemplo, secciones de tubería o tubo circunferenciales completas en lugar de medias secciones) que se sueldan a la carcasa interior de recipiente de contención 204. En este tipo de construcciones, el fluido transportado en los conductos 341 transferirá calor indirectamente a la carcasa de recipiente de contención de reactor 204 a través de la pared de los conductos primero, y luego a la zona anular llena de agua 313.

Cualquier número y disposición de conductos 341 adecuado puede proporcionarse dependiendo del área de superficie de transferencia de calor requerida para refrigerar el fluido que fluye a través de los conductos. Los conductos 341 pueden estar espaciados de manera uniforme o no uniforme en el interior de la carcasa de recipiente de contención 204 y, en algunas realizaciones, pueden distribuirse circunferencialmente agrupaciones de conductos agrupados alrededor del recipiente de contención. Los conductos 341 pueden tener cualquier dimensión en sección transversal adecuada, dependiendo del caudal del fluido transportado por los conductos y de consideraciones de transferencia de calor.

Los extremos superiores e inferiores abiertos 341a, 341b de los conductos 341 están cada uno conectados de manera fluida a un colector de anillo de entrada superior común 343 y un colector de anillo de salida inferior 344. Los colectores de anillo de forma anular 343, 344 están espaciados verticalmente y situados a elevaciones adecuadas en el interior del recipiente de contención 200 para maximizar la transferencia de calor entre el fluido que fluye verticalmente dentro de los conductos 341 y la carcasa 204 del recipiente de contención en la zona de transferencia de calor activa definida por partes del recipiente de contención que tiene las aletas longitudinales externas 220 en la zona anular primaria 313. Para aprovechar la zona anular primaria llena de agua 313 para la transferencia de calor, los colectores de anillo superior e inferior 343, 344 pueden ubicarse cada uno respectivamente en el interior de la carcasa de recipiente de contención 204 adyacente y cerca de la parte superior e inferior de la zona anular.

En una realización, los colectores de anillo 343, 344 pueden estar formados cada uno por medias secciones de tubería de acero curvada de manera arqueada como se muestra, que se sueldan directamente a la superficie interior de la carcasa de recipiente de contención 204 de la manera mostrada. En otras realizaciones, los colectores de anillo 343, 344 pueden formarse por secciones completas de tuberías curvadas de manera arqueada soportadas por y unidas al interior de la carcasa 204 por cualquier medio adecuado.

En una realización, el sistema de disipación de calor 340 está conectado de manera fluida a una fuente de vapor que puede generarse a partir de una masa de agua dentro del recipiente de contención 200 al disipar calor de desintegración de material radiactivo del núcleo de reactor. La superficie de contención encerrada por los conductos 341 sirve como superficie de transferencia de calor para transmitir el calor latente del vapor dentro de los conductos a la carcasa 204 del recipiente de contención 200 para la refrigeración a través de las aletas longitudinales externas 220 y la zona anular llena de agua 313. En funcionamiento, entra vapor en el colector de anillo de entrada 343 y se distribuye a los extremos de entrada abiertos de los conductos 341 que penetran en el colector. El vapor entra en los conductos 341 y fluye hacia abajo en los mismos a lo largo de la altura de la carcasa de recipiente de contención 204 interior y experimenta un cambio de fase de vapor (vaporosa) a líquido. El vapor condensado drena hacia abajo por gravedad en los conductos y se recoge por el colector de anillo inferior 344 desde el que se devuelve de nuevo a la fuente de vapor también preferiblemente por gravedad en una realización. Debe indicarse que no se implican o se requieren bombas en el proceso mencionado anteriormente.

Se apreciará que, en determinadas realizaciones, más de una serie o conjunto de conductos disipadores térmicos 610 puede proporcionarse y disponerse en la superficie interior del recipiente de contención interno 200 dentro del espacio de contención definido por el recipiente.

#### Sistema de refrigeración de aire auxiliar

Según otro aspecto de la presente divulgación, se proporciona un sistema de refrigeración de aire pasivo secundario o de respaldo 400 para iniciar la refrigeración de aire por convección natural del recipiente de contención 200 si, por alguna razón, la reserva de agua en la zona anular primaria 313 se agotara durante un caso relacionado con reactor térmico (por ejemplo, LOCA o paralización rápida de reactor). Haciendo referencia a la figura 8, el sistema de refrigeración de aire 400 puede estar compuesto por una pluralidad de elementos de conducción de aire de entrada vertical 401 espaciados circunferencialmente alrededor del recipiente de contención 200 en la zona anular primaria 313. Cada elemento de conducción de aire 401 incluye una entrada 402 que penetra en las paredes laterales 320 de la estructura de recinto de contención (CES) 300 y está abierta a la atmósfera exterior para atraer aire de refrigeración de entorno. Las entradas 402 se sitúan preferiblemente cerca del extremo superior de las paredes laterales de la estructura de recinto de contención 320. Los elementos de conducción de aire 401 se extienden verticalmente hacia abajo dentro de la zona anular 313 y terminan una corta distancia por encima de la placa de base 304 de la cimentación (por ejemplo, aproximadamente 1 pie (0,3048 m) para permitir que el aire escape de los extremos inferiores abiertos de los elementos de conducción.

Al usar los elementos de conducción de aire 401, se establece una trayectoria de flujo de aire de refrigeración por convección natural en cooperación con la zona anular 313. En caso de que la reserva de agua de refrigeración en la zona anular primaria 313 se agote por evaporación durante un caso térmico, se inicia la refrigeración de aire automáticamente por convección natural, ya que el aire dentro de la zona anular continuará calentándose por el recipiente de contención 200. El aire calentado se eleva en la zona anular primaria 313, pasa a través de la zona anular secundaria 330, entra en el espacio de cabeza 318, y sale de la cúpula 316 de la estructura de recinto de contención (CES) 300 a través del orificio de ventilación 317 (véanse las flechas de flujo direccional, figura 8). El aumento de aire calentado crea una reducción de presión de aire hacia la parte inferior de la zona anular primaria 313 suficiente para atraer el ambiente de exterior hacia abajo a través de los elementos de conducción de aire 401 creando de ese modo un patrón de circulación de aire natural que continúa refrigerando el recipiente de contención calentado 200. Ventajosamente, esta circulación y sistema de refrigeración de aire pasivo pueden continuar durante un período indefinido de tiempo para refrigerar el recipiente de contención 200.

Debe indicarse que la zona anular primaria 313 actúa como el último disipador térmico para el calor generado dentro del recipiente de contención 200. El agua de este depósito anular también actúa para mantener la temperatura de todas las columnas de soporte vertical 331 de la grúa (descritas anteriormente) a esencialmente la misma temperatura garantizando, por tanto, la nivelación de los carriles de la grúa (no mostrados) en todos los momentos en los que se montan en la parte más grande 216 del recipiente de contención 200.

Ahora se describirá brevemente el funcionamiento del sistema de contención de reactor 100 como intercambiador de calor, con referencia inicial a la figura 19. Esta figura es una representación diagramática simplificada del sistema de contención de reactor 100 sin todos los accesorios y estructuras descritas en el presente documento para mayor claridad en la descripción de los procesos de transferencia de calor y disipación activos realizados por el sistema.

En el caso de un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA), el refrigerante líquido o fluido de alta energía (que normalmente puede ser agua) se derrama en el entorno de contención formado por el recipiente de contención 200. El líquido se convierte instantáneamente en vapor y el vapor se mezcla con el aire dentro de la contención y migra a la superficie interior de las paredes laterales o carcasa 204 del recipiente de contención 200 (dado que la carcasa de la contención está más refrigerada debido al agua en la zona anular 313). El vapor entonces se condensa en las paredes verticales de carcasa perdiendo su calor latente a la estructura de contención metálica que a su vez disipa el calor al agua en la zona anular 313 a través de las aletas longitudinales 220 y partes expuestas de la carcasa 204 dentro de la zona anular. El agua en la zona anular 313 se calienta y eventualmente se evapora formando un vapor que se eleva en la zona anular y deja la estructura de recinto de contención (CES) 300 a través de la zona anular secundaria 330, el espacio de cabeza 318, y finalmente el orificio de ventilación 317 a la atmósfera.

Como el depósito de agua en la zona anular 313 se ubica fuera del entorno de recipiente de contención, en algunas realizaciones la reserva de agua puede reponerse fácilmente usando medios externos si están disponibles para compensar la pérdida evaporativa de agua. Sin embargo, si no se proporciona o está disponible agua de reabastecimiento, entonces la altura de la columna de agua en la zona anular 313 comenzará a disminuir. A medida que cae el nivel del agua en la zona anular 313, el recipiente de contención 200 también comienza a calentar el aire en la zona anular por encima del nivel del agua, disipando de ese modo una parte del calor al aire que se eleva y se ventila desde la estructura de recinto de contención (CES) 300 a través del orificio de ventilación 317 con el vapor de agua. Cuando el nivel de agua desciende suficientemente de manera que los extremos inferiores abiertos de los elementos de conducción de aire 401 (véase, por ejemplo, la figura 8) pasan a estar expuestos por encima de la línea de agua, entonces se extraerá aire de ambiente fresco de exterior de los elementos de conducción de aire 401 como se ha descrito anteriormente para iniciar un patrón de circulación de aire por convección natural que continúa refrigerando el recipiente de contención 200.

En una realización, se proporcionan provisiones (por ejemplo, línea de entrada de agua) a través de la estructura de recinto de contención (CES) 300 para el reabastecimiento de agua en la zona anular 313, aunque esto no es necesario para garantizar una disipación de calor adecuada. La masa de la reserva de agua en este depósito anular se dimensiona de manera que el calor de desintegración producido en el recipiente de contención 200 ha disminuido suficientemente de manera que la contención es capaz de disipar todo su calor a través de refrigeración de aire solo una vez que la reserva de agua se agota. El recipiente de contención 200 preferiblemente tiene suficiente capacidad de disipación térmica para limitar la presión y temperatura de la mezcla de vapor dentro del recipiente de contención (dentro de sus límites de diseño) disipando rápidamente la energía térmica.

En el caso de un apagón de estación, el núcleo de reactor se fuerza a entrar en una "paralización rápida" y los sistemas de refrigeración de núcleo pasivos disiparán el calor de desintegración del núcleo en forma de vapor dirigido al colector de anillo de entrada superior 343 del sistema de disipación de calor 340 ya descrito en el presente documento (véanse, por ejemplo, las figuras 16 y 18). El vapor que fluye entonces hacia abajo a través de la red de conductos longitudinales internos 341 entra en contacto con la superficie interior de la carcasa de recipiente de contención 204 encerrada dentro de los conductos de disipación de calor y se condensa disipando su calor latente a la estructura de contención metálica, que a su vez disipa el calor al agua en la zona anular a través de la ayuda de transferencia de calor proporcionada por las aletas longitudinales 220. El agua en el depósito anular (zona anular primaria 313) se calienta finalmente evaporándose. El recipiente de contención 200 disipa el calor a la zona anular por calentamiento sensible y luego por

una combinación de evaporación y refrigeración de aire, y luego además finalmente por refrigeración de aire por convección natural solo como se describe en el presente documento. Como se mencionó anteriormente, el sistema de contención de reactor 100 está diseñado y configurado de modo que la refrigeración de aire sola sea suficiente para disipar el calor de desintegración una vez que la reserva de agua efectiva en la zona anular 313 esté completamente agotada.

En ambos escenarios mencionados anteriormente, la disipación de calor puede continuar indefinidamente hasta que estén disponibles medios alternativos para volver a poner la planta en línea. El sistema se hace funcionar no solo indefinidamente, sino que el funcionamiento es completamente pasivo sin el uso de ninguna bomba o intervención de operario.

#### Sistema de refrigeración de reactor pasivo

Según otro aspecto de la invención, se proporciona un sistema de refrigeración de reactor nuclear impulsado por gravedad pasivo para disipar el calor de desintegración del reactor durante un apagado de reactor (por ejemplo, "paralización rápida") sin ninguna dependencia ni desventajas de bombas y motores. En una realización, un sistema de refrigeración de apagado de reactor nuclear pasivo 600 puede comprender un sistema de refrigeración de haz sumergido 602 (SBCS) que incluyen componentes mostrados generalmente en las figuras 21-23.

El sistema de refrigeración de haz sumergido 602 es preferiblemente un sistema de flujo presurizado de circuito cerrado compuesto por tres partes o subsistemas principales, concretamente (i) un intercambiador de calor de haz sumergido 620 (SBHX), (ii) una serie o conjunto discreto de conductos disipadores térmicos 610 (HDD) conectados de manera íntegra a la pared interior de la estructura de contención (descrita en detalle anteriormente), y (iii) el generador de vapor 502 con un recipiente a presión de reactor o sobrecalentador 500 tal como se describe además en el presente documento. Las trayectorias de flujo de vapor y condensado se establecen entre estos componentes como se describe a continuación. El sistema de refrigeración de haz sumergido 602 se configura para utilizar el vapor secundario en el generador de vapor para extraer la energía térmica generada por el núcleo de combustible en un proceso de circuito cerrado durante un apagado de reactor que puede continuar indefinidamente en ausencia de una fuente preparada de energía eléctrica.

El generador de vapor 502 se describe más detalladamente en la solicitud PCT internacional n.º PCT/US13/38289 presentada el 25 de abril de 2013, que se incorpora en el presente documento por referencia en su totalidad. Como se describe en la misma y se muestra en las figuras 11, 12 y 24 de la presente solicitud, el generador de vapor 502 puede orientarse verticalmente y alargarse axialmente de manera similar al intercambiador de calor de haz sumergido 620. El generador de vapor 502 puede estar compuesto por un conjunto de intercambiadores de calor tubulares dispuestos en una pila vertical configurada para extraer el calor de desintegración del reactor del refrigerante primario por medios de flujo pasivo impulsados por gravedad.

Los circuitos de flujo de circulación del refrigerante primario (agua líquida) y del refrigerante secundario (agua de alimentación líquida y vapor) a través del recipiente de reactor y el generador de vapor durante el funcionamiento normal del reactor y la planta de energía con un suministro eléctrico disponible producido por el conjunto de estación turbina-generador (T-G) se muestra en la figura 24 en el presente documento. El refrigerante primario fluye entre el generador de vapor acoplado de manera fluida 502 y el recipiente de reactor 500 forma un primer circuito de flujo cerrado para los fines de la presente discusión. En una realización, el flujo de refrigerante primario se impulsa por gravedad basándose en el cambio de temperatura y densidad correspondiente del refrigerante a medida que se calienta en el recipiente de reactor 500 por el núcleo de combustible nuclear 501, y luego se refrigera en el generador de vapor 502 a medida que el calor se transfiere al circuito de refrigerante secundario del ciclo Rankine que impulsa el conjunto de turbina-generador. La cabeza de presión creada por las diferentes densidades variantes del refrigerante primario (es decir, caliente - menor densidad y frío - mayor densidad) induce el flujo o la circulación a través del sistema de recipiente de generación de vapor-recipiente de reactor, como se muestra en las flechas de flujo direccional.

En general, con respecto al circuito de flujo cerrado, el refrigerante primario se calienta por el núcleo de combustible nuclear 501 y fluye hacia arriba en la columna ascendente 224. A continuación, el refrigerante primario del recipiente de reactor 500 fluye a través del acoplamiento de fluido de refrigerante primario 273 entre el recipiente de reactor 500 y el generador de vapor 502 y entra en el generador de vapor. El refrigerante primario fluye hacia arriba en la tubería ascendente ubicada de manera central 337 a un presurizador 380 en la parte superior del generador de vapor. El refrigerante primario invierte la dirección y fluye hacia abajo a través del lado de tubo del generador de vapor 502 y vuelve hasta el recipiente de reactor 500 a través del acoplamiento de fluido 273 donde entra en un tubo de descenso anular 222 para completar el circuito de flujo de refrigerante primario.

El generador de vapor 502 puede incluir tres secciones de transferencia de calor apiladas verticalmente, desde la parte inferior hasta una sección de precalentador 351, una sección de generador de vapor 352 y una sección de sobrecalentador 350 (véanse, por ejemplo, las figuras 11, 12 y 24). El refrigerante secundario fluye sobre el lado de carcasa del recipiente de generador de vapor 502. El refrigerante secundario en forma de agua de alimentación líquida del conjunto de turbina-generador (T-G) del ciclo Rankine entra en el generador de vapor en la parte inferior en la sección de precalentador 351 y fluye hacia arriba a través de la sección de generador de vapor 352 convirtiéndose en

vapor. El vapor fluye hacia arriba hacia arriba en la sección de sobrecalentador 350 y alcanza condiciones de sobrecalentamiento. A partir de ahí, se extrae el vapor sobrecalentado y fluye hacia el conjunto de T-G para producir potencia eléctrica.

5 Haciendo referencia ahora a las figuras 21-23, el intercambiador de calor de haz sumergido 620 incluye un recipiente a presión 621 que define un eje longitudinal LA y que tiene una carcasa cilíndrica hueca 625 que define una cavidad interna 626 y cabezas superiores e inferiores opuestas 622, 623 en extremos opuestos 624, 627 de la carcasa. Las cabezas 622, 623 pueden ser de cualquier tipo y configuración adecuado, incluyendo planos, esféricos, hemisféricos, etc. La cavidad interna 626 se extiende completamente entre las cabezas superiores e inferiores 622, 623. El recipiente a presión 621 puede ser axialmente alargado y tener una orientación vertical en una realización como se muestra para promover el flujo gravitatorio. Preferiblemente, el intercambiador de calor 620 está montado y dispuesto en el interior del recipiente 202 de la estructura de contención 200 por encima del recipiente de reactor 500 y en relativamente proximidad cercana al generador de vapor 502. El acoplamiento estrecho del intercambiador de calor 620 y del generador de vapor 502 minimiza la longitud de recorrido de las tuberías de vapor y condensado (véanse también las figuras 11 y 13) y conserva el espacio horizontal minimizando de ese modo el diámetro necesario para que el recipiente de contención 200 aloje el recipiente de reactor 500, el generador de vapor 502 y el intercambiador de calor. Cualquier base estructural adecuada 650 puede proporcionarse para montar y sostener el intercambiador de calor 620 del recipiente de contención interior 200 preferiblemente de una plataforma o suelo de acero y/o hormigón estructural en el recipiente para soportar adecuadamente el peso del intercambiador de calor.

20 En el recipiente de intercambiador de calor 621 se mantiene una reserva o depósito (es decir, volumen) de agua de refrigeración W (líquido) que actúa como disipador térmico para refrigeración del refrigerante secundario durante el caso de apagado de reactor, como se describe además en el presente documento. Por consiguiente, el agua de refrigeración W sirve como disipador térmico de un tercer refrigerante que tiene una temperatura inicial que es menor que la temperatura inicial del refrigerante secundario durante un apagado.

El intercambiador de calor de haz sumergido 620 puede ser un recipiente a presión cilíndrico relativamente grande 621 que aloja un haz de tubos de intercambiador de calor 630 relativamente más pequeño, dispuesto en el interior como se muestra en la figura 21. En un ejemplo, sin limitación, un recipiente a presión 621 puede tener un diámetro exterior de aproximadamente 10 pies (3,048 m) y una altura de aproximadamente 20 pies (6,096 m) mientras que el haz de tubos 630 alojado en el mismo puede ser circular en forma transversal, presentando un diámetro de aproximadamente 4 pies (1,2192 m) y una altura menor que la altura del recipiente a presión. Pueden proporcionarse otras dimensiones adecuadas. Por consiguiente, el haz de tubos 630 en esta realización no llena sustancialmente toda la cavidad 626 del recipiente a presión 621.

35 Preferiblemente, el haz de tubos 630 puede colocarse más cerca del extremo inferior 627 y la cabeza 623 que el extremo superior 624 y la cabeza 622 (véase, por ejemplo, la figura 21). Esta colocación ayuda a garantizar que el haz de tubos 630 permanezca sustancialmente sumergido por la mayoría o preferiblemente toda su altura en la reserva de agua líquida W almacenada en el recipiente a presión 621. Por consiguiente, en algunas realizaciones el haz de tubos 630 está completamente rodeado por y sumergido en el condensado líquido en todos los lados y partes. El haz de tubos 630 puede elevarse y separarse por encima de la cabeza inferior 623 del recipiente a presión de intercambiador de calor 625 para proporcionar una profundidad suficiente de agua debajo del haz para permitir el flujo por debajo del haz de tubos en el lado de carcasa del recipiente. Puede usarse cualquier disposición adecuada de soportes estructurales y abrazaderas dentro del recipiente a presión 625 para soportar de manera fija el conjunto de haz de tubos 630.

El recipiente a presión 621 puede hacerse de cualquier metal adecuado capaz de soportar las presiones de vapor y funcionamiento previstas del generador de vapor 502. En algunas realizaciones, el recipiente a presión 621 puede formarse de un material resistente a la corrosión como acero inoxidable sin limitación. Pueden usarse otros materiales metálicos resistentes a la corrosión.

El haz de tubos 630 se dispone en la cavidad 626 del recipiente a presión 621. En una configuración no limitante, el conjunto de haz de tubos 630 puede incluir una cámara impelente de flujo de entrada 631 que define una lámina de tubo superior 632, una cámara impelente de flujo de salida 633 que define una lámina de tubo inferior 634 y separada de la lámina de tubo superior, y una pluralidad de tubos 635 que se extienden entre y se acoplan de manera fluida a las láminas de tubo superior e inferior. Cada una de las láminas de tubo 632, 634 incluye una pluralidad de aberturas de flujo 636, 637, respectivamente, que están en comunicación de fluido con las cámaras impelentes de flujo de entrada y salida 631, 633 y tubos 635. En funcionamiento y la descripción de la trayectoria de flujo, el flujo entra en la cámara impelente de flujo de entrada 631 y a través de las aberturas 636 en un extremo de los tubos 635, sale del extremo opuesto de los tubos 635 a través de las aberturas 637 en la cámara impelente de salida 633, y sale de la cámara impelente de salida.

En una realización, los tubos 635 de haz de tubos 630 pueden ser alargados axialmente y orientados verticalmente tal como se muestra. Sin embargo, otras orientaciones son posibles, como horizontal, y dispuestas en ángulo entre horizontal y vertical. Los tubos 635 pueden tener cualquier forma adecuada incluyendo, sin limitación, recta, curvilínea como enrollado de manera helicoidal (véase, por ejemplo, la figura 21) u otra configuración curvilínea, u otra forma

apropiada. En una realización preferida, los tubos pueden tener una forma curvilínea que maximiza el área de superficie de transferencia de calor disponible sin requerir tanta altura como los tubos rectos que tienen la misma área de superficie. Puede usarse cualquier tubo de diámetro adecuado y disposición/patrón de tubos. Por ejemplo, pueden proporcionarse una o varias filas de tubos 635; dependiendo el número al menos en parte de los requisitos de transferencia de calor para el intercambiador de calor 620. En una realización, el haz de tubos 630 puede tener una forma generalmente circular en sección transversal.

Pueden formarse tubos 635 de cualquier metal adecuado preferiblemente resistente a la corrosión que tenga propiedades de transferencia de calor conductoras adecuadas para una aplicación dada. Algunos ejemplos no limitantes de los materiales de tubo que pueden usarse incluyen acero inoxidable, aluminio, titanio, aleaciones de acero resistentes a la corrosión, Inconel®, Monel® u otros.

Cada una de las cámaras impelentes de flujo de entrada y salida 631 y 633 comprende un cuerpo exterior sustancialmente hueco de cualquier forma adecuada que forma un límite de presión y una cámara impelente interior abierta. Las láminas de tubo 632, 634 pueden tener cualquier grosor y forma adecuada en plano, incluyendo plana y arqueada (por ejemplo, si las cámaras impelentes son formas como secciones de tubería) y en la vista en planta superior (por ejemplo, circular para un haz de tubos de sección transversal redonda). Las láminas de tubo y cámaras impelentes pueden formarse de cualquier metal o aleación metálica resistente a la corrosión adecuado, algunos ejemplos de los mismos se mencionan anteriormente con respecto a posibles materiales para los tubos 635.

El intercambiador de calor de haz sumergido 620 puede estar interconectado de manera fluida variable y acoplado con el generador de vapor 502, el recipiente de reactor 500, y conductos disipadores de calor 610 por tuberías de vapor y condensado adecuadas 603 mostradas en las figuras 22 y 23. Las tuberías 603 están configuradas para establecer las trayectorias de flujo mostradas en estas figuras. Cualquier tipo adecuado de tuberías y materiales puede usarse para las tuberías 603 que pueden depender en parte de si el recorrido de tubería es para el transporte de condensado o vapor y sus temperaturas y presiones de servicio asociadas previstas. En algunas realizaciones, por ejemplo, sin limitación, las tuberías preferiblemente pueden hacerse de un metal resistente a la corrosión como acero o aleación de acero inoxidable. Está bien dentro del ámbito de los expertos en la técnica seleccionar y diseñar tuberías apropiadas y accesorios relacionados, como valvulería. En particular, no se involucran bombas para establecer las trayectorias de flujo mostradas en las figuras 22 y 23 que se impulsan por gravedad.

Ahora se describirá brevemente el funcionamiento del sistema de refrigeración de reactor 600. Durante el caso de apagado de reactor planteado, como un apagón de estación o un caso similar en el que cesa la generación de energía a partir del turbogenerador y los sistemas activos normales no seguros no están disponibles, las válvulas principales de aislamiento de vapor y agua de alimentación (no mostradas) se cierran primero para aislar el generador de vapor 502 de la parte de generación de energía de contención adicional del ciclo Rankine. Por consiguiente, las válvulas de aislamiento detienen el flujo de vapor del generador de vapor 502 al conjunto de turbina-generador (T-G) y el flujo de vuelta de agua de alimentación al generador de vapor devuelto del conjunto T-G de una manera conocida para los expertos en la técnica sin elaboración adicional. El exceso de vapor se puede descargar primero a la atmósfera antes de cerrar las válvulas de aislamiento principales. El cierre de las válvulas de aislamiento principales activa el sistema de refrigeración de núcleo de reactor 600. Dos posibles escenarios o métodos de funcionamiento potencial para emplear el sistema de refrigeración 600 se dan a conocer y se describen en más detalladamente a continuación, los cuales continúan refrigerando pasivamente (es decir, sin potencia eléctrica) el reactor en el caso de un apagado para retirar calor de desintegración usando el sistema de refrigeración de haz sumergido 602.

En un primer escenario o método de funcionamiento para refrigeración del reactor mostrado en la figura 22, el vapor producido en el generador de vapor 502 en el lado de carcasa en la mitad superior del recipiente de generador de vapor (por calor de desintegración residual generado a partir del reactor ahora apagado) se extrae y se dirige al intercambiador de calor de haz sumergido 620 donde se condensa dentro de los tubos 635 del intercambiador de calor de haz sumergido 620 (véase también la figura 21). El vapor de condensación cede su calor latente al volumen o reserva de agua W (el tercer refrigerante) almacenada en el lado de carcasa del recipiente a presión de intercambiador de calor de haz sumergido 621 que rodea el haz de tubos 630.

En una realización, el haz de tubos 630 puede sumergirse completamente en la reserva de agua W dentro del intercambiador de calor 620 de modo que el agua proporciona el medio de refrigeración en el exterior de los tubos 635 para condensar el vapor. En una realización, el haz de tubos 630 preferiblemente puede colocarse cerca del eje longitudinal LA que coincide con la línea central axial del intercambiador de calor de haz sumergido 620 para rodear uniformemente el haz de tubos con agua W en todos los lados para promover una refrigeración uniforme de todos los tubos 635 en haz. Sin embargo, son posibles otras posiciones de montaje del haz de tubos. El flujo de entrada de vapor y el flujo de salida de condensado recogido puede controlarse y mantenerse pasivamente mediante un diseño adecuado de la valvulería, las tuberías u otros dispositivos de control de flujo (por ejemplo, orificios, etc.) que no dependan de una fuente de energía eléctrica u otra fuente de energía para su funcionamiento.

En el lado de tubo del haz de tubos de intercambiador de calor 630, el vapor extraído del generador de vapor 502 puede entrar en el recipiente a presión de intercambiador de calor 621 en cualquier ubicación conveniente. En una realización, las tuberías de entrada de vapor 603 pueden penetrar lateralmente a través de la carcasa de recipiente a

presión 625 y las tuberías pueden extenderse dentro del recipiente a presión de intercambiador de calor 621 hasta la cámara impelente de entrada 631 del haz de tubos 630 a la que está acoplado de manera fluida. Otras ubicaciones de entrada de vapor pueden usarse como, sin limitación, a través de la cabeza superior 622.

5 El condensado recogido en la cámara impelente inferior 633 del haz de tubos 630 se devuelve entonces al lado de carcasa del generador de vapor 502 a través de las tuberías 603, puramente por flujo de gravedad natural. La tubería de salida de condensado 503 puede ubicarse en las proximidades generales hacia o cerca de la parte inferior 627 del recipiente a presión de intercambiador de calor 621 y se vuelve a introducir en el generador de vapor 502 en un punto de inyección (por ejemplo, sección de precalentador 351) inferior al punto de extracción de vapor del generador de vapor (por ejemplo, una sección de sobrecalentador 350) que se suministra al intercambiador de calor de haz sumergido 620. Se establece un segundo circuito de flujo cerrado entre el generador de vapor 502 y el lado de tubo del intercambiador de calor de haz sumergido 620 (es decir, haz de tubos 630). En el interior del recipiente a presión 621 pueden dirigirse las tuberías adecuadas entre la cámara impelente inferior 633 y la carcasa 625 del recipiente, que se acopla entonces a las tuberías de salida de condensado 503 conectadas al generador de vapor 503.

15 Continuando con la referencia al primer escenario o método de funcionamiento mostrado en la figura 22, la reserva de agua W fuera de los tubos 635 en el lado de carcasa del recipiente a presión de intercambiador de calor de haz sumergido 621 (que está aislado de manera fluida y separado del condensado en el lado de tubo del haz de tubos 630) se calienta condensando vapor dentro del haz de tubos que transfiere calor al agua. El agua W actúa como un disipador de calor para refrigerar el refrigerante secundario durante un caso de apagado de reactor. Por consiguiente, el agua W sirve como tercer refrigerante que tiene una temperatura inicial que es menor que la temperatura inicial del refrigerante secundario durante un apagado. El agua W se calienta gradualmente durante el proceso de apagado de reactor. Después de un período de tiempo, el agua W alcanza la temperatura de punto de ebullición a la que una parte de la reserva de agua se convierte en vapor. El vapor se acumula en un espacio de vapor formado por encima de la línea de agua L en el recipiente a presión 621 debajo de la cabeza superior 622.

20 Para refrigerar la reserva de agua W (tercer refrigerante) que proporciona el fluido de refrigeración para condensar el vapor de refrigerante secundario dentro del haz de tubos 630, se extrae el vapor acumulado en el lado de carcasa y se dirige a través de las tuberías adecuadas 603 a los conductos disipadores de calor 610 del sistema auxiliar de disipación de calor 340 descrito en detalle anteriormente. El vapor fluye a través de los conductos disipadores de calor 610 y se condensan de la manera ya descrita. Específicamente, el agua en el depósito anular (zona anular primaria 313) como una temperatura inferior a la temperatura del tercer vapor de refrigerante para formar un disipador de calor para condensar el tercer vapor de refrigerante que transfiere calor al depósito. El condensado se devuelve entonces al intercambiador de calor de haz sumergido 620 a través de las tuberías adecuadas 603 y entra en el lado de carcasa del recipiente a presión 621 donde se vuelve a introducir en la reserva de agua W. Este sistema de refrigeración ayuda a mantener sustancialmente el nivel de agua manteniendo el haz de tubos 630 sumergido en agua W por debajo de la línea de agua L. Este sistema forma además un tercer circuito de flujo cerrado de vapor y condensado usando los conductos disipadores de calor 610 para condensar el vapor que es distinto y aislado del segundo circuito de flujo cerrado formado en el lado de tubo del intercambiador de calor de haz sumergido 620 y el generador de vapor 502. En resumen, los circuitos de flujo cerrado primero y segundo describen en el presente documento la función para refrigerar el refrigerante primario y el refrigerante secundario, respectivamente. El tercer circuito de flujo cerrado refrigera el fluido de refrigeración del intercambiador de calor de haz sumergido 620 (es decir, disipador de calor de agua formado por una reserva de agua W) que contribuye indirectamente a la refrigeración del refrigerante secundario frente al haz de tubos 630.

45 En el segundo escenario o método de funcionamiento alternativo para refrigerar el reactor mostrado en la figura 23, el refrigerante primario en el recipiente de reactor 500 se refrigera directamente por el intercambiador de calor de haz sumergido 620 en lugar de usar el vapor que continúa produciéndose en el generador de vapor 502 por el calor de desintegración de reactor. En esta disposición de proceso, una vez las válvulas de aislamiento de vapor y agua de alimentación están cerradas, el refrigerante primario caliente de la columna ascendente 224 del recipiente a presión de reactor ("rama caliente") se dirige a través de las tuberías 603 directamente al lado de tubo del haz de tubos 630 en el intercambiador de calor de haz sumergido 620 (véanse las figuras 23 y 24). El refrigerante primario se refrigerará disipando su calor al agua de lado de carcasa W en el intercambiador de calor de haz sumergido 620 de una manera muy similar a la mostrada en la figura 22 y descrita anteriormente, mientras que fluye hacia abajo dentro de los tubos 635. Una diferencia es que el refrigerante primario permanece siempre sustancialmente en estado líquido durante todo el proceso de refrigeración y también cuando circula a través del recipiente de reactor 500. Esta refrigeración crea un flujo de circulación natural debido a la cabeza de flotación creada por la diferencia de densidad entre el refrigerante primario caliente en la entrada al intercambiador de calor de haz sumergido 620 y el refrigerante primario frío en la salida del intercambiador de calor. El refrigerante primario más frío se dirige a través de las tuberías adecuadas 603 y se vuelve a introducir en la región de descenso anular 222 del recipiente de reactor 500 ("rama fría"). La mayor elevación de intercambiador de calor de haz sumergido 620 con respecto al recipiente de reactor 500 y el tamaño de las tuberías 603 que dirigen el refrigerante primario al intercambiador de calor pueden diseñarse para garantizar que hay un flujo de circulación natural adecuado para disipar el calor desde el núcleo hasta el agua de lado de carcasa W en el intercambiador de calor.

65 En ambos métodos primero y segundo para refrigerar el reactor descrito anteriormente, la cantidad de agua W en la

cavidad 626 del intercambiador de calor de haz sumergido 620 es preferiblemente suficiente para retirar el calor de desintegración del núcleo de reactor (a través del refrigerante primario) a través de calentamiento sensible de agua de lado de carcasa en la fase inicial del caso de parada del reactor planteado cuando la generación calor de desintegración está en su punto más alto. Esto puede lograrse en parte ajustando adecuadamente el volumen de almacenamiento y el tamaño del recipiente a presión de intercambiador de calor de haz sumergido 621.

Se describirá brevemente la interacción de funcionamiento del sistema de refrigeración de reactor 600 y el sistema de refrigeración de aire 400 de la estructura de contención. Como se ha descrito anteriormente, el resto del calor no usado en el vapor de condensación dentro del haz de tubos 630 del intercambiador de calor 620 conduce a la producción de vapor en el lado de carcasa del intercambiador de calor calentando la reserva de agua W. Este vapor de lado de carcasa se dirige a los conductos disipadores de calor 610 donde el vapor se condensa disipando su calor latente a la estructura de contención (por ejemplo, recipiente de contención interior 200). El recipiente de contención 200 disipa el calor al agua en la zona anular 313 entre la estructura de contención y la estructura de recinto de contención 300 (y finalmente a la atmósfera o disipador térmico final) del sistema de protección de contención de reactor pasivo descrito en el presente documento. El vapor condensado de los conductos disipadores de calor 610 entonces se drena de vuelta a un colector de recogida (cabezal de anillo de salida inferior 344 mostrado en las figuras 16 y 18) que a su vez dirige el condensado de vuelta al intercambiador de calor de haz sumergido 620 puramente por gravedad. A medida que se evapora la reserva de agua de refrigeración en la zona anular 313 entre el recipiente de contención interior 200 y la estructura de recinto de contención exterior 300, el recipiente de contención interior 200 expuesto calentará el calor disipado al aire que ahora ocupa la zona anular 313 por convección natural. Los conductos de aire de entrada 401 (a través de succión) espaciados circunferencialmente alrededor del recipiente de contención 200 en la zona anular primaria 313 proporcionan un suministro de aire fresco (véase, por ejemplo, la figura 16 y la descripción anterior). Una vez que toda el agua en la zona anular 313 se ha evaporado, el recipiente de contención 200 continuará disipando calor solo por refrigeración de aire. La refrigeración de aire después de un período de refrigeración de agua prolongado (que retira una parte significativa del calor de desintegración de reactor) es suficiente para retirar todo el calor de desintegración. Dado que el sistema de refrigeración de haz sumergido 602 es un sistema de flujo natural de circuito cerrado, el proceso de refrigeración puede continuar indefinidamente. Se apreciará que variaciones y combinaciones de los dos métodos anteriores pueden usarse para refrigerar pasivamente el reactor durante un caso de apagado de reactor sin energía. Si bien la descripción anterior y los dibujos representan algunos sistemas de ejemplo, se entenderá que pueden hacerse diversas adiciones, modificaciones y sustituciones en el mismo sin apartarse del alcance definido en las reivindicaciones adjuntas. En particular, para los expertos en la técnica será evidente que la presente invención puede ponerse en práctica en otras formas, estructuras, disposiciones, proporciones, tamaños y con otros elementos, materiales y componentes, sin apartarse del espíritu o características esenciales de la misma. Además, pueden hacerse numerosas variaciones en los métodos/procesos descritos en el presente documento. Un experto en la técnica además apreciará que la invención puede usarse con muchas modificaciones de estructura, disposición, proporciones, tamaños, materiales y componentes y, de otra manera, usarse en la práctica de la invención, que se adaptan particularmente a entornos específicos y requisitos de funcionamiento sin apartarse de los principios de la presente invención. Por lo tanto, realizaciones actualmente dadas a conocer deben considerarse en todos los aspectos como ilustrativas y no restrictivas, definiéndose el alcance de la invención por las reivindicaciones adjuntas y equivalentes de las mismas, y no limitado a la descripción o realizaciones anteriores. En su lugar, las reivindicaciones adjuntas deben interpretarse en sentido amplio, para incluir otras variantes y realizaciones de la invención, que pueden hacerse por los expertos en la técnica sin apartarse del alcance de la invención.

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema de refrigeración de apagado de reactor nuclear pasivo que comprende:
  - 5 - un alojamiento de recipiente de reactor (500), un núcleo de combustible nuclear (501), conteniendo el alojamiento de recipiente de reactor (500) un refrigerante primario calentado por el núcleo de combustible nuclear (501);
  - 10 - un generador de vapor (502) acoplado de manera fluida al recipiente de reactor (500) y que contiene un refrigerante secundario líquido; circulando el refrigerante primario en un primer circuito de flujo cerrado entre el recipiente de reactor (500) y el generador de vapor (502), transfiriendo el refrigerante primario calor al refrigerante secundario en el generador de vapor (502) y produciendo vapor de refrigerante secundario;
  - 15 - un intercambiador de calor (620) que incluye una reserva de un tercer refrigerante líquido y un haz de tubos (630), el haz de tubos (630) sumergido en el tercer refrigerante; circulando el refrigerante secundario por flujo gravitatorio en un segundo circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos sumergido (630) y el generador de vapor (502);
  - 20 en el que el vapor de refrigerante secundario se extrae del generador de vapor (502) y fluye en el segundo circuito de flujo cerrado al haz de tubos (630), se condensa formando condensado y el condensado fluye de vuelta al generador de vapor (502);
  - 25 en el que el recipiente de reactor (500), el generador de vapor (502) y el intercambiador de calor (620) se disponen comúnmente en el interior de un recipiente de contención de reactor metálico (500);
  - 30 en el que el vapor de refrigerante secundario de condensación transfiere calor a la reserva de tercer refrigerante líquido en el intercambiador de calor (620) y produce tercer vapor de refrigerante y el tercer vapor de refrigerante se extrae del intercambiador de calor (620) y fluye en un tercer circuito de flujo cerrado a una serie de conductos disipadores de calor (610), se condensa formando tercer refrigerante líquido, y el tercer refrigerante líquido fluye de vuelta al intercambiador de calor (620), reponiendo de ese modo la reserva de tercer refrigerante líquido.
- 35 2. El sistema según la reivindicación 1, en el que se extrae vapor en una ubicación más alta del generador de vapor (502) que donde el condensado vuelve al generador de vapor (502).
- 40 3. El sistema según la reivindicación 1, en el que el recipiente de reactor (500), el generador de vapor (502) y el intercambiador de calor (620) son todos de forma verticalmente alargada.
- 45 4. El sistema según la reivindicación 1, en el que los conductos disipadores de calor (610) están unidos de manera solidaria al recipiente de contención de reactor (500), transfiriendo calor el tercer vapor de refrigerante a través de los conductos disipadores de calor (610) al recipiente de contención de reactor (500) y se condensa en tercer refrigerante líquido.
- 50 5. El sistema según la reivindicación 1, que comprende, además, un depósito (313) que contiene agua que rodea el recinto de contención de reactor (300).
- 55 6. El sistema según la reivindicación 1, en el que el agua en el depósito (313) tiene una temperatura inferior a la temperatura del tercer vapor de refrigerante para formar un disipador térmico para condensar el tercer vapor de refrigerante.
- 60 7. El sistema según la reivindicación 5 o 6, en el que el depósito (313) tiene una forma anular y se forma entre el recipiente de contención de reactor (500) y una estructura de recinto de contención exterior.
- 65 8. Un sistema de refrigeración de apagado de reactor nuclear pasivo que comprende:
  - un alojamiento de recipiente de reactor (500), un núcleo de combustible nuclear (501), conteniendo el alojamiento de recipiente de reactor (500) un refrigerante primario calentado por el núcleo de combustible nuclear (501);
  - un intercambiador de calor (620) que incluye una reserva de agua de refrigeración y un haz de tubos (630), el haz de tubos (630) sumergido en el agua de refrigeración; circulando el refrigerante primario por flujo gravitatorio en un primer circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos sumergido (630) y el recipiente de reactor (500);
  - en el que el refrigerante primario transfiere calor a la reserva de agua de refrigeración en el intercambiador

de calor (620) y se refrigera antes de fluir de vuelta al recipiente de reactor (500);

en el que el refrigerante primario transfiere calor a la reserva de agua de refrigeración en el intercambiador de calor (620) y produce vapor de agua de reserva de refrigeración;

5 en el que el vapor de refrigerante se extrae del intercambiador de calor (620) y fluye en un segundo circuito de flujo cerrado por gravedad a una serie de conductos disipadores de calor (610), se condensa formando agua de refrigeración de reserva de líquido, y el refrigerante líquido fluye de vuelta al intercambiador de calor (620) reponiendo de ese modo la reserva de agua de refrigeración.

10 9. El sistema según la reivindicación 8, en el que el recipiente de reactor y el intercambiador de calor (620) están dispuestos comúnmente dentro de un recipiente de contención de reactor metálico (500).

15 10. Un método para refrigerar de manera pasiva un reactor nuclear después del apagado, comprendiendo el método:

- calentar un refrigerante primario en un recipiente de reactor (500) con un núcleo de combustible nuclear (501);

20 - calentar un refrigerante secundario en un generador de vapor (502) con el refrigerante primario calentado para producir vapor de refrigerante secundario;

- extraer el vapor de refrigerante secundario del generador de vapor (502);

25 - hacer fluir el vapor de refrigerante secundario extraído a través de un haz de tubos (630) sumergido en una reserva de

- agua de refrigeración en un recipiente a presión (621);

30 - condensar el vapor de refrigerante secundario formando un condensado de refrigerante secundario; devolver el condensado de refrigerante secundario al generador de vapor (502);

- calentamiento del agua de refrigeración en el recipiente a presión (621) por el vapor de refrigerante secundario; convertir una parte del agua de refrigeración en fase de vapor;

35 - extraer el vapor de agua de refrigeración del recipiente a presión (621);

- hacer fluir el vapor de agua de refrigeración extraído a través de conductos disipadores de calor (610) unidos a un recipiente de contención de reactor en comunicación térmica con un disipador térmico; condensar el vapor de agua de refrigeración; y

40 - devolver el agua de refrigeración condensada al recipiente a presión (621) para reponer la reserva de agua de refrigeración;

45 en el que el vapor de refrigerante secundario y el condensado circulan por gravedad a través de un primer circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos (630) y el generador de vapor (502).

50 11. Un método para refrigerar de manera pasiva un reactor nuclear después del apagado, comprendiendo el método:

- calentar un refrigerante primario en un recipiente de reactor (500) con un núcleo de combustible nuclear (501); extraer el refrigerante primario calentado del recipiente de reactor (500);

55 - hacer fluir el refrigerante primario calentado a través de un haz de tubos (630) sumergido en una reserva de agua de refrigeración en un recipiente a presión (621);

- refrigerar el refrigerante primario calentado para bajar su temperatura; y devolver el refrigerante primario refrigerado al recipiente de reactor (500);

60 - calentamiento del agua de refrigeración en el recipiente a presión (621) por el refrigerante primario;

convertir una parte del agua de refrigeración en fase de vapor; extraer el vapor de agua de refrigeración del recipiente a presión (621);

65 - hacer fluir el vapor de agua de refrigeración extraído en un segundo circuito de flujo cerrado a través de conductos disipadores de calor (610) unidos a un recipiente de contención de reactor (500) en comunicación

térmica con un disipador térmico;

- condensar el vapor de agua de refrigeración; y

5 - devolver el agua de refrigeración condensada en el segundo circuito de flujo cerrado por gravedad al recipiente a presión (621) para reponer la reserva de agua de refrigeración;

en el que el refrigerante primario circula por gravedad a través de un primer circuito de flujo cerrado entre el haz de tubos (630) y el recipiente de reactor (500).

10

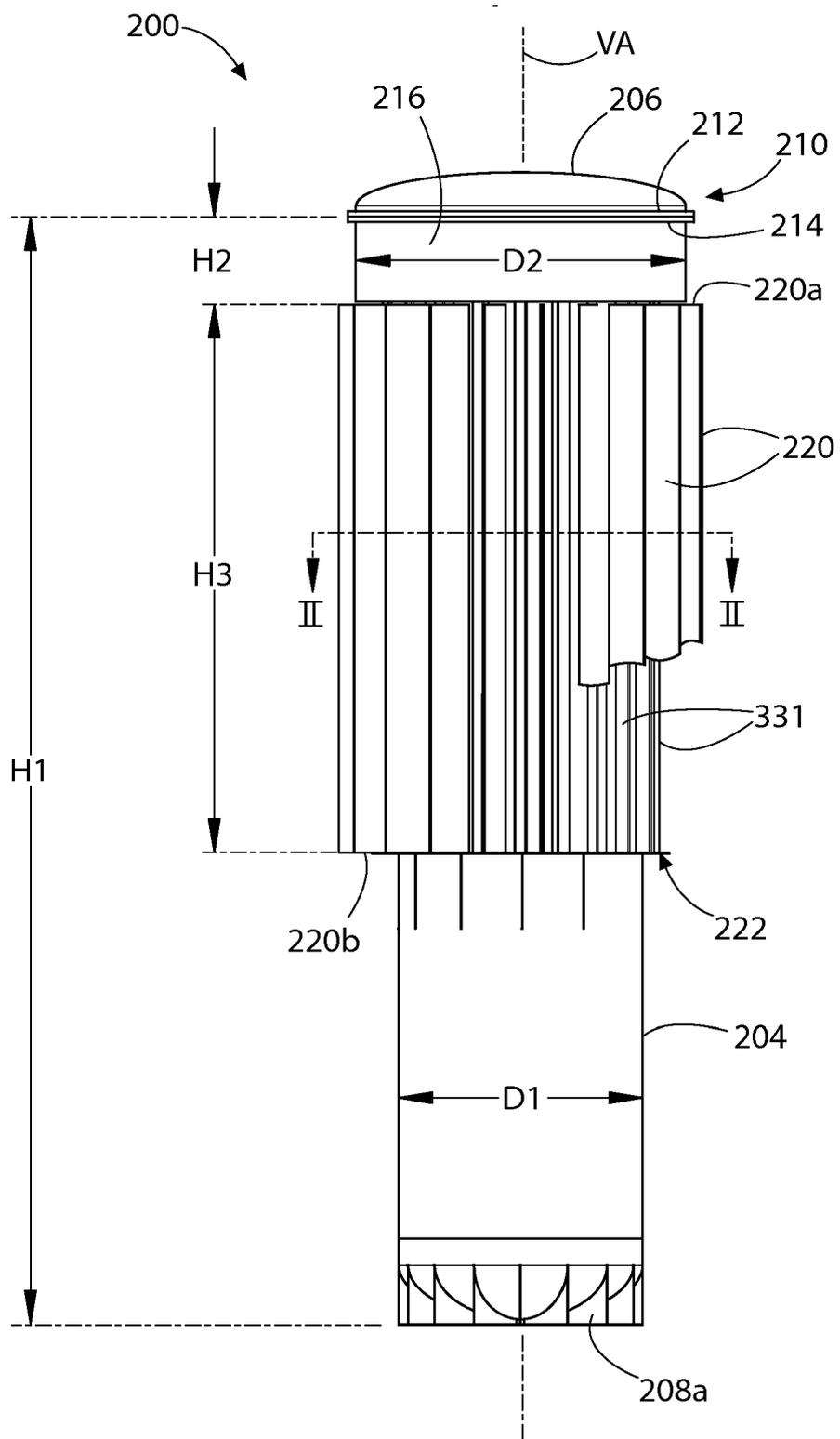


FIG. 1

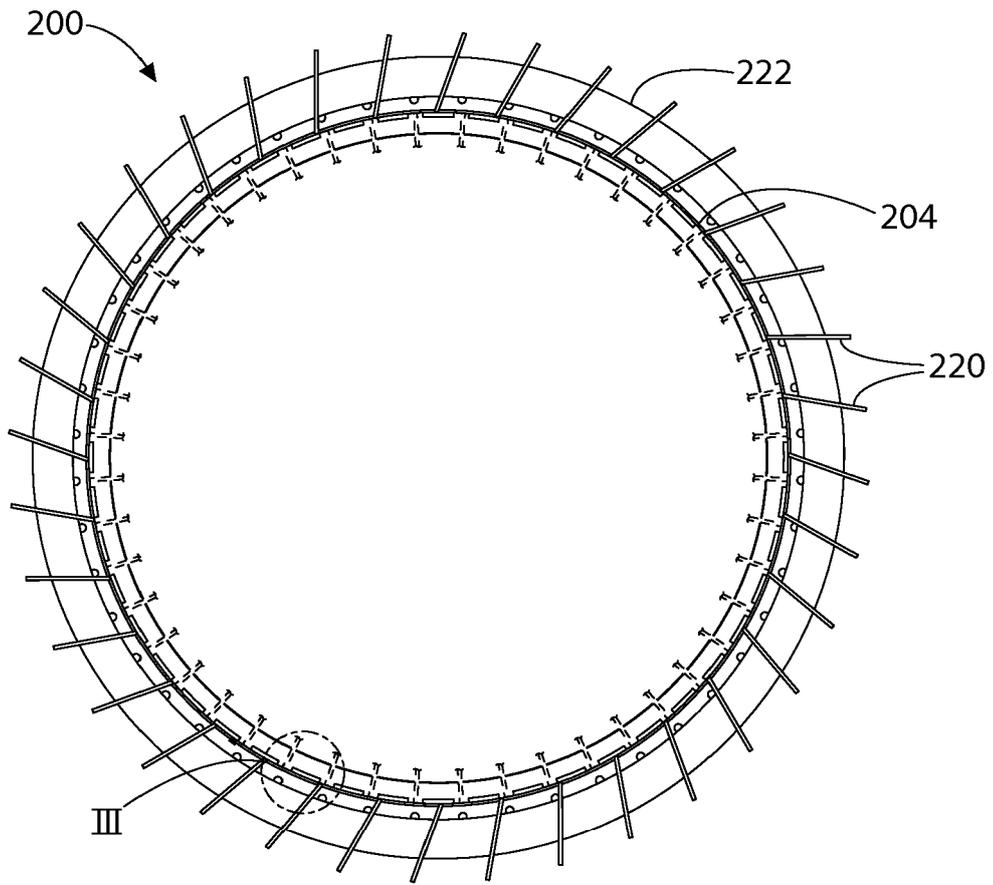


FIG. 2

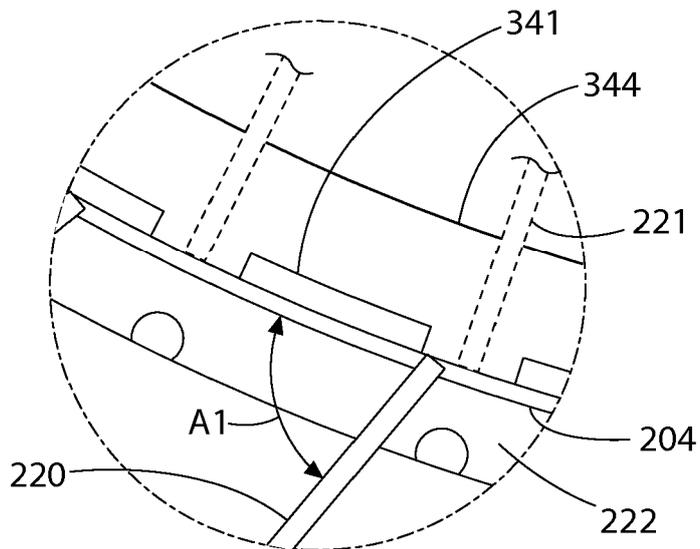


FIG. 3



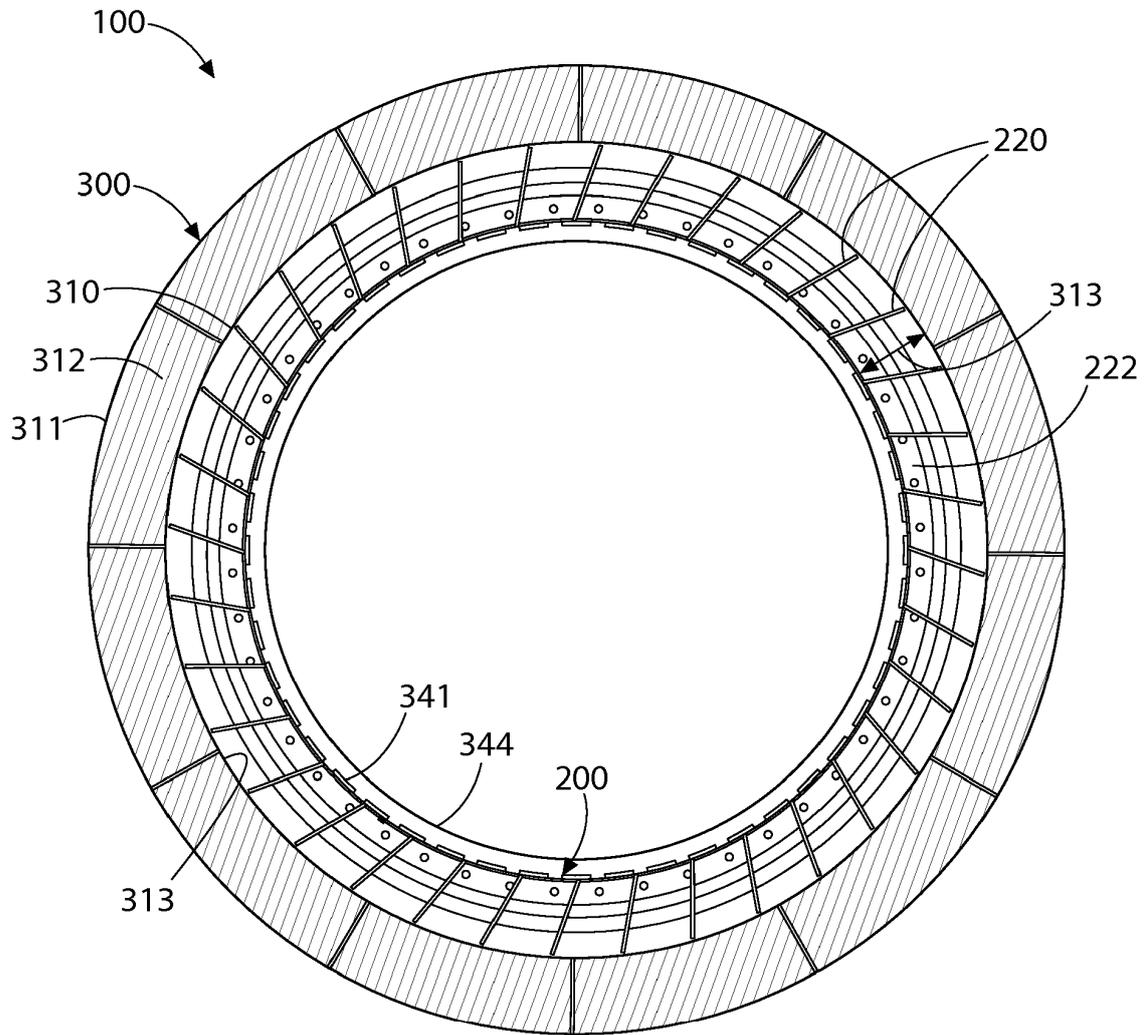


FIG. 5

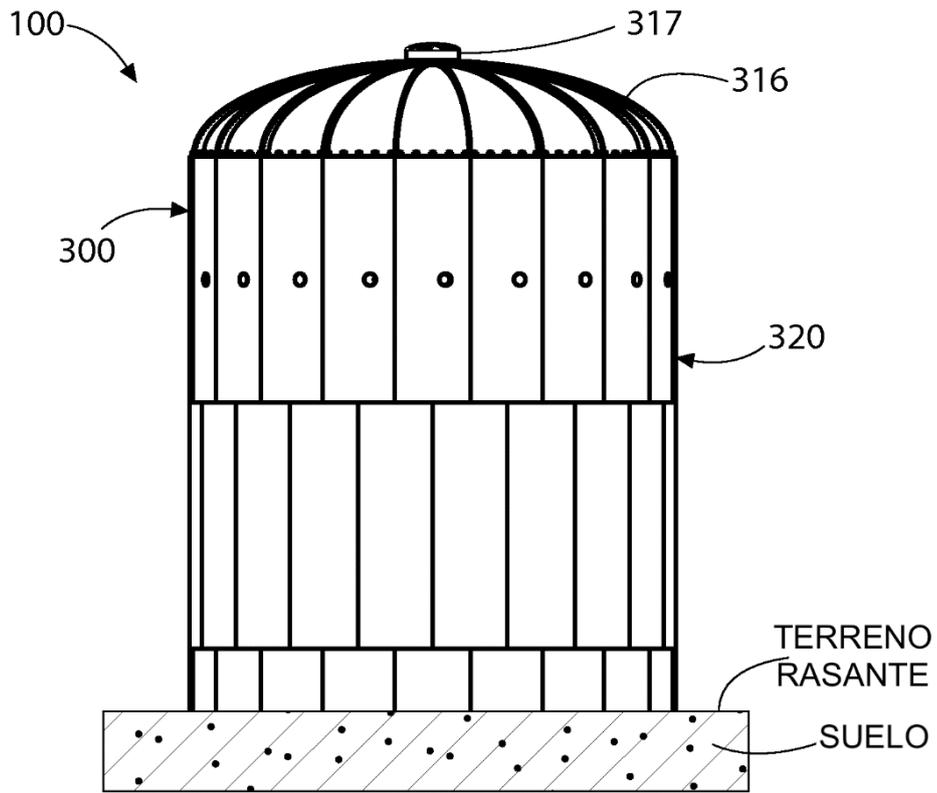


FIG. 6

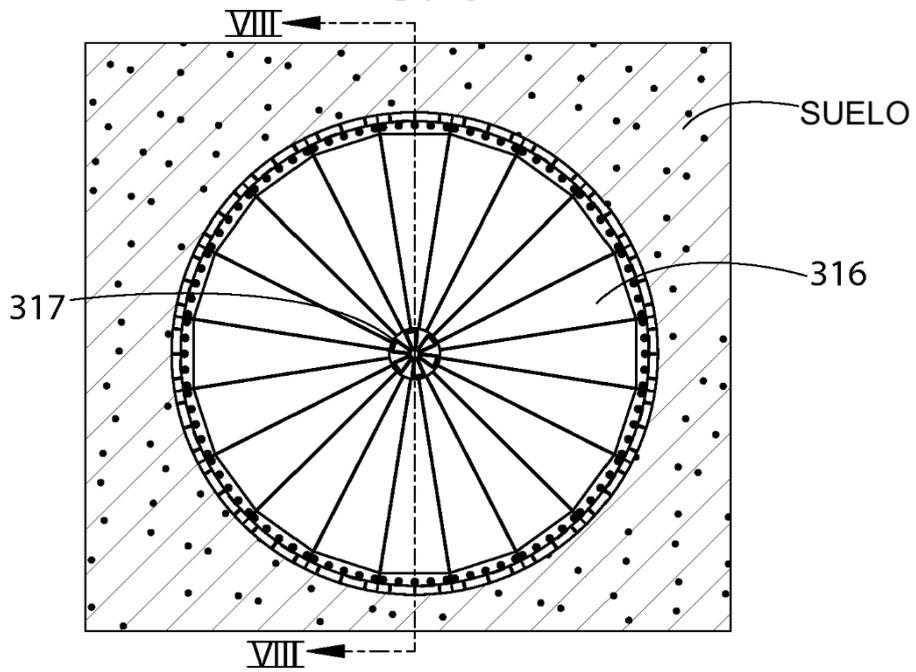
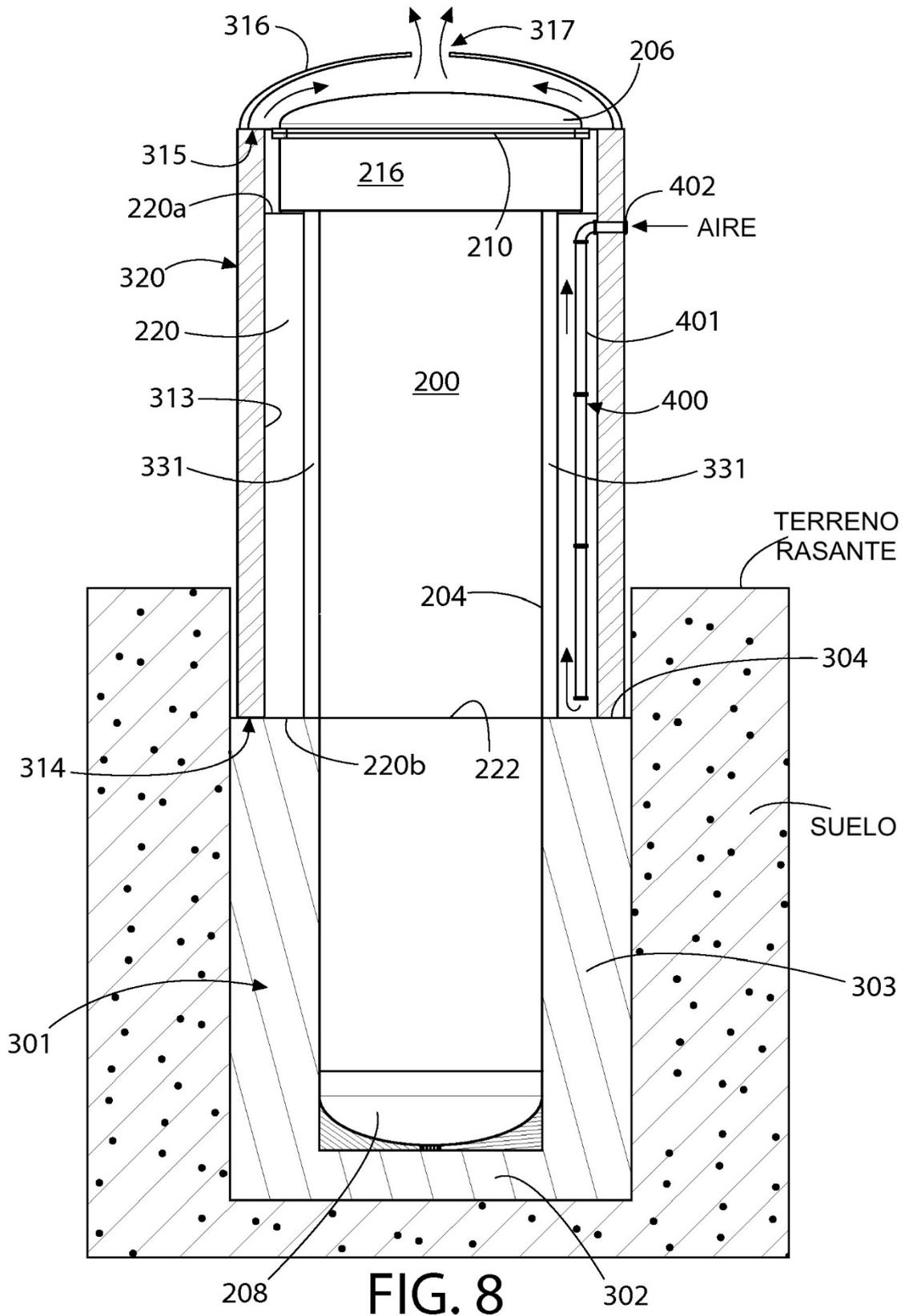


FIG. 7



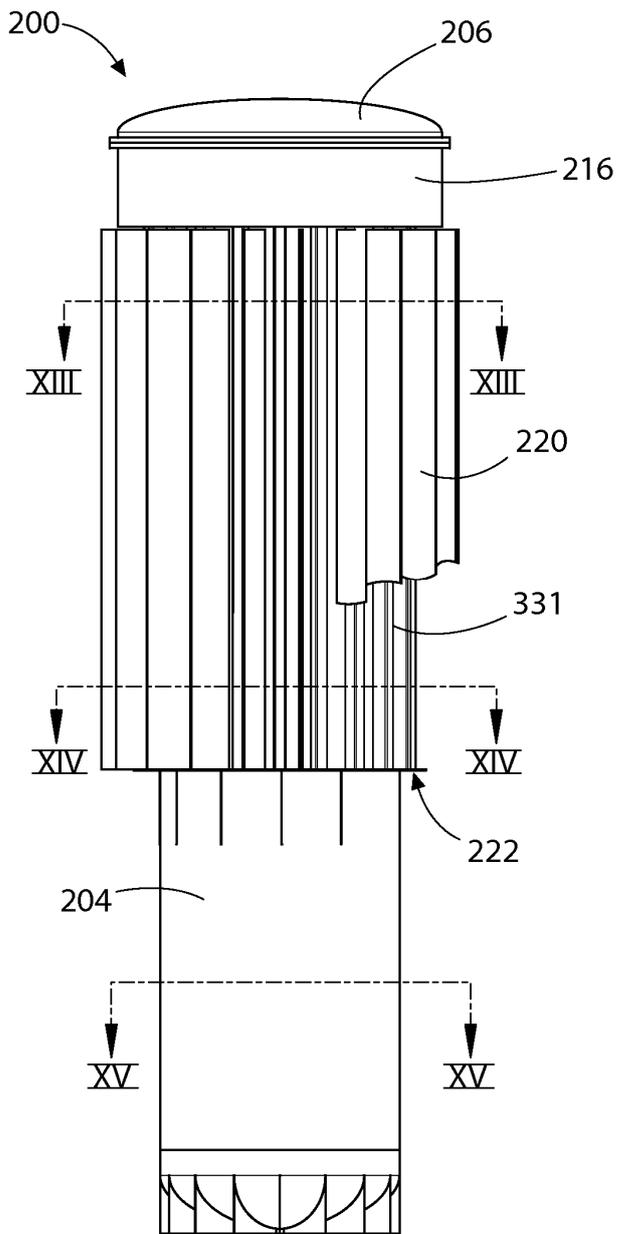


FIG. 9

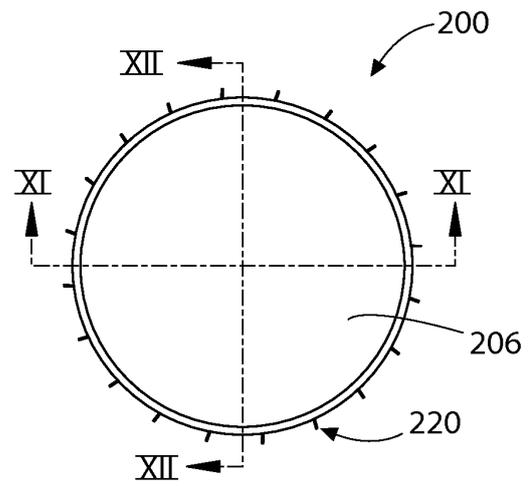


FIG. 10

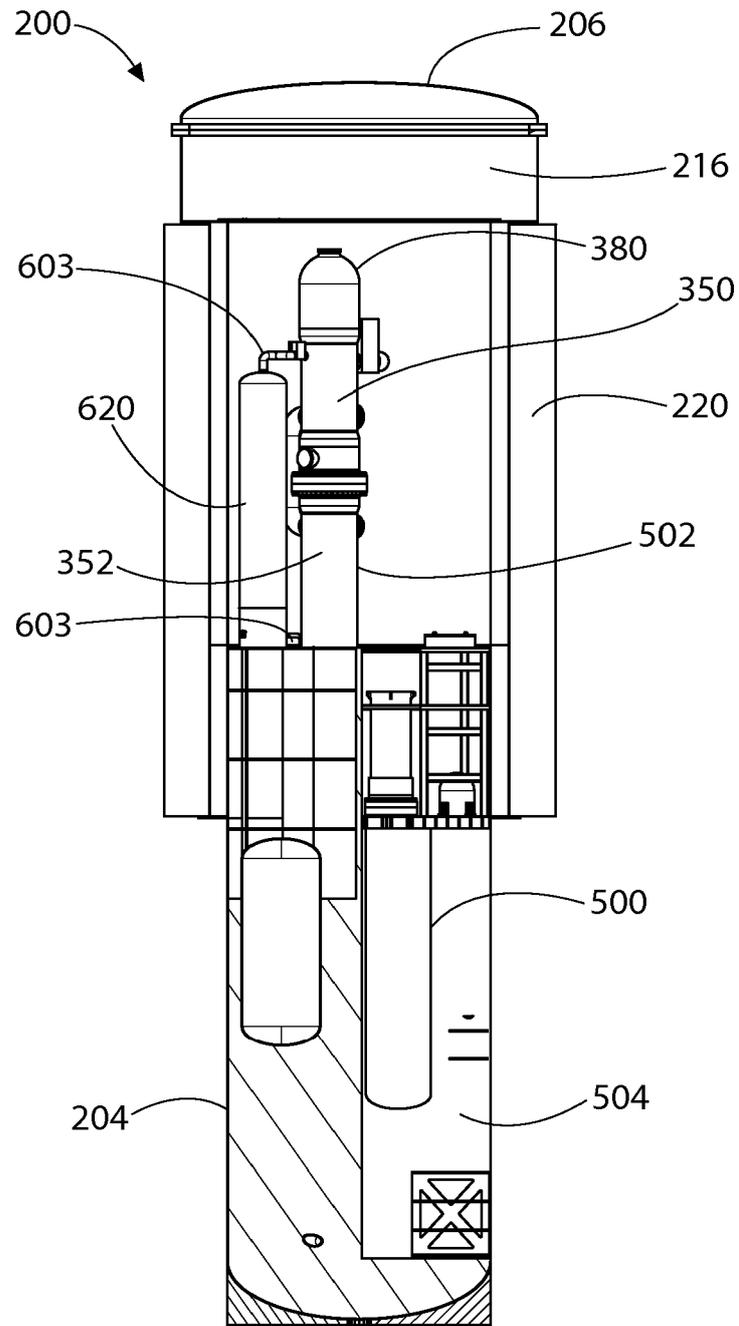


FIG. 11

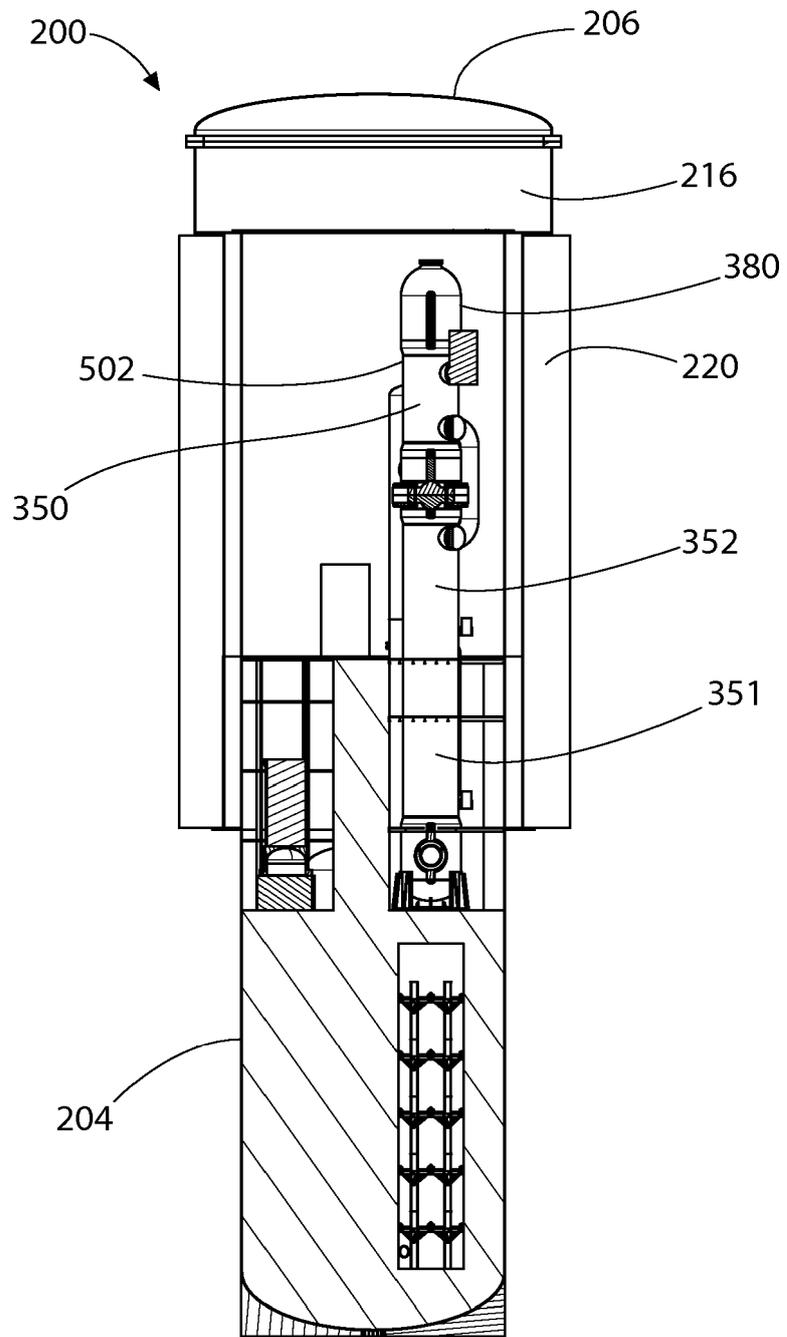


FIG. 12

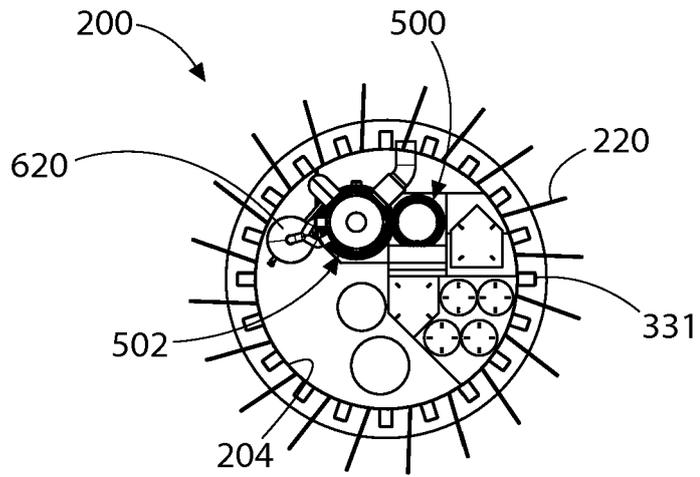


FIG. 13

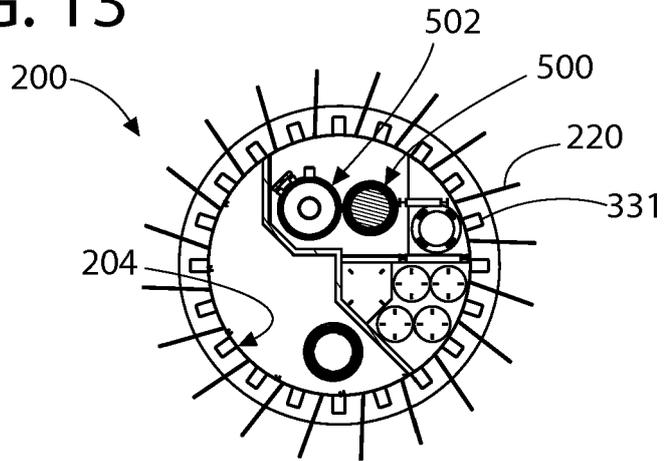


FIG. 14

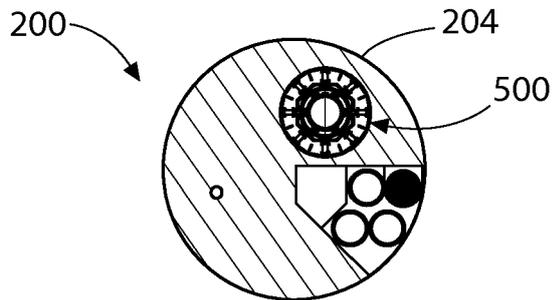


FIG. 15

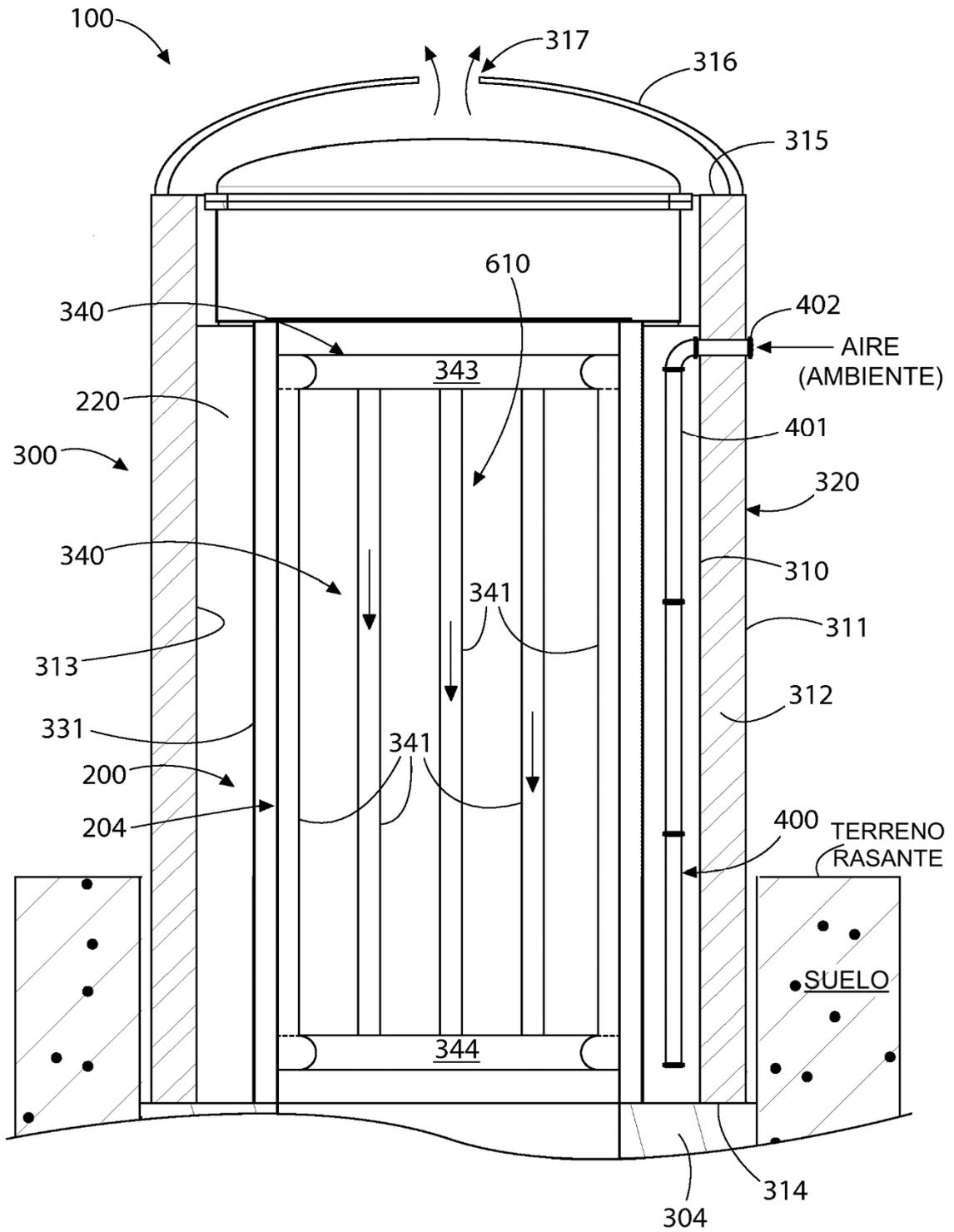


FIG. 16

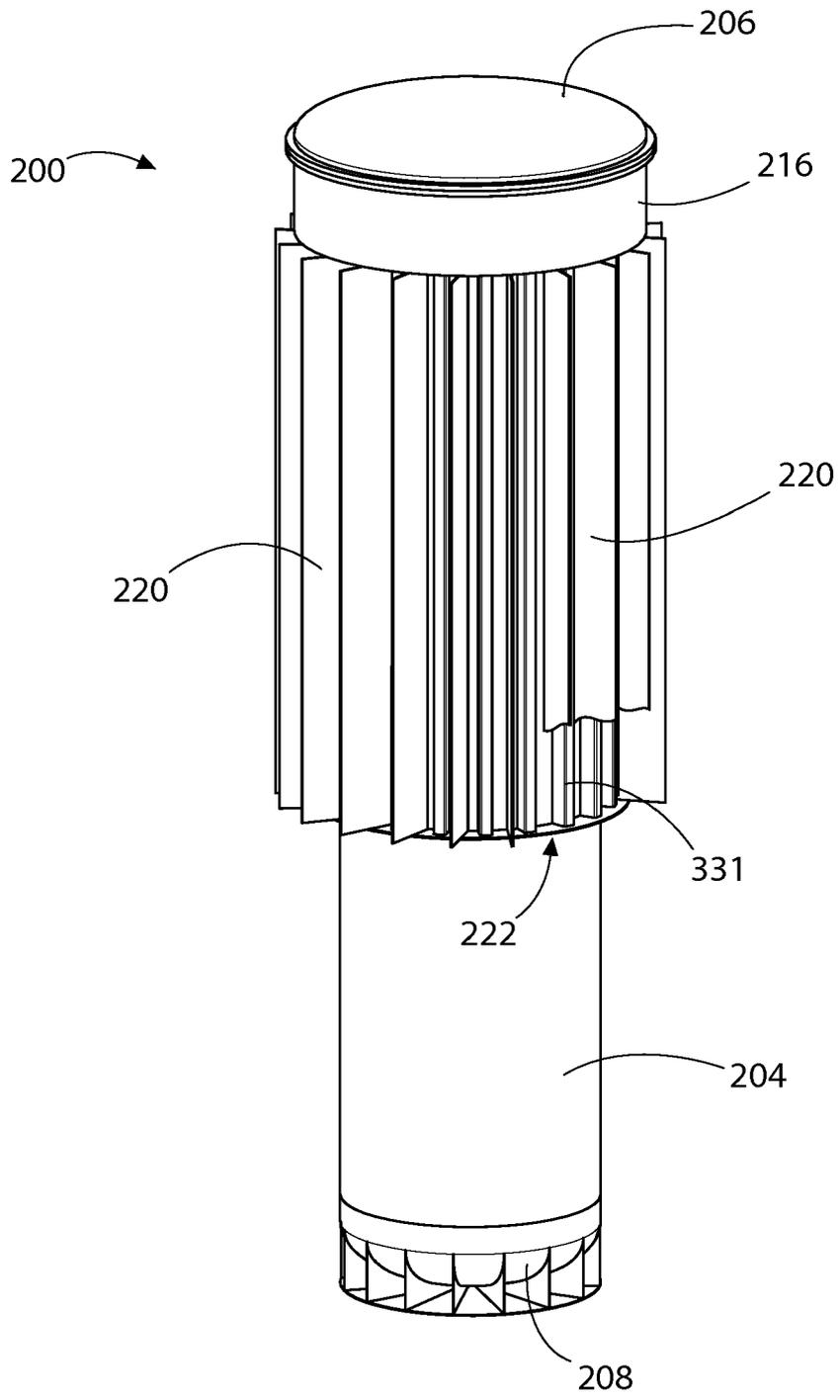


FIG. 17

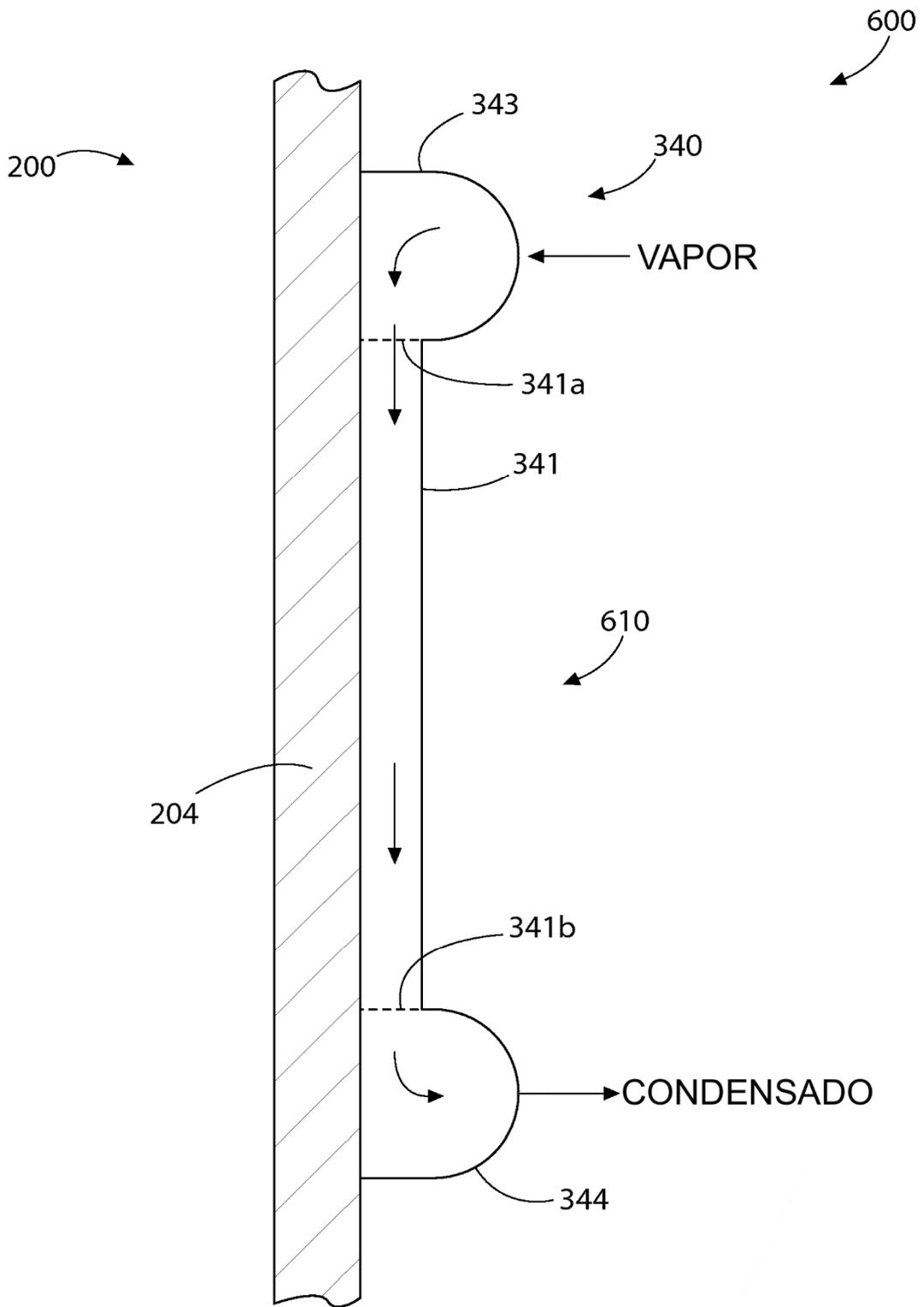


FIG. 18

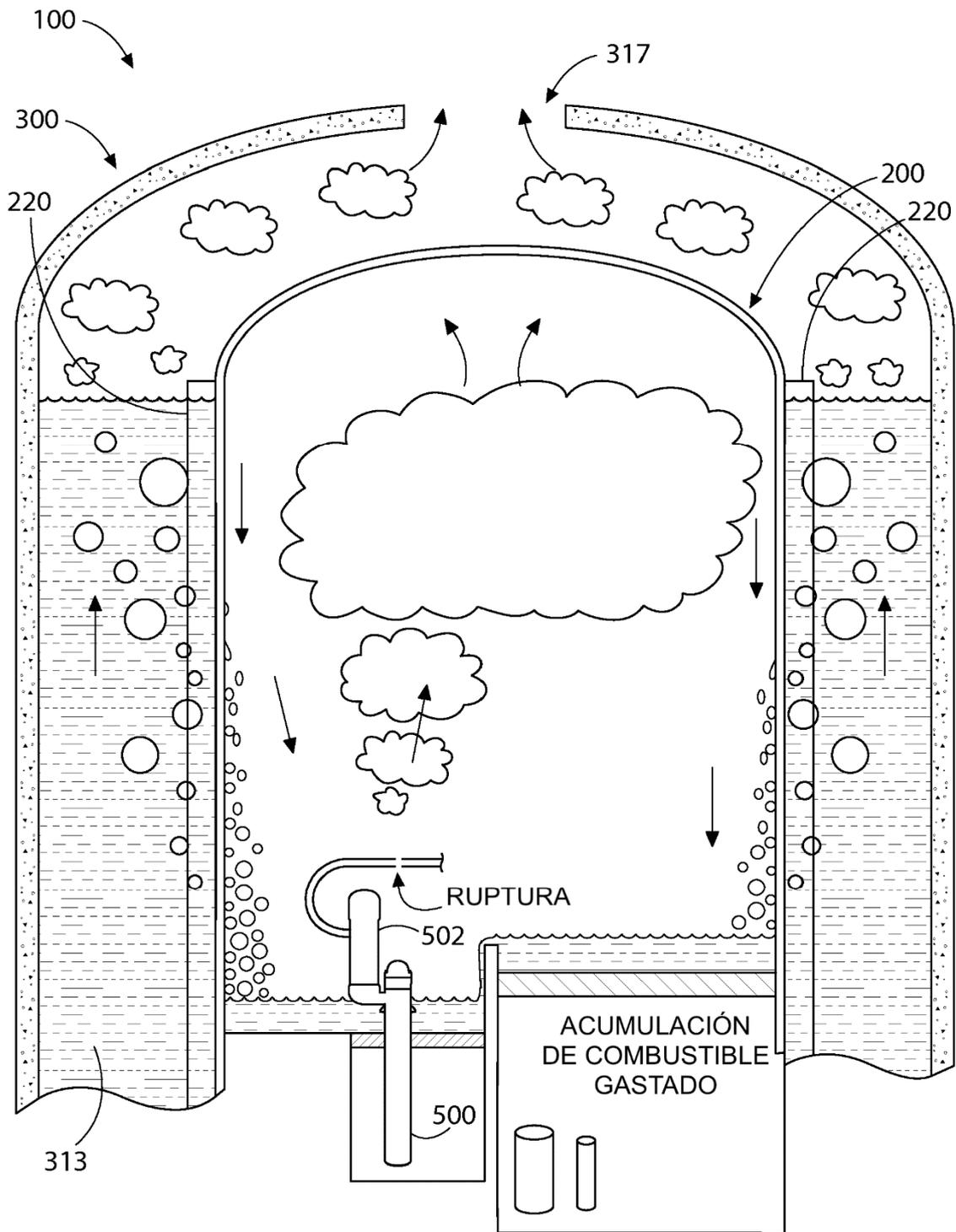


FIG. 19

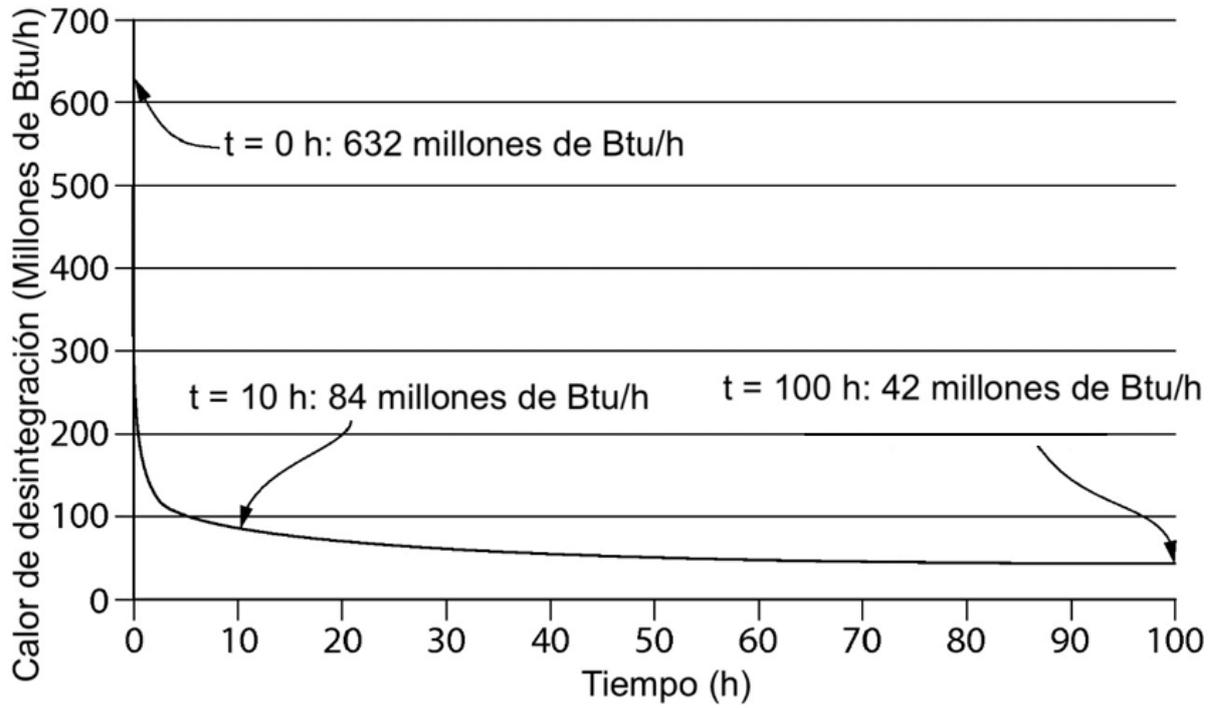


FIG. 20

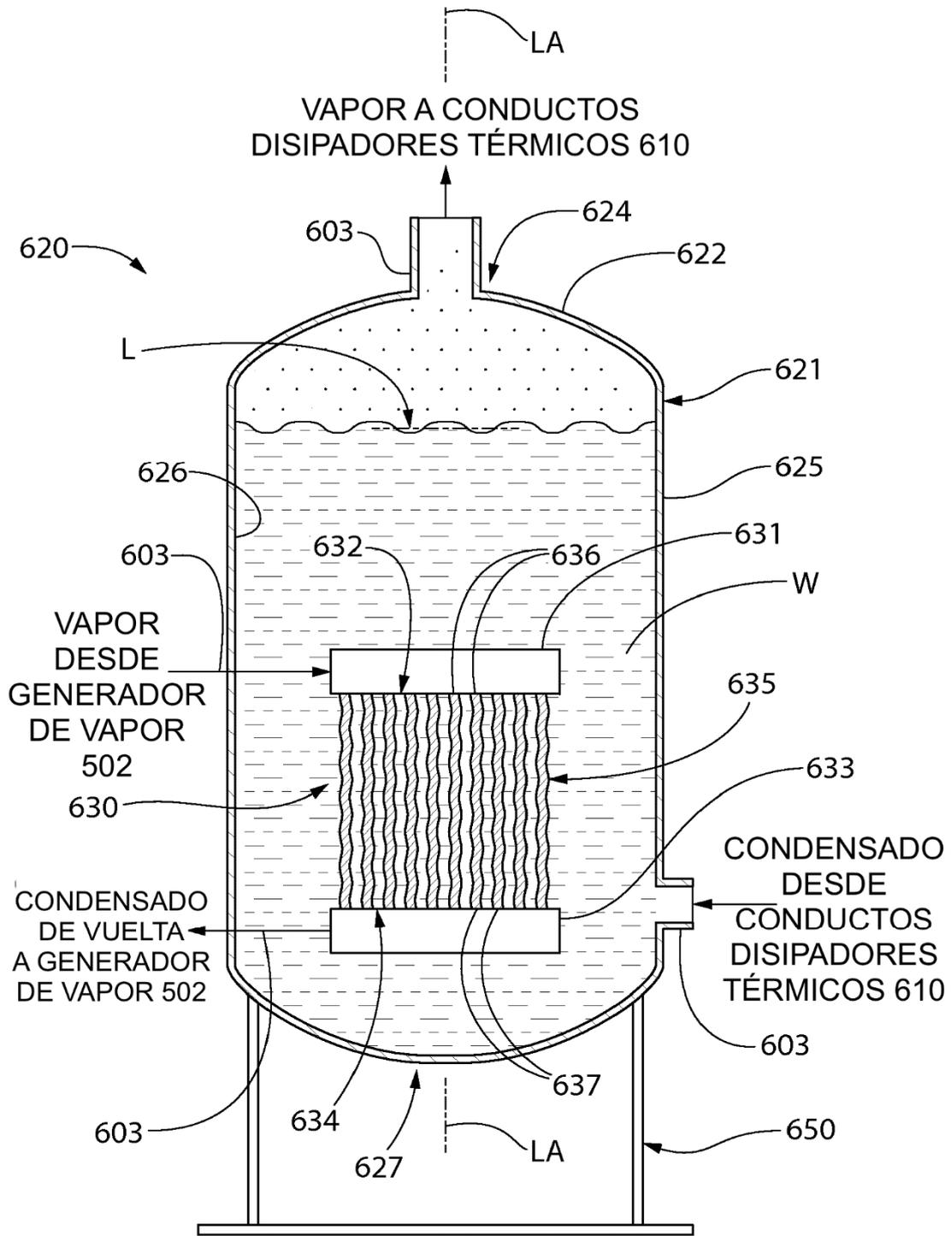


FIG. 21

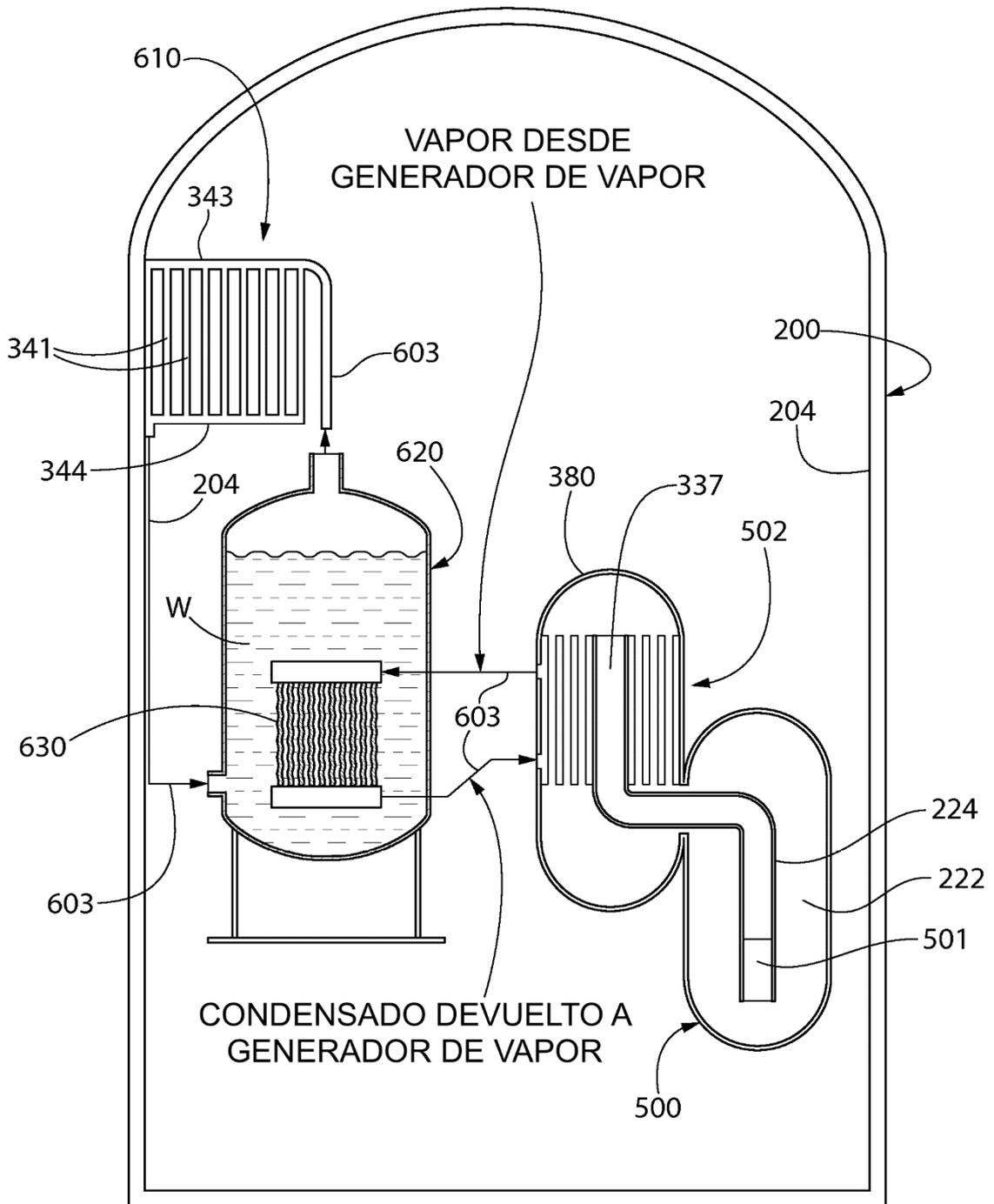


FIG. 22

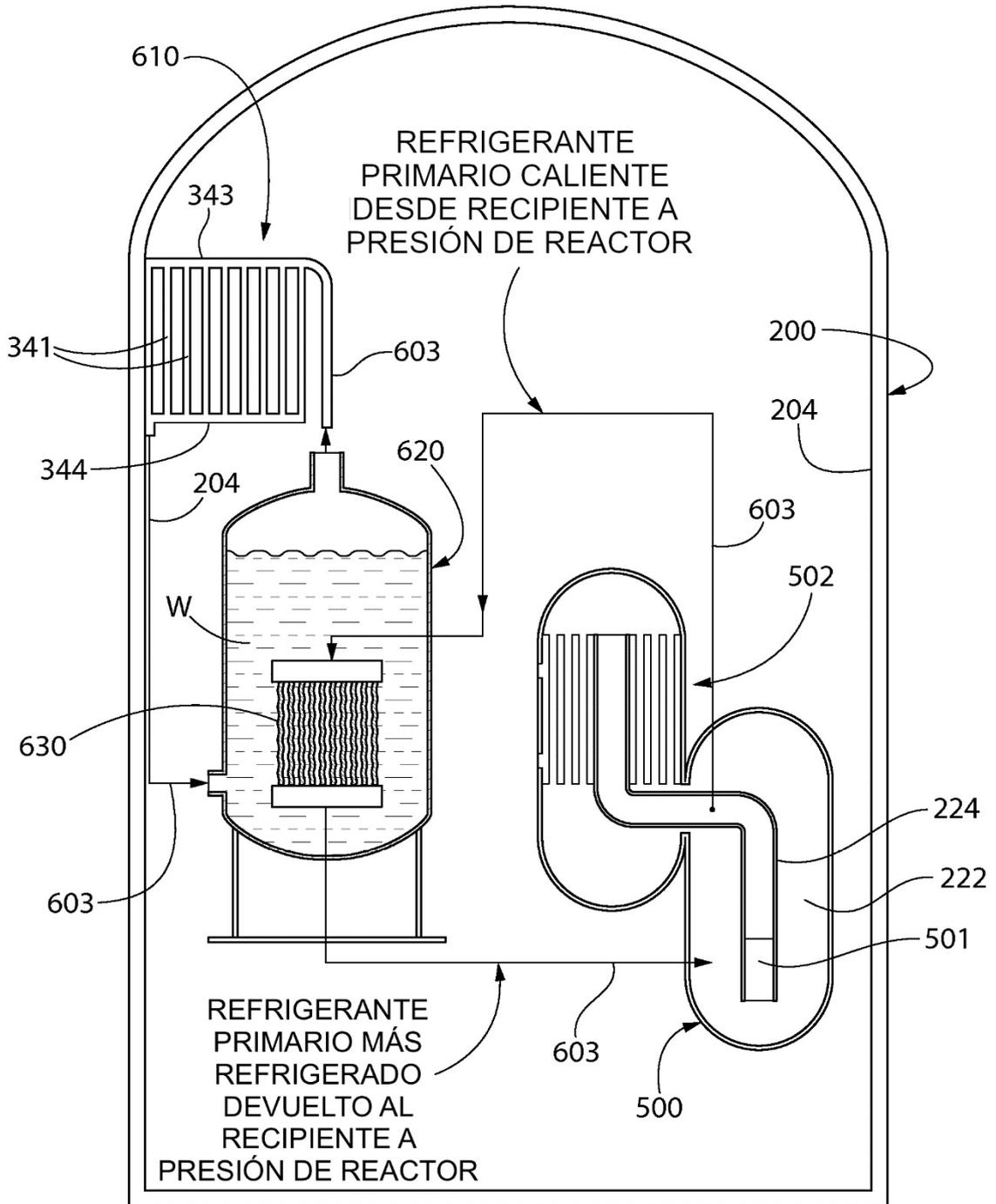


FIG. 23

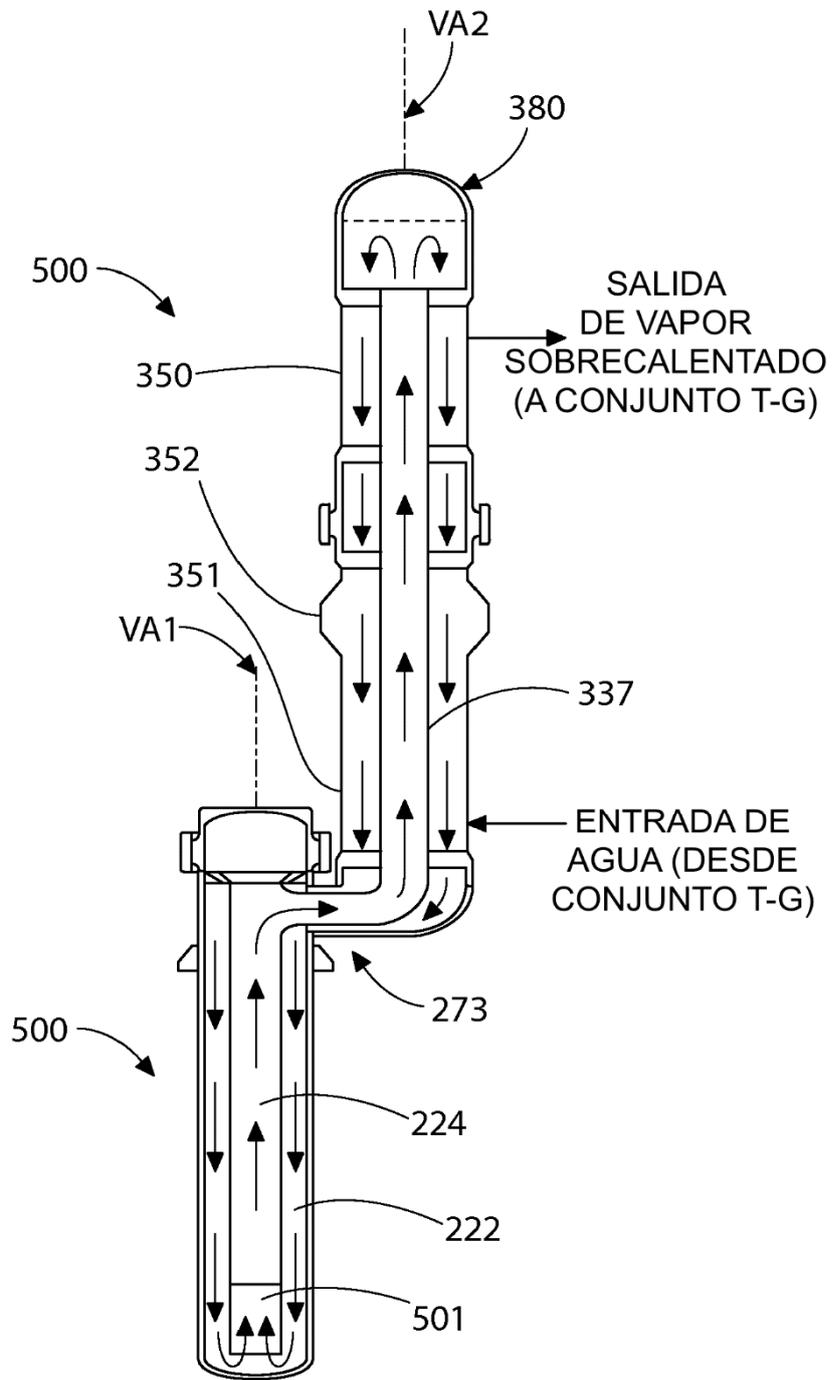


FIG. 24