

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 687 524**

51 Int. Cl.:

**G21C 15/26** (2006.01)

**G21C 15/24** (2006.01)

**G21C 15/02** (2006.01)

**G21C 5/22** (2006.01)

**G21D 1/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **25.04.2013 PCT/US2013/038289**

87 Fecha y número de publicación internacional: **31.10.2013 WO13163475**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.04.2013 E 13781452 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.07.2018 EP 2842135**

54 Título: **Sistema nuclear de suministro de vapor**

30 Prioridad:

**25.04.2012 US 201261638257 P**

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

**25.10.2018**

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 2 687 524 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 nuclear de suministro de vapor

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a sistemas nucleares de suministro de vapor y de manera más particular a un sistema de suministro de vapor para un pequeño reactor modular que tenga un sistema de circulación natural del flujo de refrigerante activado por gravedad.

10

**Antecedentes de la invención**

Los reactores de agua a presión (PWR) para instalaciones de generación de energía nuclear utilizan ambas una circulación bombeada y una circulación natural del refrigerante primario tanto para refrigerar el núcleo del reactor como para calentar el refrigerante secundario a fin de producir vapor que puede ser el fluido de trabajo de un ciclo de Rankine de generación de energía. Los PWR existentes de circulación natural adolecen del inconveniente de que el equipo de intercambio de calor está situado dentro de la vasija de presión del reactor, formando parte integral de la misma. Tal disposición no solo hace que el equipo de intercambio de calor sea difícil de reparar y/o mantener, sino que también somete al equipo a condiciones de corrosión y tiene como resultado una mayor complejidad y un aumento potencial del número de aberturas en la vasija de presión del reactor. Además, localizar el equipo de intercambio de calor dentro de la vasija de presión del reactor genera problemas para el personal con respecto a los niveles de radiación presentes a la hora de reparar el equipo de intercambio de calor en las proximidades de los componentes radioactivamente calientes de la vasija del reactor. El punto de vista general también ha sido que los intercambiadores de calor deberían estar localizados en la vasija del reactor para lograr la circulación natural en aquellos sistemas que pueden utilizar este tipo de circulación.

15

20

25

Los documentos DE 3620672 A1, US828714 y FR2265152 divulgan sistemas nucleares de suministro de vapor conocidos.

30

Se desea un sistema nuclear de suministro de vapor.

**Sumario de la invención**

La presente invención proporciona un sistema nuclear de suministro de vapor, de acuerdo con la reivindicación 1, que supera las deficiencias de las disposiciones existentes anteriores. La presente invención también proporciona un método correspondiente, de acuerdo con la reivindicación 13, para generar vapor en el sistema nuclear de generación de vapor de acuerdo con la reivindicación 1.

35

Entre las ventajas de la presente invención se incluyen las siguientes:

40

Núcleo a gran profundidad bajo tierra: El núcleo del reactor se encuentra a gran profundidad bajo tierra en una Vasija de reactor (VR) de espesas paredes hecha de un material de Código ASME que cuenta con décadas de probada eficacia a la hora de mantener la integridad del reactor en grandes reactores PWR y BWR (por sus siglas en inglés de "Pressurized Water Reactor", reactor de agua a presión y "Boiling Water Reactor" reactor de agua en ebullición, respectivamente). Todas las superficies mojadas por el refrigerante del reactor están hechas de acero inoxidable o Inconel, que elimina una fuente importante de corrosión y acumulación de mugre en la VR.

45

Circulación del Refrigerante del reactor accionada por Gravedad: El sistema nuclear de suministro de vapor de acuerdo con la presente divulgación no depende de ningún componente activo (a saber, una Bomba de Refrigerante de Reactor) para hacer circular el refrigerante de reactor a través del núcleo. En cambio, el flujo del refrigerante de reactor a través de la VR, el generador de vapor, los intercambiadores de calor y otros equipos varios se produce por la altura de presión creada por las diferencias de densidad en el agua que fluye entre los segmentos caliente y frío del lazo primario. La fiabilidad de la gravedad como fuerza motriz cimienta su seguridad inherente. El movimiento del refrigerante del reactor no precisa bombas, válvulas o maquinaria de desplazamiento de ningún tipo.

50

55

Capaz de hacer un arranque en negro (no dependiente de la energía eléctrica exterior): La energía eléctrica exterior no es esencial para arrancar o apagar el sistema nuclear de suministro de vapor. La disipación del calor residual del reactor durante el apagado también se produce mediante una circulación accionada por gravedad. Por tanto, la necesidad de una parada de emergencia del suministro eléctrico en el sitio - una gran preocupación para las plantas nucleares - se elimina. De hecho, el sistema nuclear de suministro de vapor usa la gravedad (y solo la gravedad) como fuerza motriz para responder a sus imperativos operativos tanto en condiciones normales como de accidente.

60

La garantía de una gran reserva de agua alrededor y por encima del núcleo reactor: La vasija del reactor (VR) del presente sistema nuclear de suministro de vapor no tiene aberturas salvo por su parte de arriba del todo, lo que significa que el núcleo permanecerá sumergido en una gran reserva de agua incluso bajo el evento hipotético postulado en el que se pierdan todas las rutas normales de disipación de calor.

65

No hay grandes aberturas en la Vasija del Reactor (VR): Todas las aberturas en la VR están situadas en la región superior de la VR y son de pequeño tamaño. La ausencia de grandes circuitos de tuberías en el sistema de refrigeración del reactor impide el potencial Accidente con Pérdida de Refrigerante (por sus siglas en inglés de LOCA, "Loss of Coolant Accident") por un episodio de "gran rotura".

5 Gran facilidad a todos los componentes críticos: En contraste con los denominados sistemas de reactor "integral", el generador de vapor y el sistema de control de la varilla de accionamiento están situados fuera de la VR en un nivel que facilita el fácil acceso, haciendo que las actividades de mantenimiento preventivo y reparación se ejecuten convenientemente. El generador de vapor consiste en un único lazo que en algunas realizaciones incluye un precalentador, un generador de vapor y un sobrecalentador coronados por un presurizador. Los intercambiadores de calor en el lazo, en concreto el precalentador, el generador de vapor y el sobrecalentador tienen características de diseño integradas para acceder convenientemente y empalmar tubos, tal como unas bocas de acceso colocadas adecuadamente que dan acceso a las placas tubulares y/o haces de tubos del intercambiador de calor. La decisión de desplegar el equipo de intercambio de calor fuera del duro entorno de la cavidad del reactor cavidad del sistema nuclear de suministro de vapor viene dada por la poca fiabilidad de los generadores de vapor PWR durante las 3 últimas décadas y los colosales costes asumidos por la industria para sustituirlos.

20 La brida de la VR presenta una junta inversa para minimizar su proyección más allá del perímetro del cilindro de la VR. Esta innovación de diseño hace que sea posible conectar el Apilamiento directamente a la boquilla de la VR - embutiéndola para establecer una conexión- eliminando cualquier trazado de tuberías entre ellos. Las características de este diseño eliminan el riesgo de una gran rotura de tuberías LOCA.

25 Agua desmineralizada como refrigerante del reactor: El refrigerante del reactor es agua desmineralizada, lo que favorece la seguridad crítica debido a su fuerte gradiente de reactividad negativo con el aumento de temperatura. La eliminación de agua borada también simplifica el sistema nuclear de suministro de vapor (SNSV) eliminado los sistemas y equipos necesarios para mantener y controlar los niveles de boro en el refrigerante primario. El agua pura y el lazo de refrigerante primario resistente a la corrosión ayudan a minimizar la acumulación de mugre en la VR.

30 Fiabilidad mejorada del ciclo de vapor: La fiabilidad del ciclo de vapor mejora prescindiendo de la turbina de alta presión en su conjunto. En su lugar, el vapor del ciclo se sobrecalienta antes de suministrarlo a la turbina de baja presión. La pérdida de eficiencia en el ciclo de Rankine es inferior al 0,5 por ciento; los beneficios en términos de mayor fiabilidad y simplificación del ciclo energético son bastante sustanciales.

35 Control de presión: El presurizador contiene un elemento convencional de calentamiento/enfriamiento (agua/vapor para el control de presión). Un banco de calentadores eléctricos está instalado en la sección del presurizador que sirve para aumentar la presión llevando a ebullición parte del refrigerante primario y generando una burbuja de vapor que reside en la parte superior del presurizador cerca de la cabeza. Una columna de rocío está situada cerca de la cabeza superior del presurizador que rocía agua sobre la burbuja de vapor, condensado de ese modo el vapor y reduciendo la burbuja de vapor. El aumento/disminución del tamaño de la burbuja de vapor sirve para aumentar/disminuir la presión del refrigerante primario dentro del sistema de refrigeración del reactor. En una realización ejemplar, la presión del refrigerante primario mantenida por el presurizador puede ser, sin limitaciones, de aproximadamente 15513210 Pa (2.250 psi).

45 En ejemplos alternativos, que no forman parte de la presente invención según se reivindica, se puede usar un sistema de presurización de tipo nitrógeno. En este ejemplo, el presurizador sirve para controlar la presión en la vasija del reactor aplicando una presión controlada de nitrógeno desde tanques externos de nitrógeno a alta presión acoplados fluidicamente con el presurizador. Los reactores controlados por la presión del nitrógeno se han usado en otros tipos de reactor y cuentan con años de experiencia operativa satisfactoria con un perfil de respuesta rápida.

50 Prevención de fallos de combustible en el reactor: Se sabe que más del 70 por ciento de todos los fallos de combustible durante el funcionamiento se producen debido a daños por frotamiento (erosión por impactos repetitivos), que son el resultado del "golpeteo" de las barras de combustible por las tiras de la rejilla. La vibración de las tiras de la rejilla está directamente relacionada con el nivel de turbulencia en torno al combustible. En el presente sistema nuclear de suministro de vapor, el número de Reynolds es aproximadamente un 20 por ciento del número del típico PWR operativo hoy en día. Un número de Reynolds inferior se traduce en una acción de golpeteo debilitada (¡El índice de erosión varía aproximadamente a razón de un 4,8 de la potencia de la velocidad de impacto!) sobre las barras y por tanto una drástica reducción del índice de daños por frotamiento. Niveles inferiores de combustión seleccionados para el presente sistema nuclear de suministro de vapor (en el 45 GWD por intervalo MTU) en comparación con aproximadamente 60 en los reactores que funcionan en la actualidad) también ayudará a mejorar el debilitamiento del recubrimiento del combustible y así se evita el desperdicio de barras.

65 Mayor Auto-blindaje: La circulación accionada por gravedad del fluido primario en el presente sistema nuclear de suministro de vapor (SNSV) añade otro beneficio significativo en forma de una drástica reducción de la dosis de radiación que emana del SNSV. Esto es debido a que el isótopo de Nitrógeno (N-16), producido por el bombardeo con neutrones de oxígeno al agua del reactor en el núcleo, genera un isótopo N-16 emisor de radiación gamma de alta energía que es, en gran medida, responsable de la radiación que emana de la Contención. El N-16, sin

embargo, tiene una semivida de tan solo 7,4 segundos, lo cual es menos de una cuarta parte del tiempo necesario para que el agua primaria viaje hasta la parte superior de los generadores de vapor. Por lo tanto, la cantidad de N-16 está atenuada por más de 7 semividas, lo que significa que, de hecho, se despuebla hasta reducirse a valores minúsculos. Los cálculos conceptuales sugieren que la dosis de radiación desde la parte superior del generador de vapor del SNSV pueden ser 3 o más órdenes de magnitud inferiores a la del agua bombeada de un PWR de tamaño similar. Por tanto, no es necesario construir una contención de espeso hormigón para el presente SNSV para obtener un blindaje contra la radiación. En lugar de construir y reforzar sobre el terreno una contención de hormigón, se despliega una contención de acero producida en fábrica capaz de soportar un accidente aéreo que es más adecuada y más económica.

### Breve descripción de los dibujos

Las características de las realizaciones ejemplares se describen con referencia a los siguientes dibujos, donde elementos similares se han etiquetado de manera similar y, en los que:

la FIG. 1 es una sección transversal de una vasija de contención que incluye un sistema nuclear de suministro de vapor, de acuerdo con la presente divulgación, que incluye un ensamblaje de generador de vapor que comprende una vasija de reactor y una vasija de generación de vapor;

la FIG. 2 es un diagrama de flujo esquemático del sistema nuclear de suministro de vapor de la FIG. 1 que muestra la trayectoria del flujo o lazo de flujo circulante de refrigerante primario representado por las flechas de flujo;

la FIG. 3 es una vista en alzado de una sección transversal de la vasija de reactor de la FIG. 1;

la FIG. 4 es una vista en alzado de una sección transversal de la porción inferior de la vasija de generación de vapor de la vasija de reactor de la FIG. 1 que muestra una sección del precalentador y una sección del generador de vapor;

la FIG. 5 es una vista en alzado de una sección transversal de la parte superior de la vasija de generación de vapor de la FIG. 1 que muestra una sección del sobrecalentador y un presurizador montado encima de la vasija de generación de vapor;

la FIG. 6 es una vista en perspectiva despiezada del cartucho de combustible posicionado en la vasija del reactor de la FIG. 1;

la FIG. 7 es una vista frontal en alzado del ensamblaje del generador de vapor de la FIG. 1;

la FIG. 8 es una vista en alzado de perfil del ensamblaje del generador de vapor de la FIG. 1;

la FIG. 9 es una vista superior del ensamblaje del generador de vapor de la FIG. 1;

la FIG. 10 es una vista superior en perspectiva del ensamblaje del generador de vapor de la FIG. 1;

la FIG. 11 es una vista inferior en perspectiva del ensamblaje del generador de vapor de la FIG. 1;

la FIG. 12 es una vista transversal de una sección transversal de la vasija de generación de vapor tomada a lo largo de la línea XII-XII de la FIG. 8;

la FIG. 13 es una vista transversal de una sección transversal de la vasija de generación de vapor tomada a lo largo de la línea XIII-XIII de la FIG. 8;

la FIG. 14 es una vista longitudinal en sección transversal de la vasija de generación de vapor tomada a lo largo de la línea XIV-XIV de la FIG. 8; y

la FIG. 15 es una vista detallada y ampliada de la porción XV mostrada en la FIG. 14.

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

### Descripción detallada de las realizaciones

Las características y beneficios de la invención se ilustran y describen en el presente documento con referencia a las realizaciones ejemplares. Está previsto que la descripción de realizaciones ejemplares se lea con relación a los dibujos adjuntos, que deberán considerarse una parte de la totalidad de la descripción escrita. En la descripción de las realizaciones divulgadas en el presente documento, cualquier referencia a la dirección u orientación está prevista meramente para mayor comodidad de la descripción y no pretende limitar en modo alguno el alcance de la presente invención. Los términos relativos como "inferior", "superior", "horizontal", "vertical", "encima", "debajo", "arriba",

“abajo”, “parte superior” y “parte inferior” así como sus derivados (por ejemplo, “horizontalmente”, “hacia abajo”, “hacia arriba,” etc.) deberán interpretarse como una referencia a la orientación que se esté describiendo en ese momento o tal y como se muestra en el dibujo sobre el que se esté hablando. Estos términos relativos son solo para mayor comodidad de la descripción y no requieren que los aparatos se construyan u operen en ninguna orientación particular. Los términos como “sujeto”, “fijado”, “conectado”, “acoplado”, “interconectado” y similares se refieren a una relación en donde las estructuras se unen o sujetan entre sí bien directa o indirectamente a través de estructuras intervinientes, así como a relaciones o sujeciones tanto móviles como rígidas, a no ser que se describa expresamente lo contrario. En consecuencia, la divulgación no debe limitarse expresamente a tales realizaciones ejemplares que ilustren alguna posible combinación, no limitante, de características que puedan existir por sí solas o en otra combinación de características.

Con referencia a las FIGS. 1-6, en ellas se muestra un sistema de suministro de vapor para un reactor nuclear de agua a presión (PWR) de acuerdo con la presente divulgación. Desde el punto de vista termohidráulico, el sistema incluye un ensamblaje 100 del generador de vapor que en general incluye una vasija de reactor 200 y una vasija de generación de vapor 300 acoplada fluidicamente a la vasija de reactor. La vasija de generación de vapor y la vasija de reactor son verticalmente alargadas y separan componentes que están estrechamente acoplados hidráulicamente, pero son vasijas independientes en sí mismas que están térmicamente aisladas salvo por el intercambio del lazo primario de refrigerante (es decir, refrigerante del reactor) que fluye entre las vasijas. Como se describe más adelante en el presente documento, en una realización, la vasija de generación de vapor 300 incluye un precalentador 320, un generador de vapor 330 principal y un sobrecalentador 350 que convierte un fluido tal como el agua que fluye en un lazo de refrigerante secundario de un líquido que entra en la vasija de generación de vapor 300 por la entrada 301 en un vapor sobrecalentado que sale de la vasija de generación de vapor por la salida 302. En algunas realizaciones, el lazo de agua de refrigerante secundario puede ser un fluido de ciclo de Rankine usado para accionar un conjunto de turbina-generador para producir energía eléctrica.

La vasija de generación de vapor 300 además incluye un presurizador 380 que mantiene una presión predeterminada del fluido de refrigerante primario. El presurizador es una vasija de presión montada encima de la vasija de generación de vapor 300 y diseñada para mantener una interfaz líquido/gas (es decir, agua /gas inerte del refrigerante primario) que opera para permitir el control de la presión del refrigerante primario en el generador de vapor. En una realización, como se muestra, el presurizador 380 puede montarse directamente sobre la parte superior de la vasija de generación de vapor 300 y forma una parte estructural unitaria integral de la vasija para cerrar hidráulicamente la vasija por el extremo superior. El ensamblaje de los tres intercambiadores de calor anteriores y del presurizador puede denominarse “apilamiento”.

Con referencia a la figura 1, la vasija de reactor 200 y la vasija de generación de vapor 300 están alojadas en una vasija de contención 110 de generador de vapor. La vasija de contención 110 puede estar formada por un acero adecuado producido en una fábrica que comprende una parte superior 111, una parte inferior 112 y una pared lateral cilíndrica 113 que se extiende entre las mismas. En algunas realizaciones, las porciones de la vasija de contención que pueden estar situadas por encima del nivel del suelo pueden estar hechas de acero corrugado dúctil para ayudar a soportar impactos de aeronaves. Se puede proporcionar un escudo antimisiles 117 que está separado por encima de la parte superior 111 de la vasija de contención 110 como parte de la vasija de contención o como una estructura de un recinto de contención independiente (no mostrada) que contenga la vasija de contención 110. Una pared divisoria horizontal 114 divide la vasija de contención en una porción superior 114a y una porción inferior 114b. La pared divisoria 114 define un suelo en la vasija de contención. En una realización, se puede disponer la mayoría de la vasija de reactor 200 en la porción inferior 114b y se puede disponer la vasija de generación de vapor 300 en la porción superior 114a como se muestra.

En varios ejemplos, que mejoran aún más la invención reivindicada con características no reivindicadas, se puede montar la vasija de contención 110 por encima del suelo, parcialmente por debajo del suelo o completamente por debajo del suelo. En determinados ejemplos, la vasija de contención 110 puede posicionarse de modo que al menos una parte o toda la porción inferior 114b que contiene el combustible nuclear del núcleo del reactor (por ejemplo, el cartucho de combustible 230) esté situada por debajo del nivel del suelo. En un ejemplo, la vasija de reactor 200 en su totalidad y una porción de la vasija de generación de vapor 300 están situadas totalmente por debajo del nivel del suelo para un máximo de seguridad. La carcasa cilíndrica o pared lateral 113 de la vasija de contención 110 puede estar dividida horizontalmente en una sección superior y una sección inferior que están unidas entre sí por una junta embridada 119 soldada o empernada, como se muestra en la FIG. 1, para proporcionar una demarcación para las porciones de la vasija de contención que están situadas por encima y por debajo del nivel del suelo. En otros ejemplos, las secciones superior e inferior pueden soldarse entre sí sin usar una brida.

En un ejemplo, por ejemplo, sin limitación, la vasija de contención 110 puede tener una altura representativa de aproximadamente 61 m (200 pies) o más para unas instalaciones modulares de generación de energía nuclear de 160 MW (megavatios). Un diámetro representativo no limitante para esta instalación de generación de energía es de aproximadamente 13,7 m (45 pies).

Se puede proporcionar cualquier altura y diámetro adecuados para la vasija de contención dependiendo de la configuración de los componentes del sistema y de sus dimensiones.

La vasija de contención 110 además incluye un pozo húmedo 115 de reactor definido en un ejemplo por un recinto 116 amurallado de circunscripción cilíndrica que está inundado con agua para proporcionar un mayor blindaje antirradiación y una reserva auxiliar de refrigerante fácilmente accesible para el núcleo del reactor. En un ejemplo, el recinto amurallado 116 puede estar formado con paredes cilíndricas de acero inoxidable que se extienden  
 5 circunferencialmente alrededor de la vasija de reactor 200 como se muestra. Se pueden usar otros materiales adecuados para construir un recinto 116. El pozo húmedo 115 del reactor se dispone en la porción inferior 114b de la vasija de contención 110. La porción inferior 114b puede incluir además una piscina de combustible usado 118 inundada (es decir, agua) adyacente al recinto 116. En un ejemplo, como se muestra en la FIG. 1, tanto la piscina de combustible usado 118 como el recinto amurallado 116 se disponen debajo de la pared divisoria 114 horizontal,  
 10 como se muestra en la FIG. 1.

En un ejemplo, como se muestra en la FIG. 1, el recinto amurallado 116 puede extenderse por encima de la pared divisoria 114 y la conexión de la boquilla de entrada/salida entre las vasijas de reactor y de generación de vapor se puede hacer mediante una abertura a través del recinto amurallado.

Como se muestra además en la FIG. 1, tanto la vasija de reactor 200 como la vasija de generación de vapor 300 preferentemente pueden estar orientadas en vertical, como se muestra, para reducir la planta y el diámetro de la vasija de contención 110. La vasija de contención 110 tiene un diámetro lo bastante grande como albergar tanto la vasija de reactor, como la vasija de generación de vapor y cualquier otro accesorio. La vasija de contención 110  
 20 preferentemente tiene suficiente altura como para alojar completamente la vasija de reactor y la vasija de generación de vapor para proporcionar un generador de vapor totalmente contenido a excepción de las aberturas de entrada y salida de agua y vapor para el lazo de fluido de refrigerante secundario asociado con el ciclo de Rankine para accionar el conjunto de turbina-generador para producir electricidad.

La FIG. 2 muestra el flujo o circulación de refrigerante primario (por ejemplo, agua) en el lazo de refrigerante primario. En una realización, el flujo de refrigerante primario está accionado por gravedad basándose en el cambio de temperatura y correspondiente densidad del refrigerante dado que se calienta en la vasija de reactor 200 y luego se enfría en la vasija de generación de vapor 300 cuando se transfiere el calor al lazo de refrigerante secundario del ciclo de Rankine que acciona el conjunto de turbina-generador (T-G). La carga de presión creada por el cambio de las diferentes densidades del refrigerante (es decir, caliente - menor densidad y frío - mayor densidad) induce el flujo o circulación a través del sistema de la vasija de reactor- vasija de generación de vapor, como se muestra con las flechas de dirección del flujo. Ventajas, la circulación de refrigerante primario accionada por gravedad no requiere ni  
 30 maquinarias ni bombas de refrigerante lo que resulta en un ahorro de costes (capital, funcionamiento y mantenimiento), un menor consumo energético del sistema, aumentando de ese modo la eficiencia de conversión energética del sistema PWR, además de otras ventajas, como las que se describen en el presente documento.

La vasija de reactor 200 puede ser similar a la vasija de reactor con el sistema de circulación accionada por gravedad divulgado en la Solicitud de patente de los EE. UU. en cotitularidad n.º 13/577.163, presentada el 3 de agosto de 2012.

Con referencia a la figura 3, la vasija de reactor 200 en una realización no limitante es una vasija de presión cilíndrica de paredes gruesas de código ASME Sección III, Clase 1, que comprende una carcasa 201 de pared lateral cilíndrica con una cabeza inferior 203 semiesférica soldada íntegramente y una cabeza superior 202 semiesférica amovible. La carcasa 201 define una cavidad interna 208 configurada para contener el núcleo del reactor, la envoltura del reactor y otros accesorios como se describe en el presente documento. En una realización, el extremo superior de la carcasa 201 de la vasija de reactor puede estar equipada con una brida 204 de cubo ahusada (también conocida como brida de "garganta de soldadura" en la materia) que está empernada a una brida 205 similar soldada a la cabeza superior 202. En una realización, la cabeza superior 202 está sujeta a la "brida superior" (que también está soldada a tope a la carcasa cilíndrica de la vasija de reactor) mediante un conjunto de  
 45 pernos de aleación (no mostrados) pre-tensionados para establecer una doble junta hermética de alta integridad en cualquier modo operativo. La conexión empernada de la cabeza superior 202 proporciona un acceso rápido al interior la vasija de reactor, tal como el núcleo del reactor.

Dos juntas 206 concéntricas auto-energizantes comprimidas entre las dos bridas 204, 205 emparejadas proporcionan una estanqueidad a prueba de fugas a la vasija de reactor 200 en la conexión entre la cabeza superior 202 y la carcasa 201. La estanqueidad a prueba de fugas en condiciones operativas está asegurada por un calentamiento axisimétrico de la junta embridada que está provisto por la disposición de flujo de fluido de refrigerante primario en el sistema, como se describe con más detalle en el presente documento. La cabeza superior 202 contiene aberturas verticales 207 para la inserción de las barras de control y además puede servir como base para  
 60 montar los accionadores asociados de las barras de control, ninguno de los cuales se describe, pero son bien conocidos en la materia sin una elaboración más detallada.

Aún con referencia a la FIG. 3, la vasija de reactor 200 incluye una envoltura 220 cilíndrica del reactor que contiene el núcleo del reactor definido por el cartucho de combustible 230. La envoltura 220 del reactor divide transversalmente la porción de carcasa de la vasija de reactor en dos espacios dispuestos concéntricamente: (1) una zona anular externa 221 que define una bajante anular 222 para el refrigerante primario que entra en la vasija de

reactor que está formado entre la superficie exterior de la envoltura del reactor y la superficie interna de la carcasa 201; y (2) una vía de paso 223 que define una columna ascendente 224 para el refrigerante primario que sale de la vasija de reactor calentado por la fisión del núcleo del reactor. La envoltura 220 del reactor es alargada y se extiende en una dirección axial a lo largo del eje vertical EV1 de la vasija de reactor que define una altura e incluye un fondo abierto 225 y una parte superior cerrada 226. En una realización, la parte superior 226 puede estar cerrada por una placa superior 227 de aislamiento que dirige el refrigerante primario que fluye hacia arriba por la columna ascendente 224 a la vasija de generación de vapor 300, como se describe con más detalle en el presente documento. En una realización, el fondo 225 de la envoltura 220 del reactor está separada verticalmente a cierta distancia de la cabeza inferior 203 de la vasija de reactor 200 y define un plenum inferior 228 de flujo. El plenum inferior 228 de flujo recoge el refrigerante primario de la bajante anular 222 y dirige el flujo de refrigerante al interior de la entrada de la columna ascendente 224 formada por el fondo abierto 225 de la envoltura 220 del reactor (véase, por ejemplo, la FIG. 2).

Tanto el cartucho de combustible 230 como la envoltura 220 del reactor están soportadas por una estructura de soporte del núcleo ("ESN"), que, en un ejemplo, incluye una pluralidad de elementos de soporte laterales 250 que se extienden entre medias y están sujetos a la envoltura del reactor y a la carcasa 201 de la vasija de reactor 200. Se proporciona un número adecuado de elementos de soporte separados tanto circunferencial como verticalmente, según las necesidades, para soportar el peso combinado del cartucho de combustible 230 y la envoltura 220 del reactor. En un ejemplo, el fondo de la envoltura 220 del reactor no está unido a la vasija de reactor 200 para permitir que la envoltura se expanda térmicamente en una dirección axial vertical (es decir, en paralelo al eje vertical EV1) sin restricciones indebidas.

En un ejemplo, la envoltura 220 del reactor es un cilindro de doble pared que puede estar hecho de un material resistente a la corrosión, tal como, sin limitación alguna, acero inoxidable. Esta construcción de doble pared de la envoltura 220 del reactor forma una estructura aislada diseñada para retrasar el flujo de calor a través de la misma y forma una suave columna ascendente 224 vertical para el flujo ascendente del refrigerante primario (es decir, agua) calentado por la fisión en el cartucho de combustible 230 ("núcleo"), que en una realización, está preferentemente situado en el extremo inferior de la envoltura, como se muestra en las FIGS. 1-3. El espacio vertical por encima del cartucho de combustible 230 en la envoltura 220 del reactor también puede contener segmentos de barra de control interconectados a lo largo de un conjunto de "deflectores no segmentados" que sirve para protegerles de las vibraciones inducidas por el flujo durante las operaciones del reactor. La envoltura 220 del reactor está soportada lateralmente por la vasija de reactor mediante unos elementos de soporte 250 para evitar daños por las vibraciones mecánicas que pueden inducir fallos debido a la fatiga de los metales.

En un ejemplo, el cartucho de combustible 230 es una estructura unitaria autónoma que contiene ensamblajes de combustible erguidos y está situado en una zona de la vasija de reactor 200 que está separada por encima de la cabeza inferior 203 de modo que se forme un plenum relativamente profundo de agua por debajo del cartucho de combustible. El cartucho de combustible 230 está aislado por la envoltura 220 del reactor de modo que la mayoría del calor generado por la reacción de fisión en el núcleo de combustible nuclear se usa para calentar el refrigerante primario que fluye a través del cartucho de combustible y porciones superiores adosadas de la columna ascendente 224. El cartucho de combustible 230 es una estructura abierta cilíndrica que incluye paredes laterales 231 de forma cilíndrica, una parte superior abierta 233 y un fondo abierto 234 para permitir que el refrigerante primario fluya completamente hacia arriba a través del cartucho (véanse las flechas de dirección del flujo). En un ejemplo, las paredes laterales 231 pueden estar formadas por múltiples segmentos arqueados de reflectores que están unidos entre sí por medios adecuados. El interior abierto del cartucho de combustible 230 está relleno con una rejilla de soporte 232 para retener las barras de combustible nuclear e insertar las barras de control en el núcleo para controlar la reacción de fisión según sea necesario.

Brevemente, en funcionamiento, el refrigerante primario caliente del reactor sale de la vasija de reactor 200 a través de una boquilla de salida 270 resistente al flujo para enfriarse en la vasija de generación de vapor 300 adyacente, como se muestra en las FIGS. 2 y 3. El refrigerante primario enfriado del reactor sale de la vasija de generación de vapor 300 y entra en la vasija de reactor 200 a través de la boquilla de entrada 271. La fontanería interna y la disposición en la vasija de reactor dirige el refrigerante del reactor enfriado hacia abajo a través de la bajante anular 222. La altura de la vasija de reactor 200 preferentemente se selecciona para soportar un nivel adecuado de turbulencia en el refrigerante primario de reactor recirculante en virtud de la diferencia de densidad entre las columnas de agua caliente y fría que normalmente se conoce como el principio de sifón térmico (flujo accionado por la diferencia de densidad) activado por gravedad. En un ejemplo, la circulación del refrigerante primario de reactor está accionada por una presión superior a 55 kPa (8 psi) generada por el principio de sifón térmico, que se ha determinado que garantiza (con un margen adecuado) un flujo realmente turbulento y un rendimiento hidráulico estable.

Con referencia a las FIGS. 1 y 3, la parte superior de la carcasa 201 de la vasija de reactor está soldada a un forjado masivo superior de soporte que puede denominarse brida de soporte 280 del reactor. La brida de soporte 280 soporta el peso de la vasija de reactor 200 y los componentes internos por encima del pozo húmedo 115 del reactor. En un ejemplo, la brida de soporte está rigidificada y reforzada estructuralmente por una pluralidad de orejetas 281 que están separadas circunferencialmente alrededor de la vasija de reactor y soldadas tanto a la vasija de reactor

como a la brida, como se muestra. La brida de soporte entra en contacto y se acopla con la pared divisoria 114 horizontal que transfiere el peso muerto de la vasija de reactor 200 a la vasija de contención 110. La expansión térmica radial y axial de la vasija de reactor (es decir, siendo la mayoría de la dilatación principalmente hacia abajo a partir de la pared divisoria 114 horizontal) a medida que el reactor se calienta mientras está funcionamiento no está restringida. Sin embargo, la porción de vasija de contención 110 que se proyecta por encima de la pared divisoria 114 puede dilatarse libremente hacia arriba a la vez que la dilatación ascendente de la vasija de generación de vapor 30 para minimizar el diferencial de expansión axial entre la vasija de generación de vapor y la vasija de reactor. Porque la vasija de reactor y la vasija de generación de vapor están configuradas y estructuradas para dilatarse térmicamente en altura sustancialmente a la misma velocidad cuando se calientan, esta disposición ayuda a minimizar la tensión potencial de expansión térmica en el acoplamiento hidráulico 273 de refrigerante primario entre la vasija de reactor y la vasija de generación de vapor.

La brida de soporte 280 está separada verticalmente hacia abajo sobre la carcasa 201 de la vasija de reactor a cierta distancia de la cabeza superior 202 de la vasija de reactor 200 lo suficiente para permitir que se pueda hacer una conexión fluida a la vasija de generación de vapor 300 que está por encima de la pared divisoria 114, como se muestra en las FIGS. 1 y 2. Cuando la vasija de reactor 200 está montada dentro de la vasija de contención 110, la cabeza superior 202 de la vasija de reactor y el acoplamiento fluido 273 de refrigerante primario (formado colectivamente por la boquilla combinada de entrada-salida 270/271 y la boquilla de entrada-salida 371/370 de flujo de la vasija de generación de vapor 300, mostrada en la FIG. 4) están situados por encima del pozo 115 del reactor. Esto proporciona una ubicación para su conexión a los colectores de generador de vapor y para los sistemas de seguridad diseñados (por ejemplo, barras de control, etc.) que permite hacer frente a los diversos escenarios de accidente postulados. La mayoría de la carcasa 201 de la vasija de reactor, sin embargo, podría disponerse debajo de la pared divisoria 114 y sumergida en el pozo húmedo 115 del reactor, como se muestra en la FIG. 1.

La región inferior de la vasija de reactor 200 está restringida por un sistema lateral de contención sísmico 260 (mostrado esquemáticamente en la FIG. 1) que cubre el espacio entre la carcasa 201 de reactor y la superficie interior del pozo 115 de reactor del recinto 116 cilíndrico para soportar eventos sísmicos. El diseño de restricción sísmica está configurado para permitir una expansión térmica libre axial (es decir, longitudinal a lo largo del eje vertical EV1) y diametral de la vasija de reactor 200. El pozo 115 de reactor está inundado durante las operaciones de potencia para proporcionar una defensa en profundidad contra un accidente (hipotético, no-mecánico) del que se asume que produce un rápido aumento en la entalpía del contenido del reactor. Dado que el reactor está diseñado para evitar pérdidas de agua del núcleo por fugas o roturas y el pozo del reactor está inundado, es poco probable que el combustible fundido (corio) se cuele en la vasija de reactor.

Con referencia a las FIGS. 3 y 4, la boquilla combinada de entrada-salida 270/271 comprende dos forjados huecos concéntricos que incluyen una boquilla de entrada externa 270 y una boquilla de salida interna 271. La boquilla de salida 271 tiene un extremo soldado a la envoltura 220 del reactor (interno a la carcasa 201 de la vasija de reactor) y un extremo opuesto soldado a la boquilla de entrada 371 de la vasija de generación de vapor 300. La boquilla de entrada 270 tiene un extremo soldado a la carcasa 201 de la vasija de reactor y un extremo opuesto soldado a la boquilla de salida 370 de la vasija de generación de vapor 300. La placa 227 de aislamiento de flujo ayuda a asegurar que el agua caliente del refrigerante primario que sale de la vasija de reactor no pueda fluir de vuelta a la zona anular 221. En la presente realización, la boquilla de salida 271 de la vasija de reactor y la boquilla de entrada 371 de la vasija de generación de vapor tienen, cada una, un diámetro menor que el de la boquilla de entrada 270 de la vasija de reactor y la boquilla de salida 270 de la vasija de generación de vapor. La boquilla combinada de entrada-salida 270/271 está situada encima de la pared divisoria 114 de la vasija de contención 110. La boquilla de entrada 371 y la boquilla de salida 370 de la vasija de generación de vapor 300 definen colectivamente un acoplamiento dispuesto concéntricamente de la boquilla combinada de salida/entrada 371/370 para la vasija de generación de vapor.

Para evitar largos lazos con grandes circuitos de tuberías en el sistema de refrigeración primario del reactor que crean un potencial Accidente con Pérdida de Refrigerante (LOCA) por un episodio de "gran rotura", tanto la boquilla combinada de entrada-salida 270/271 de la vasija de reactor 200 como la boquilla combinada de entrada/salida 371/370 para la vasija de generación de vapor se encuentran intencionadamente acopladas muy estrechamente a las carcasas de sus respectivas vasijas con una proyección radial mínima sobresaliendo de las carcasas. Esto le permite a la vasija de reactor 200 acoplarse directamente a la vasija de generación de vapor 300 por medio de las boquillas de entrada/salida, como se muestra en las FIGS. 1 y 2. Como se muestra en la FIG. 3, la boquilla combinada de entrada-salida 270/271 de la vasija de reactor, preferentemente, sobresale radialmente más allá de la carcasa 201 a una distancia que no es más que una proyección radial de la brida de soporte 280. La longitud total de la conexión de la boquilla de entrada/salida entre la vasija de reactor 200 y la vasija de generación de vapor 300 en determinada realización es inferior o igual al diámetro de la vasija de reactor 200, y/o de la vasija de generación de vapor 300 para eliminar largos recorridos de grandes tuberías de refrigerante entre las vasijas de reactor y de generación de vapor. En un ejemplo, la conexión de boquilla entre la vasija de reactor 200 y la vasija de generación de vapor 300 es recta sin codos ni curvas.

La vasija de generación de vapor 3, según la invención, se describirá a continuación, con más detalle. Con referencia a las FIGS. 1-5, en una realización, la vasija de generación de vapor 300 puede ser una estructura



alargada, orientada verticalmente que tiene una carcasa 312 cilíndrica que define un eje vertical EV2. En una realización, el eje vertical EV2 de la vasija de generación de vapor está desplazado horizontalmente desde el eje vertical EV2 de la vasija de reactor 200 de modo que la vasija de generación de vapor esté dispuesto lateralmente adyacente a la vasija de reactor. En una realización, la vasija de generación de vapor 300 tiene una altura que es al  
 5 menos tan alta como la altura de la vasija de reactor 200. La vasija de generación de vapor contiene y soporta desde el fondo hacia arriba, el precalentador 320, el generador de vapor 330 principal, el sobrecalentador 350 y el presurizador 380. En una realización, el precalentador 320 está formado por una porción inferior de la sección del generador de vapor 330 y, por lo tanto, no incluye chapas tubulares independientes. En ciertas disposiciones y configuraciones del ensamblaje 100 del generador de vapor, el precalentador 320 pueden omitirse dependiendo del  
 10 diseño termohidráulico del sistema.

En una realización, la vasija de generación de vapor 200 incluye una brida de soporte 400 reforzada que puede ser similar al soporte de la vasija de reactor 280 descrito en el presente documento. La vasija de generación de vapor puede estar soldada a la carcasa 312 y soportada, como se muestra en la FIG. 1, desde la pared divisoria 114.  
 15

El precalentador 320, el generador de vapor 330 y el sobrecalentador 350 son intercambiadores de calor tubulares que tienen, cada uno, una pluralidad de tubos rectos paralelos 332 (es decir, haz de tubos) con placas tubulares 333 dispuestas en los extremos o finales de cada haz de tubos que soportan los tubos. En una realización, el precalentador 320, el generador de vapor 330 y el sobrecalentador 350 están posicionados para formar una  
 20 disposición de intercambiadores de calor de tipo contraflujo paralelo en la que el refrigerante secundario (ciclo de Rankine) fluye en dirección contraria, pero paralela al refrigerante primario de reactor (véanse, por ejemplo, las FIGS. 4 y 5). El trío de los anteriores intercambiadores de calor tubulares (es decir, el precalentador, el generador de vapor y el sobrecalentador) están conectados hidráulicamente en serie tanto por el lado del tubo (refrigerante primario de reactor) como por el lado de la carcasa (formando el refrigerante secundario el fluido de trabajo del Ciclo de Rankine que cambia de fase de líquido a gas sobrecalentado).  
 25

La vasija de generación de vapor 300 incluye una carcasa superior 310, inferior 311 y cilíndrica 312 que se extiende axialmente y una tubería ascendente 337 interna que está alineada concéntricamente con la carcasa 312 y se encuentra sobre la línea central LC2 de la vasija. Los tubos 332 están dispuestos circunferencialmente alrededor del exterior de la tubería ascendente 337 entre la tubería ascendente y la carcasa 312 en secciones de la vasija de  
 30 generación de vapor 300 que incluye un precalentador 320, un generador de vapor 330 y un sobrecalentador 350. En una realización, la tubería ascendente 337 se extiende completamente a través de todas las chapas tubulares 333 asociadas con el precalentador 320, el generador de vapor 330 y el sobrecalentador 350 desde la parte superior de la vasija de generación de vapor 300 hasta la parte inferior para formar una trayectoria de flujo continua de refrigerante primario de reactor entre la vasija de reactor 200 y el presurizador 380.  
 35

En una realización, la vasija de generación de vapor incluye una sección superior 351 del sobrecalentador y una sección 331 inferior de generador de vapor que está montada de manera desmontable en la sección de generador de vapor tal como mediante una junta embridada 352 empernada. Esto permite que la sección 331 de generador de vapor (que puede incluir un generador de vapor 330 y un precalentador 320) y una sección 351 del sobrecalentador (que puede incluir el sobrecalentador 350 y el presurizador 380) puedan fabricarse por separado y expedirse a la  
 40 ubicación de la central energética para su ensamblaje allí.

La sección inferior 331 de generador de vapor se termina en la parte superior con un canal 334 superior embridado que está empernado a un canal inferior 335 embridado de la sección superior 351 del sobrecalentador para formar colectivamente la junta embridada 352 y un plenum intermedio 339 (véase la FIG. 2). La sección 331 inferior de generador de vapor se termina en una cabeza inferior 336b (como se observa mejor en la FIG. 4). La cabeza inferior 336b define un espacio anular entre la tubería ascendente 337 y la carcasa 312 que forma un plenum inferior 338 que recoge y canaliza el refrigerante primario de la vasija de generación de vapor 300 de vuelta a la vasija de reactor 200. La cabeza inferior 336b forma una boquilla de entrada-salida de flujo 371/370 que se dispone perpendicular a la carcasa 312 y la tubería ascendente 337. La boquilla de entrada 371 puede estar fluidicamente acoplada a la tubería ascendente 337 por un codo 371a para cambiar la dirección del refrigerante primario de horizontal a vertical.  
 45  
 50

La sección superior 351 del sobrecalentador se termina en la parte inferior con un canal inferior 334 embridado, como se ha indicado antes. La sección 351 del sobrecalentador está coronada por el presurizador 380, como se muestra en las FIGS. 2 y 5, que está en comunicación fluida tanto con la parte superior o salida de la tubería ascendente 337 como con la entrada a los tubos 332 del sobrecalentador. En una realización, el presurizador 380 está montado directamente en la carcasa 312 de la vasija de generación de vapor 300 y forma una cabeza superior 336a en la carcasa. En una realización, el presurizador tiene una cabeza abovedada o semiesférica y puede estar soldado a la carcasa 312 o, como alternativa, empernado en otras realizaciones posibles. El presurizador 380 forma un plenum superior que recoge refrigerante primario de reactor que asciende a través de la tubería ascendente 337 y distribuye el refrigerante primario por los tubos 332 del sobrecalentador. El presurizador 380 incluye un elemento de calentamiento/enfriamiento 381 (es decir, agua/ vapor) para controlar la presión del refrigerante primario del reactor. Como se muestra esquemáticamente en las FIGS. 2 y 5, el elemento 381 comprende un banco de calentadores eléctricos 383 que están instalados en la sección del presurizador que sirve para aumentar la presión llevando a ebullición parte del refrigerante primario y generando una burbuja de vapor que reside en la parte superior del  
 55  
 60  
 65

presurizador cerca de la cabeza (por encima de la interfaz líquido/gas 340 representada por la línea discontinua). Una columna de agua de rociado 384 está situada cerca de la cabeza superior 336a del presurizador que rocía agua sobre la burbuja de vapor, condensado de ese modo el vapor y reduciendo el tamaño de la burbuja de vapor. El aumento/disminución del tamaño de la burbuja de vapor sirve para aumentar/disminuir la presión del refrigerante primario dentro del sistema de refrigeración del reactor. En una realización ejemplar, una presión representativa del refrigerante primario mantenida por el presurizador 380 y el elemento de calentamiento/enfriamiento 381 puede ser, sin limitación alguna, de aproximadamente 15513210 Pa (2.250 psi).

En ejemplos alternativos, como se ha indicado antes, la interfaz líquido/gas 340 se forma entre un gas inerte, tal como el nitrógeno (N<sub>2</sub>) suministrado a través de tanques de alimentación (no mostrados) conectados al presurizador 380 y el refrigerante primario líquido.

El presurizador 380 puede conectarse a la parte superior de la sección 351 del sobrecalentador por encima de la parte más superior o placa tubular 333 de entrada, mostrada en la FIG. 5, por cualquier medio adecuado, incluyendo una conexión soldada, como la mostrada, o, como alternativa, la conexión empernada de algunas realizaciones. En una realización, como se muestra en las FIGS. 2 y 5, el presurizador 380 puede tener una parte superior o cabeza abovedada o semiesférica.

En un ejemplo, las superficies externas de los tubos 332 del sobrecalentador incluyen aletas integradas para compensar los bajos índices de transferencia de calor en el medio gaseoso de vapor sobrecalentado. El haz de tubos del sobrecalentador está protegido de la erosión (es decir, de diminutas gotas de agua que permanecen atrapadas en el vapor que fluye hacia arriba) asegurando que el flujo de vapor sea un contraflujo paralelo a lo largo, en lugar de a través, de los tubos del haz de tubos.

Con referencia a las FIGS. 2 y 4-5, se proporciona al menos un lazo de tuberías 303 con forma general de U para encauzar el vapor que fluye hacia arriba alrededor del plenum intermedio 339 y sobrepasar los canales embridados 334, 335 superior e inferior. Preferentemente, el lazo de tuberías 303 de vapor está situado cerca de la carcasa de la vasija de generación de vapor 300 y se hace tan corto como sea posible.

En un ejemplo, la vasija de generación de vapor 300 puede estar hecha de un metal resistente a la corrosión tal como el acero inoxidable.

A continuación, se describe la trayectoria de flujo del refrigerante primario de reactor y del refrigerante secundario para el ciclo de Rankine. Las FIGS. 2 y 3 muestran la trayectoria de flujo del refrigerante primario de reactor del ensamblaje 100 del generador de vapor. Las FIGS. 4-5 muestran principalmente la trayectoria de flujo del refrigerante secundario del ciclo de Rankine a través de la vasija de generación de vapor 300. El refrigerante primario enfriado ("frío") sale de la vasija de generación de vapor 300 a través de la boquilla de salida 370 y entra en la vasija de reactor 200 a través de la boquilla de entrada externa 270. El refrigerante primario fluye hacia abajo a través de la bajante anular 222 y entra en la parte inferior de la columna ascendente 224. El refrigerante primario fluye hacia arriba a través del cartucho de combustible 230 y se calienta por convención y conducción en el núcleo de combustible. El refrigerante primario que ahora está calentado o "caliente" sale de la vasija de reactor 200 a través de la boquilla de entrada externa 270 y entra en la vasija de generación de vapor 300 a través de la boquilla de entrada 371. El refrigerante primario caliente fluye en vertical hacia arriba por la tubería ascendente 337 y se dirige a la parte superior del "apilamiento" dentro del presurizador 380. El refrigerante primario caliente invierte su dirección y empieza su recorrido hacia abajo a través de la vasija de generación de vapor 200. El refrigerante primario caliente fluye primero hacia arriba a través del sobrecalentador 350 por el lado del tubo del haz de tubos que tiene vapor saturado (refrigerante secundario) fluyendo hacia arriba por el lado de la carcasa desde el generador de vapor 230 por debajo al apilamiento. El vapor saturado se sobrecalienta y sale de la vasija de generación de vapor 300. El refrigerante ahora menos caliente sigue fluyendo hacia abajo a través de la vasija de generación de vapor 300 procediendo a continuación, a través del generador de vapor 330 por el lado del tubo. Del lado de la carcasa, el refrigerante secundario líquido sufre un cambio de fase y se convierte en vapor a medida que el refrigerante primario se enfría aún más cediendo calor al refrigerante secundario. El ahora enfriado refrigerante primario fluye hacia abajo a través del precalentador 320 del lado del tubo con el que se encuentra y precalienta el refrigerante secundario del lado de la carcasa del haz de tubos aguas arriba del generador de vapor. El refrigerante primario ahora frío completa el lazo cerrado de flujo a través de la vasija de generación de vapor 300 y la vasija de reactor 200 y vuelve a entrar en la vasija de reactor a través de la boquilla de entrada 270.

En una realización, una temperatura "caliente" de salida, ejemplar y no limitante, de la vasija de reactor puede estar en un intervalo de aproximadamente 301,7 °C a 315,6 °C (de 575 a 600 grados F), ambos incluidos. Una temperatura "fría" de entrada, ejemplar y no limitante, en la vasija de reactor puede estar en un intervalo de aproximadamente 176,7 °C a 196,1 °C (de 350 a 385 grados F), ambos incluidos.

Una presión operativa ejemplar de la vasija del reactor puede ser de aproximadamente 15513210 Pa (2.250 psi) que se mantiene mediante el presurizador 380. Se pueden usar otras temperaturas y presiones de flujo adecuadas dependiendo de los requisitos de transferencia de calor de la aplicación específica y de los parámetros operativos de producción de vapor del ciclo de Rankine. En una realización, el refrigerante primario de la vasija del reactor puede ser agua desmineralizada no borada.

En un ejemplo, la carcasa 312 de la vasija de generación de vapor puede estar hecha de acero, tal como acero al carbono de tipo 508. Las chapas tubulares 333 pueden estar hechas del mismo acero con un revestimiento de Inconel cuando los tubos 312 están hechos de Inconel.

- 5 Si bien se ha descrito e ilustrado la invención con suficiente detalle como para que los expertos en la materia puedan reproducirla y usarla fácilmente, diversas alternativas, modificaciones y mejoras deberían resultar fácilmente evidentes sin desviarse por ello del alcance de la invención.

## REIVINDICACIONES

1. Un sistema nuclear de suministro de vapor con circulación natural de refrigerante impulsada por gravedad, comprendiendo el sistema:

5 una vasija de reactor (200) verticalmente alargada que tiene un primer eje vertical y que comprende una carcasa (201) que forma una cavidad interna (208);  
 un elevador vertical (224) y una bajante dispuestos en la cavidad de la vasija de reactor (200) para conducir un flujo de fluido, estando la bajante en comunicación fluida con el elevador vertical (224);  
 10 un núcleo de reactor que comprende combustible nuclear dispuesto dentro de la cavidad interna (208) de la vasija de reactor (200);  
 una vasija de generación de vapor (300) verticalmente alargada que tiene un segundo eje vertical y una carcasa cilíndrica (201) que incluye una pluralidad de secciones de intercambiador de calor conectadas fluidicamente en una relación de apilamiento vertical, formándose la carcasa (201) de la vasija de generación de vapor por separado de la carcasa (201) de la vasija de reactor y estando fluidicamente conectadas entre sí a través de un acoplamiento fluido;  
 15 un sistema de refrigerante primario de reactor que tiene un lazo cerrado de flujo accionado por gravedad con un refrigerante primario que fluye a través de la bajante y el elevador vertical (224) de la vasija de reactor (200) para ser calentado por el núcleo del reactor, fluyendo además el refrigerante primario a través de las secciones del intercambiador de calor de la vasija de generación de vapor (300) para transferir calor a un refrigerante secundario que fluye a través de la vasija de generación de vapor (300);  
 en donde el refrigerante secundario fluye verticalmente a través de las secciones del intercambiador de calor de la vasija de generación de vapor (300) y cambia de fase líquida a fase vapor;  
 en donde el primer eje vertical de la vasija de reactor (200) está desplazado lateralmente a partir del segundo eje vertical de la vasija de generación de vapor (300);  
 25 caracterizado por que el acoplamiento fluido comprende la vasija de reactor (200) que además incluye una primera boquilla de salida (270) de refrigerante primario y una primera boquilla de entrada (271) de refrigerante primario alineada concéntricamente con la primera boquilla de salida (270), y la vasija de generación de vapor (300) además incluye una segunda boquilla de salida (370) de refrigerante primario y una segunda boquilla de entrada (371) de refrigerante primario alineada concéntricamente con la segunda boquilla de salida (370);  
 30 en donde la primera boquilla de salida de refrigerante primario está conectada fluidicamente con la segunda boquilla de entrada (371) de refrigerante primario y la segunda boquilla de salida (370) de refrigerante primario está conectada fluidicamente con la primera boquilla de entrada (271) de refrigerante primario, saliendo el refrigerante primario de la vasija de reactor (200) a través de la primera boquilla de salida (270) de refrigerante primario y entrando en la vasija de generación de vapor (300) a través de la segunda boquilla de entrada (371) de refrigerante primario y saliendo el refrigerante primario de la vasija de generación de vapor (300) a través de la segunda boquilla de salida (370) de refrigerante primario y entrando en la vasija de reactor (200) a través de la primera boquilla de entrada (271) de refrigerante primario;  
 en donde las secciones de intercambio de calor de la vasija de generación de vapor (300) incluyen una sección inferior (331) de generación de vapor y una sección superior (351) de sobrecalentador dispuesta encima de la sección de generación de vapor, operándose la sección (351) de sobrecalentador para calentar refrigerante secundario hasta condiciones de vapor sobrecalentado;  
 en donde la vasija de generación de vapor (300) incluye un plenum intermedio (339) de flujo dispuesto entre una placa tubular superior de la sección inferior (331) de generación de vapor y una placa tubular inferior de la sección superior (351) del sobrecalentador, fluyendo el refrigerante primario a través del plenum intermedio (339) desde la sección superior (351) del sobrecalentador hasta la sección inferior (331) de generación de vapor; y  
 en donde la vasija de generación de vapor (300) incluye un lazo externo de tuberías de derivación de refrigerante secundario que conectan fluidicamente el lado de carcasa de la sección superior del sobrecalentador y el lado de carcasa de la sección inferior (331) de generación de vapor, estando el lazo de tuberías de derivación dispuestas para servir de puente por encima del plenum intermedio (339) de flujo.

2. El sistema según la reivindicación 1, en donde la bajante está formada por un espacio anular entre la carcasa (201) de la vasija de reactor (200) y el elevador vertical (224) que está axialmente alineado con el primer eje vertical alineado concéntricamente con el elevador vertical (224);

3. El sistema según la reivindicación 1, que además comprende una tubería central ascendente (337) en vasija de generación de vapor (300) y haces de tubos de los intercambiadores de calor que están dispuestos radialmente alrededor de la tubería ascendente (337).

4. El sistema según la reivindicación 1, en donde el sistema de refrigerante primario no incluye una bomba.

5. El sistema según la reivindicación 1, en donde el funcionamiento del núcleo del reactor calienta el refrigerante primario hasta un grado suficiente como para provocar la circulación natural del refrigerante primario a través del sistema de lazo cerrado de refrigerante primario entre la vasija de reactor (200) y la vasija de generación de vapor (300).

6. El sistema según la reivindicación 1, en donde la vasija de reactor (200) y la vasija de generación de vapor (300) están soportadas de manera independiente.
- 5 7. El sistema según la reivindicación 1, en donde la vasija de generación de vapor (300) además incluye una sección de precalentador (320) dispuesta debajo de la sección de generación de vapor; y en donde la sección de precalentador (320) está formada por una porción inferior de la sección de generación de vapor.
- 10 8. El sistema según la reivindicación 1, en donde el refrigerante secundario fluye hacia arriba a través de la vasija de generación de vapor (300) y el refrigerante primario fluye hacia abajo a través de la vasija de generación de vapor (300); y en donde el refrigerante secundario entra por una porción inferior de la vasija de generación de vapor (300) como líquido saturado y sale por una porción superior de la vasija de generación de vapor (300) como vapor sobrecalentado.
- 15 9. El sistema según la reivindicación 1, en donde la vasija de generación de vapor (300) incluye una tubería central ascendente (337) que se extiende verticalmente que está acoplada fluidicamente con la vasija de reactor (200), fluyendo el refrigerante primario desde la vasija de reactor (200) hacia arriba a través de la tubería ascendente (337); en donde el refrigerante secundario fluye verticalmente hacia arriba de la vasija de generación de vapor (300) entre la carcasa (201) de la vasija de generación de vapor (300) y la tubería ascendente (337); y en donde el refrigerante primario además fluye verticalmente hacia abajo a través de los intercambiadores de calor apilados en la vasija de  
20 generación de vapor (300).
- 25 10. El sistema según la reivindicación 1, que además comprende un presurizador (380) montado sobre un extremo superior de la vasija de generación de vapor (300), incluyendo el presurizador (380) una cabeza que cierra el extremo superior; y en donde el presurizador (380) forma una interfaz líquido/gas del refrigerante primario en el extremo superior de la vasija de generación de vapor (300).
- 30 11. El sistema según la reivindicación 1, en donde la vasija de generación de vapor (300) tiene una altura que es tan alta como una porción de la vasija de reactor (200) que contiene el refrigerante primario.
- 35 12. El sistema según la reivindicación 1, en donde la primera y segunda boquillas de entrada (271, 371) de refrigerante primario y la primera y segunda boquillas de salida (270, 370) de refrigerante primario definen colectivamente un acoplamiento fluido de refrigerante primario estrechamente acoplado que tiene una longitud lateral que es menor que un diámetro de la vasija de generación de vapor (300).
- 40 13. Un método para generar vapor en el sistema nuclear de generación de vapor de acuerdo con la reivindicación 1, comprendiendo el método:  
calentar un refrigerante primario líquido en un núcleo de un reactor nuclear dispuesto en una vasija de reactor (200);  
hacer fluir el refrigerante primario caliente hacia arriba a través de la vasija de reactor (200) en una primera dirección vertical dentro de un elevador vertical (224) que está conectado fluidicamente al núcleo del reactor;  
descargar el refrigerante primario caliente desde una porción superior de la vasija de reactor (200) a través de una salida;  
45 recibir el refrigerante primario caliente en una porción inferior de la vasija de generación de vapor (300) a través de una entrada;  
hacer fluir el refrigerante primario caliente hacia arriba a través de la vasija de generación de vapor (300) en la primera dirección vertical dentro de una tubería ascendente (224) vertical;  
recibir el refrigerante primario caliente en una parte superior de la vasija;  
50 invertir verticalmente la dirección del flujo de refrigerante primario caliente de hacia arriba en la primera dirección vertical a hacia abajo en una segunda dirección vertical;  
hacer fluir el refrigerante primario caliente hacia abajo a través de la vasija de generación de vapor (300) en la segunda dirección vertical, en donde el refrigerante primario se enfría; y  
retornar el refrigerante primario enfriado a la vasija de reactor (200); y  
55 repetir la etapa de calentamiento en la vasija de reactor (200);  
en donde el flujo del refrigerante primario a través de la vasija de reactor (200) y la vasija de generación de vapor (300) forma un lazo cerrado de circulación de flujo.
- 60 14. El método según la reivindicación 13, que además comprende hacer fluir un refrigerante secundario hacia arriba a través de la vasija de generación de vapor (300) paralelo a la primera y segunda direcciones verticales del refrigerante primario; y entrando el segundo refrigerante por una porción inferior de la vasija de generación de vapor (300) como un líquido saturado y saliendo por una porción superior de la vasija de generación de vapor (300) como un vapor sobrecalentado.

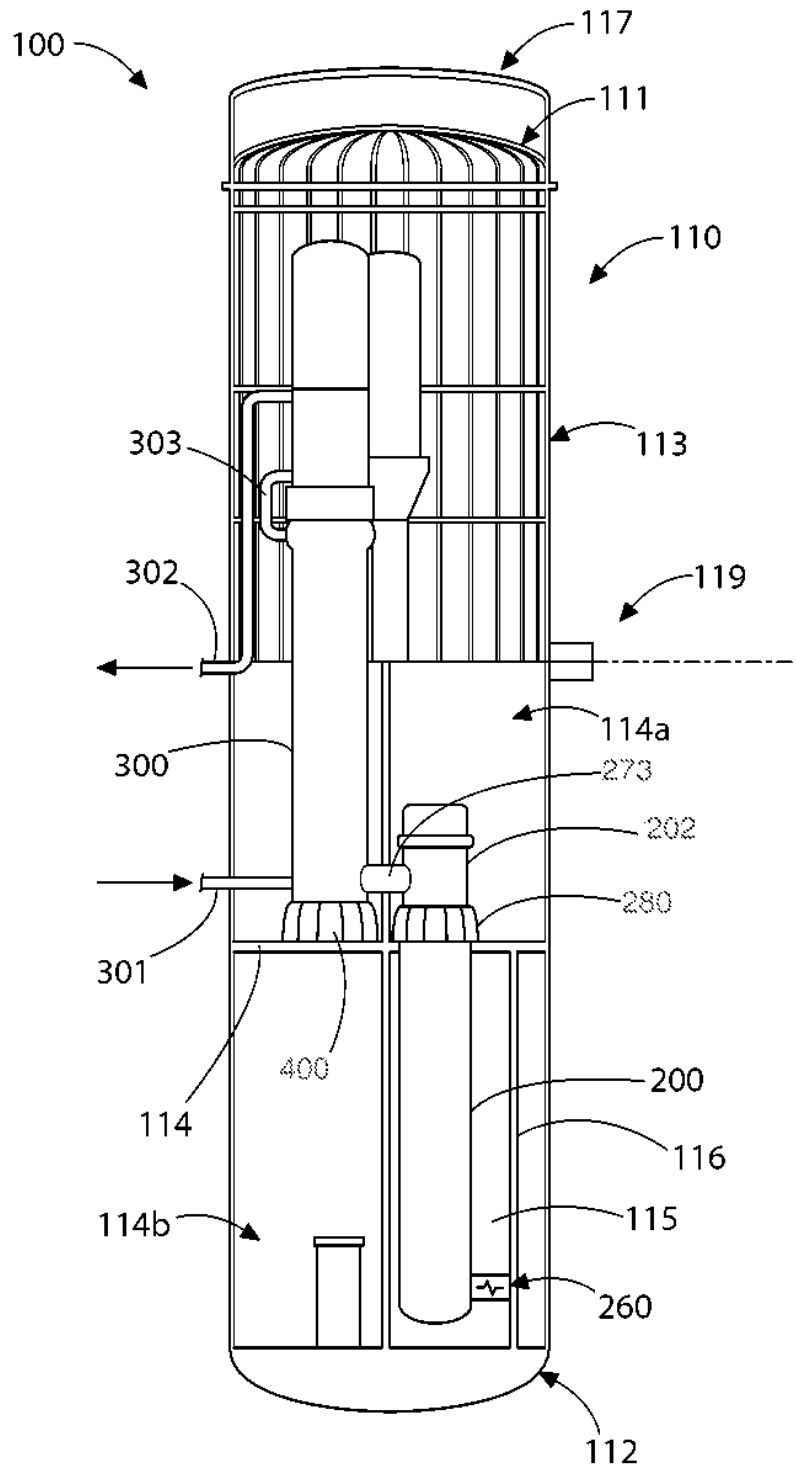


FIG. 1

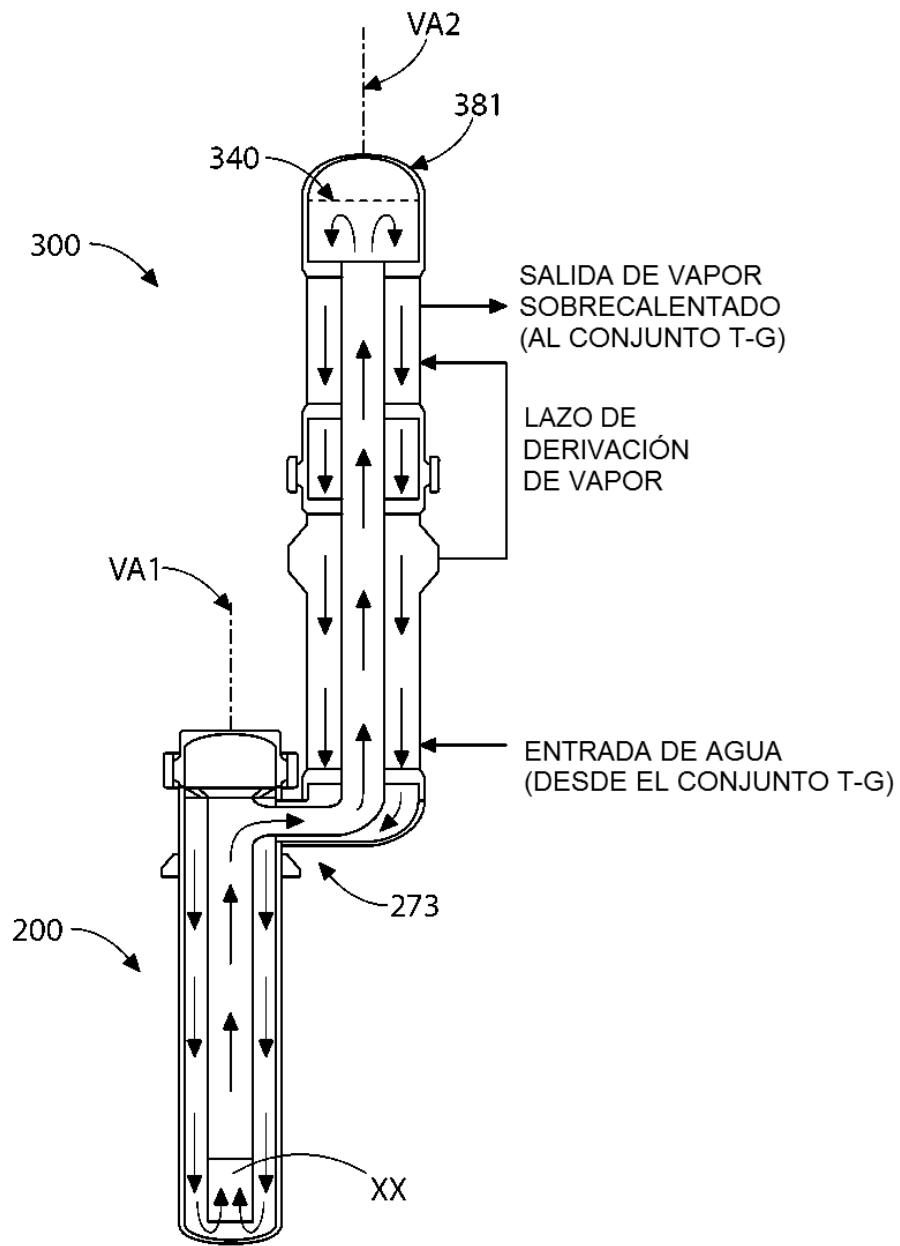


FIG. 2

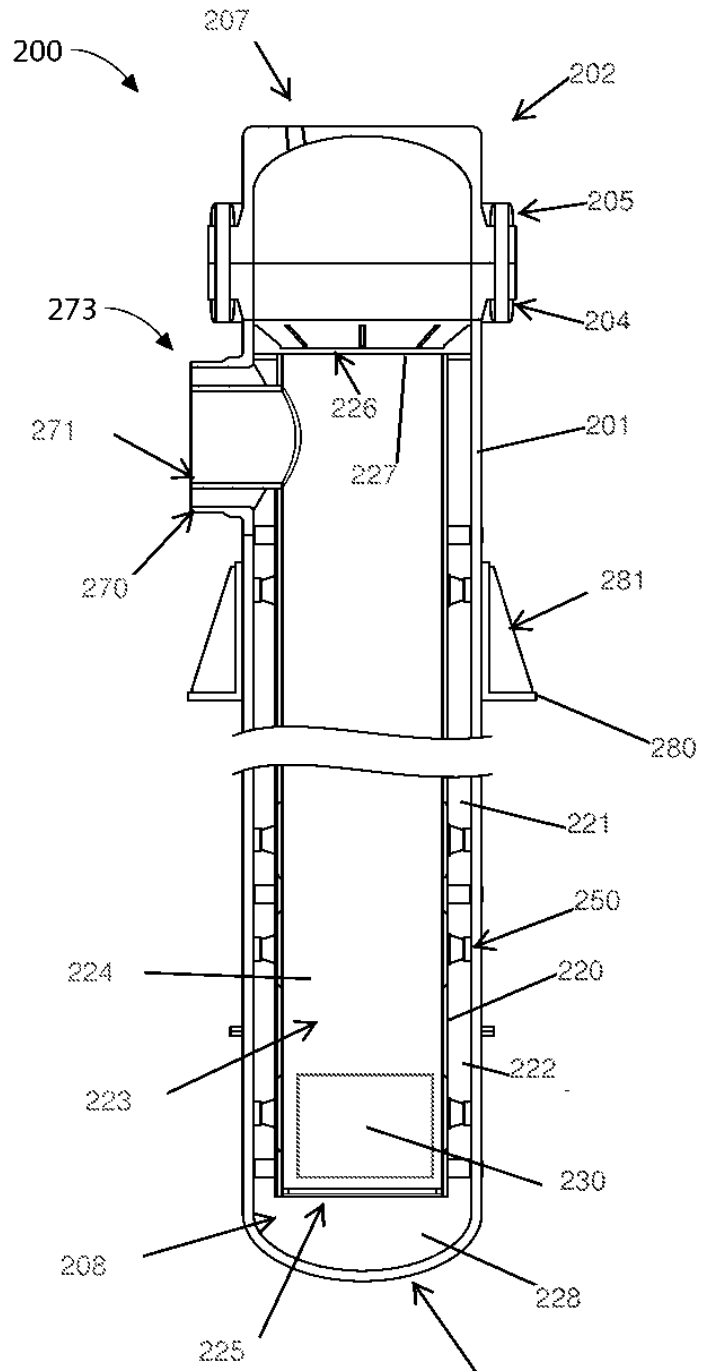


FIG. 3



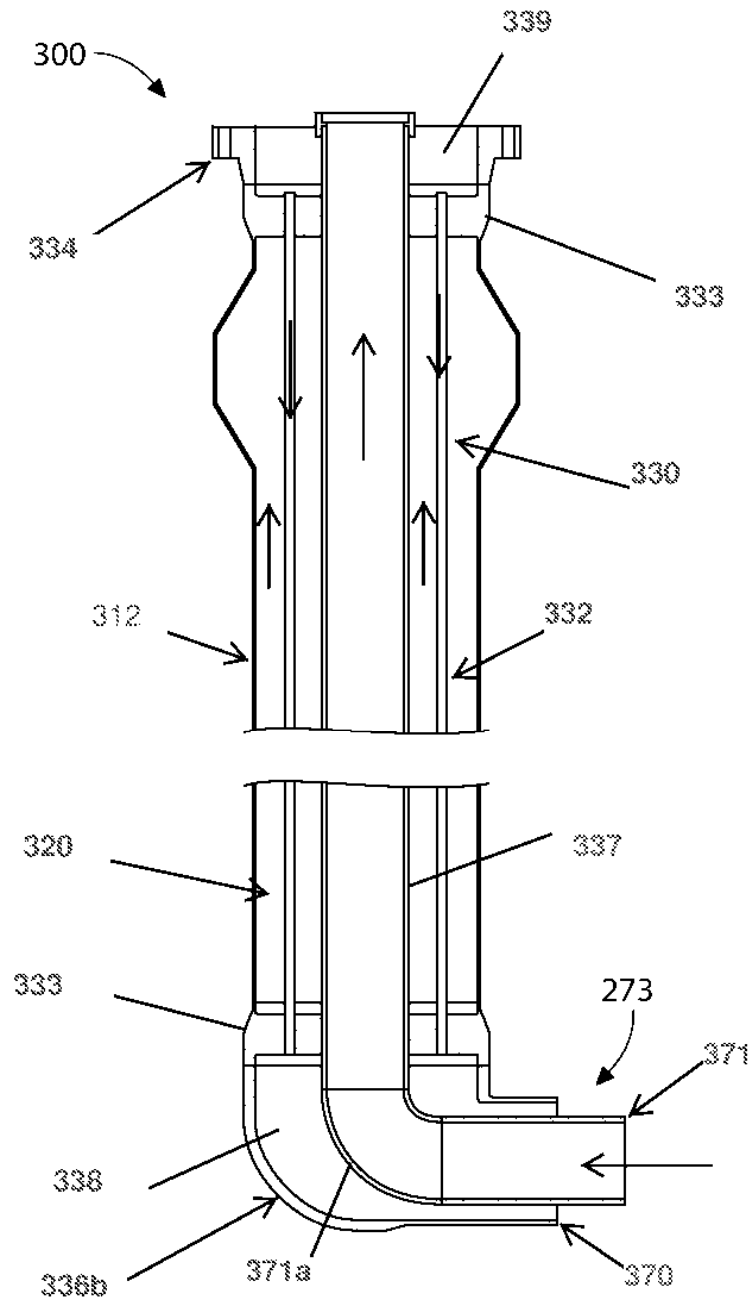


FIG. 4

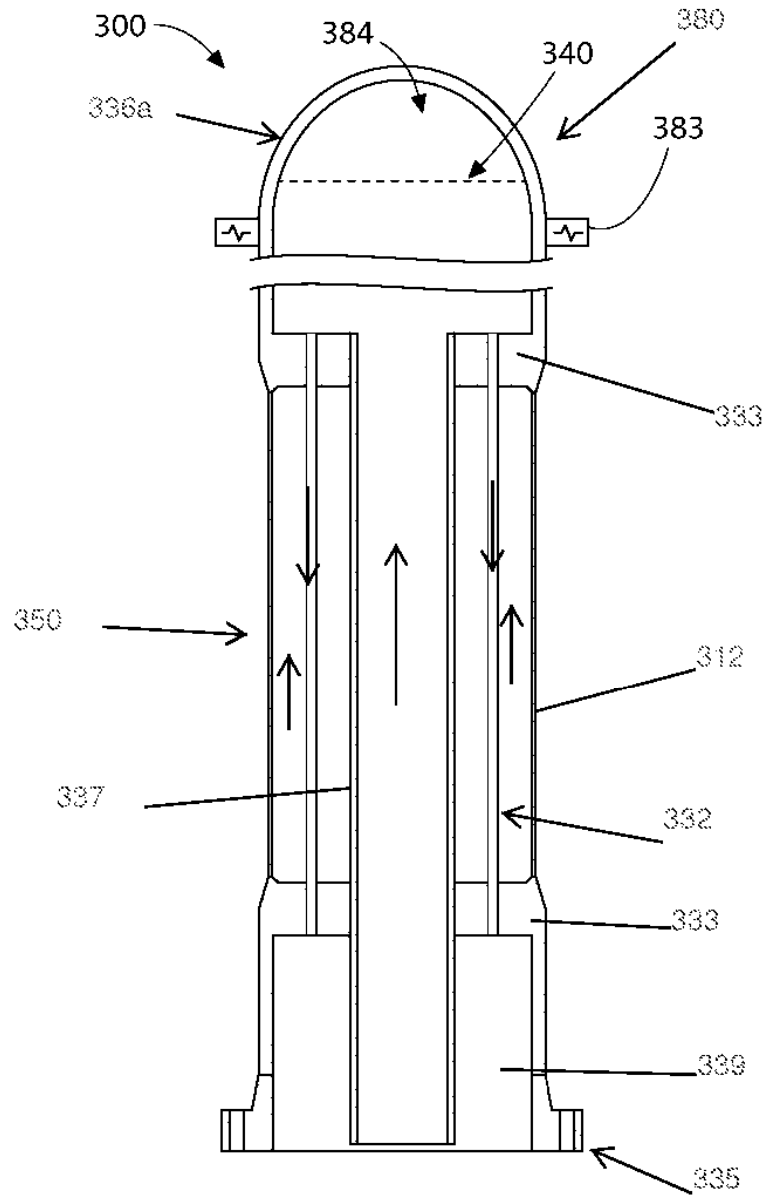


FIG. 5

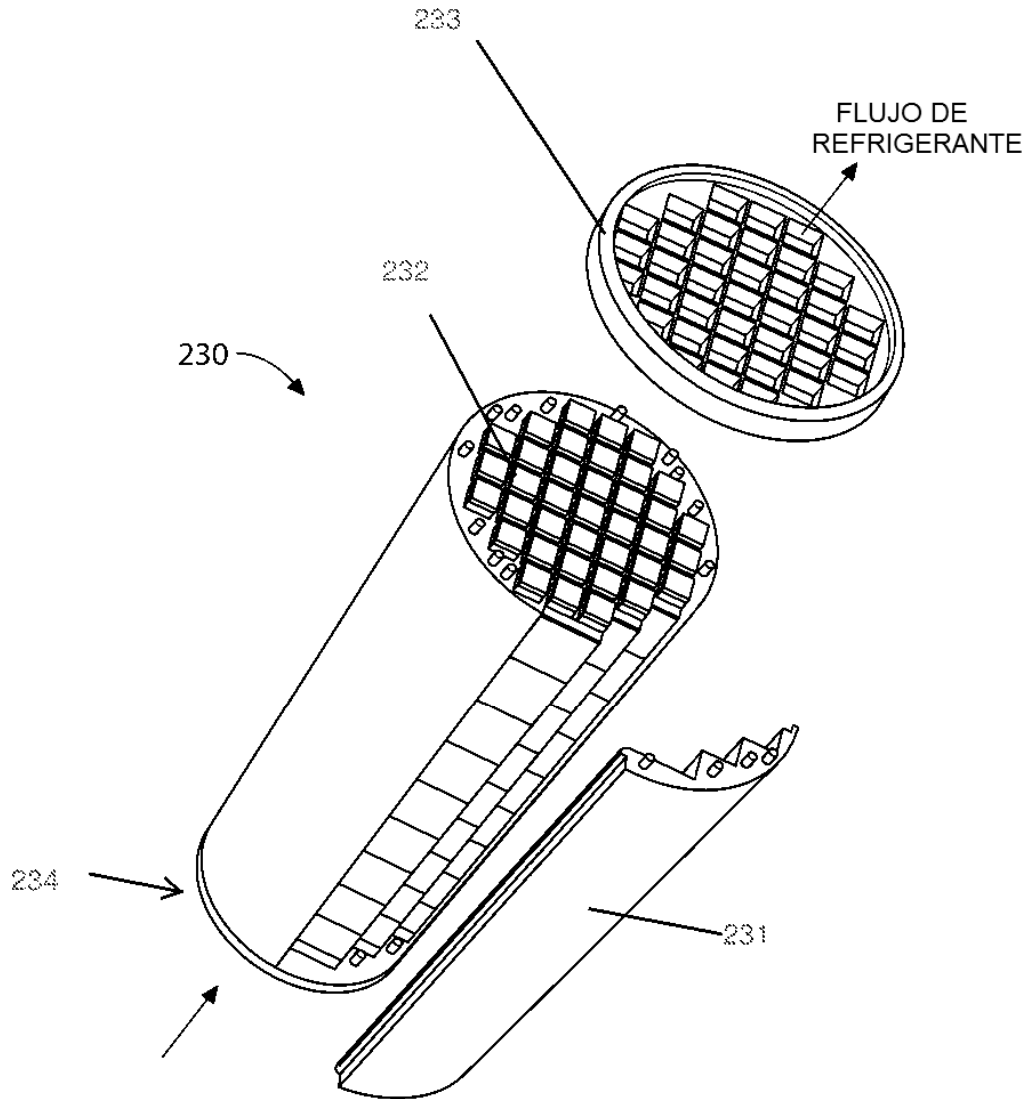


FIG. 6

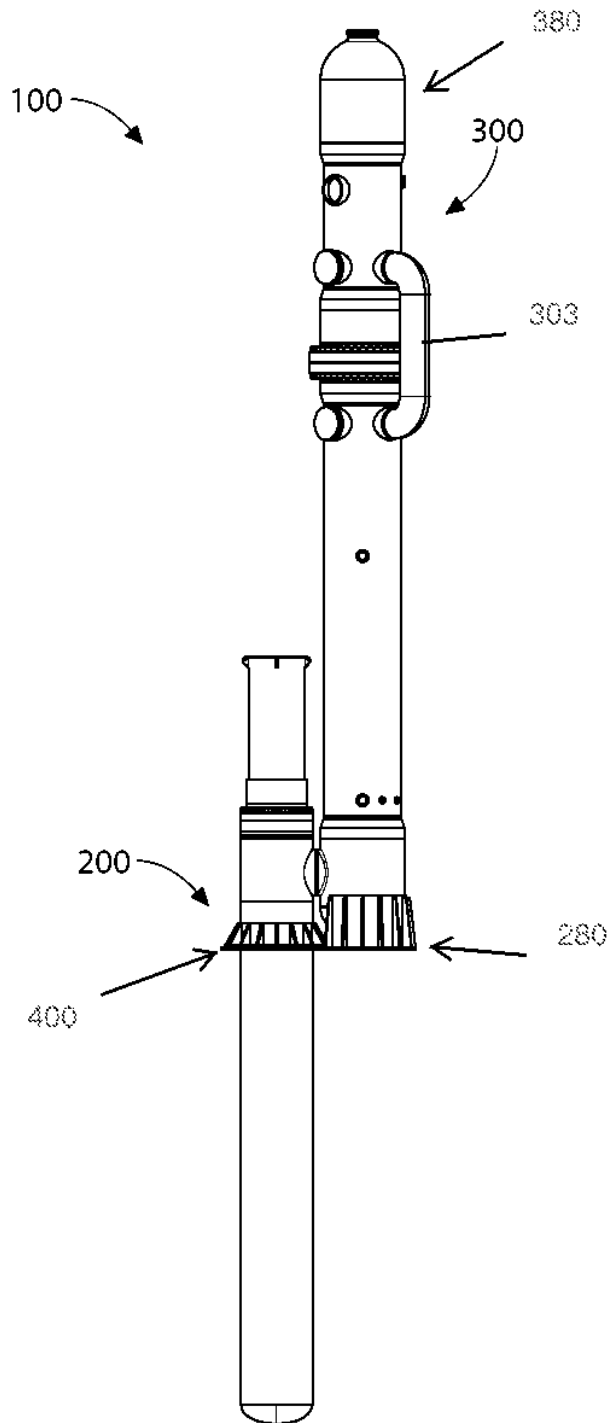


FIG. 7

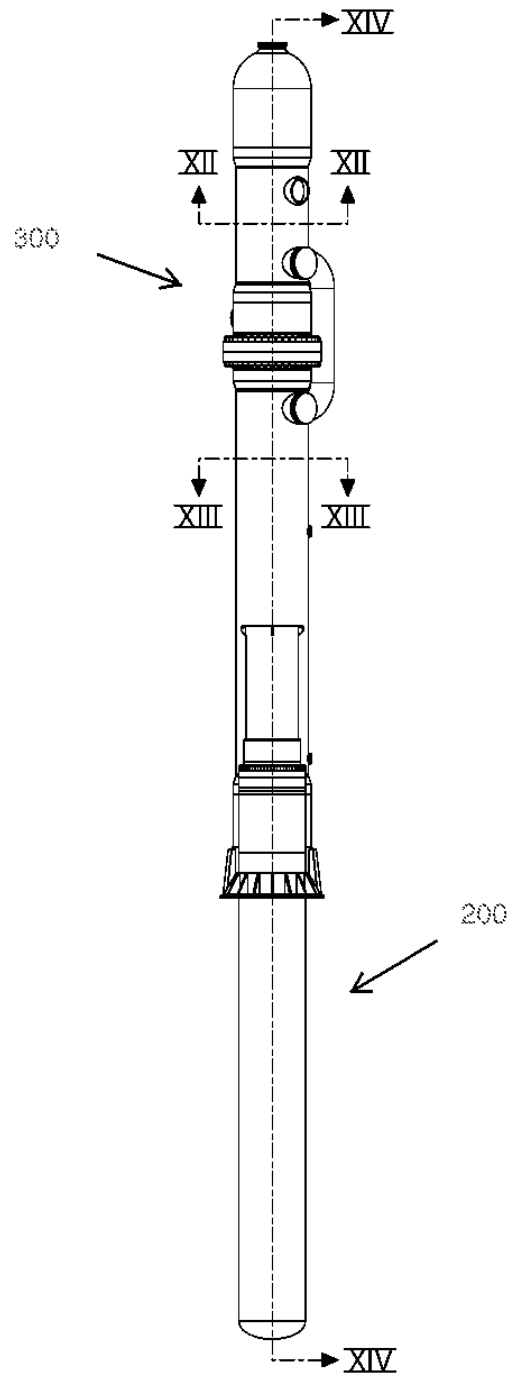


FIG. 8

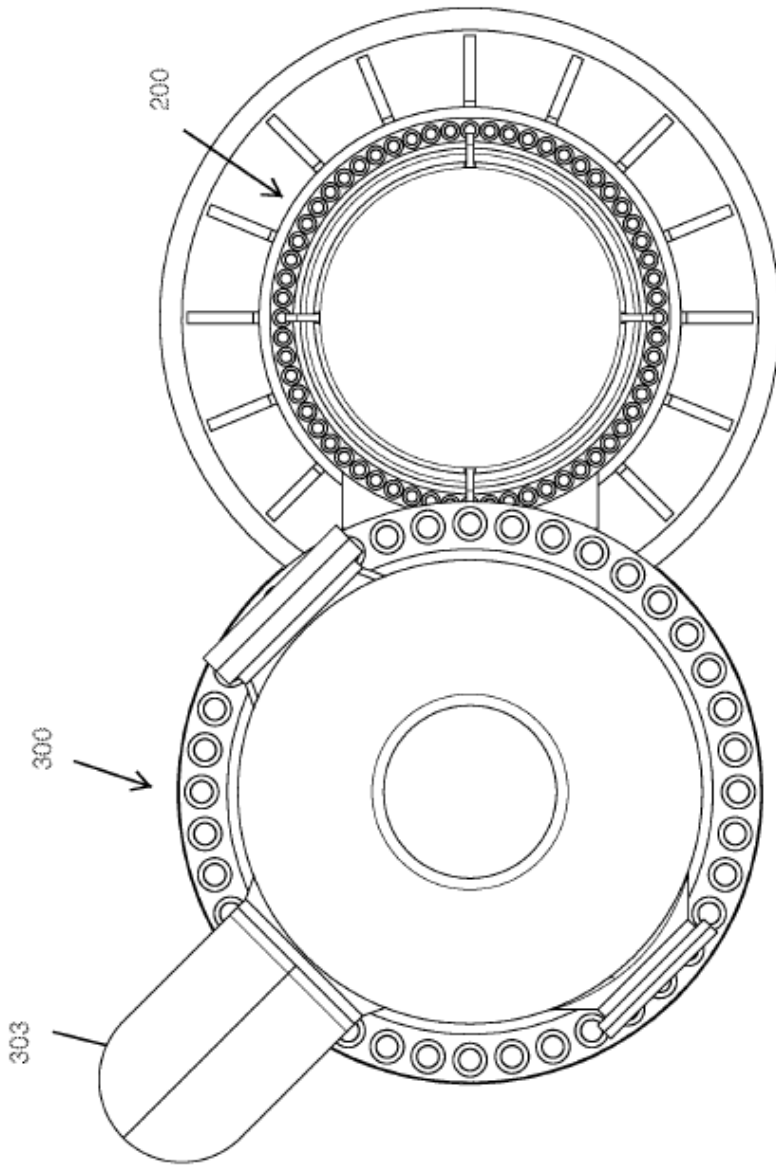


FIG. 9

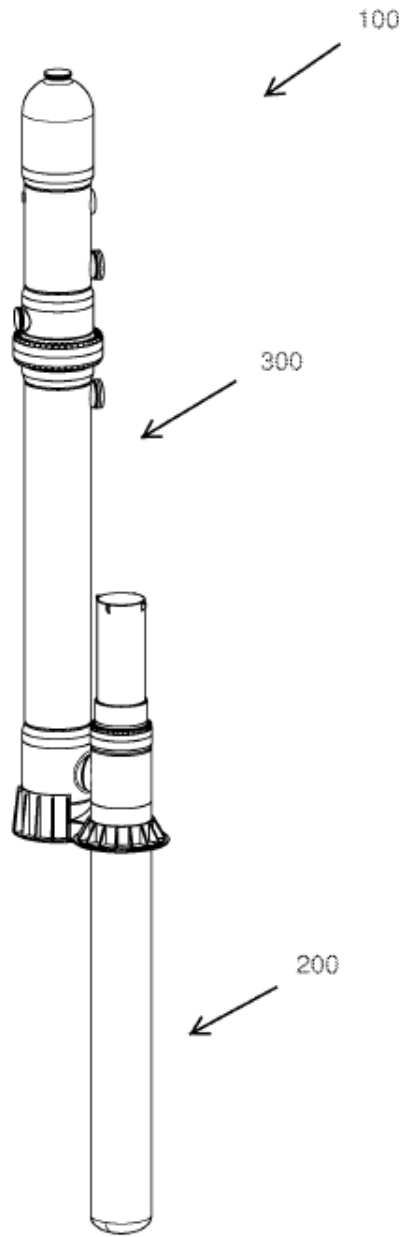


FIG. 10

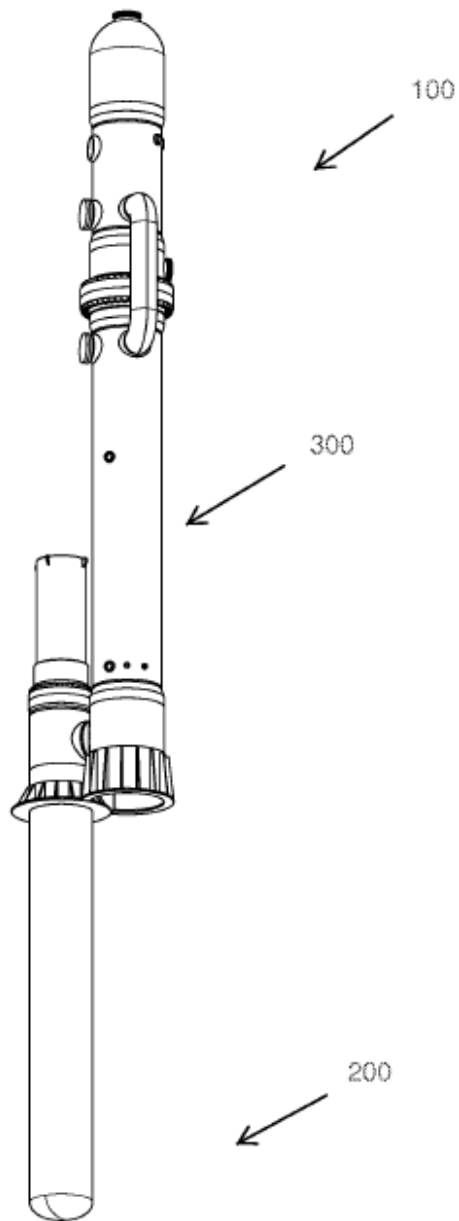


FIG. 11



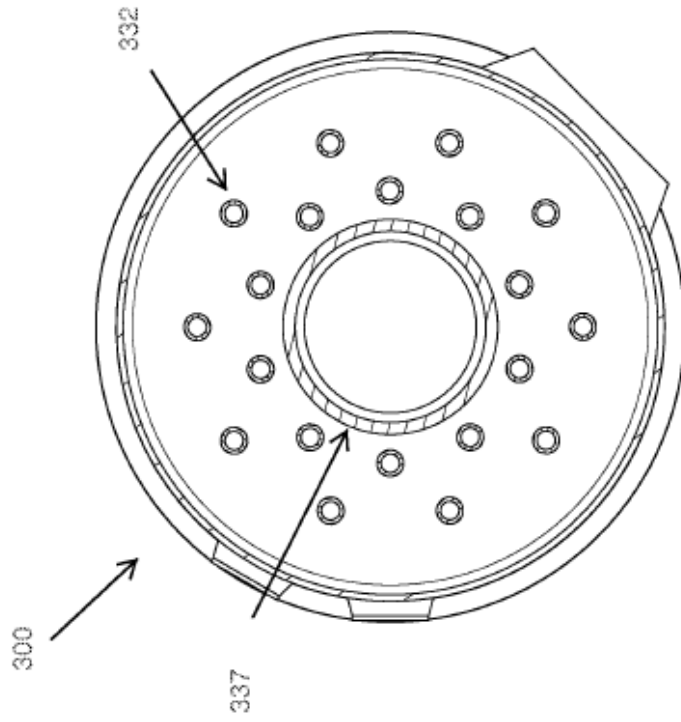


FIG. 12

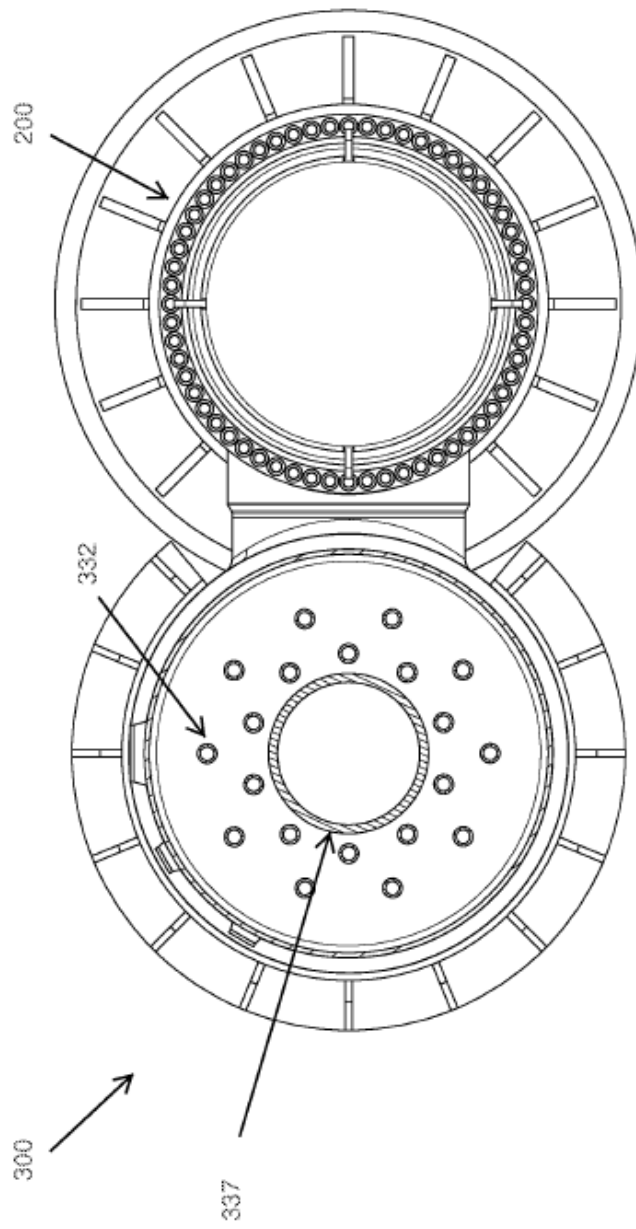


FIG. 13

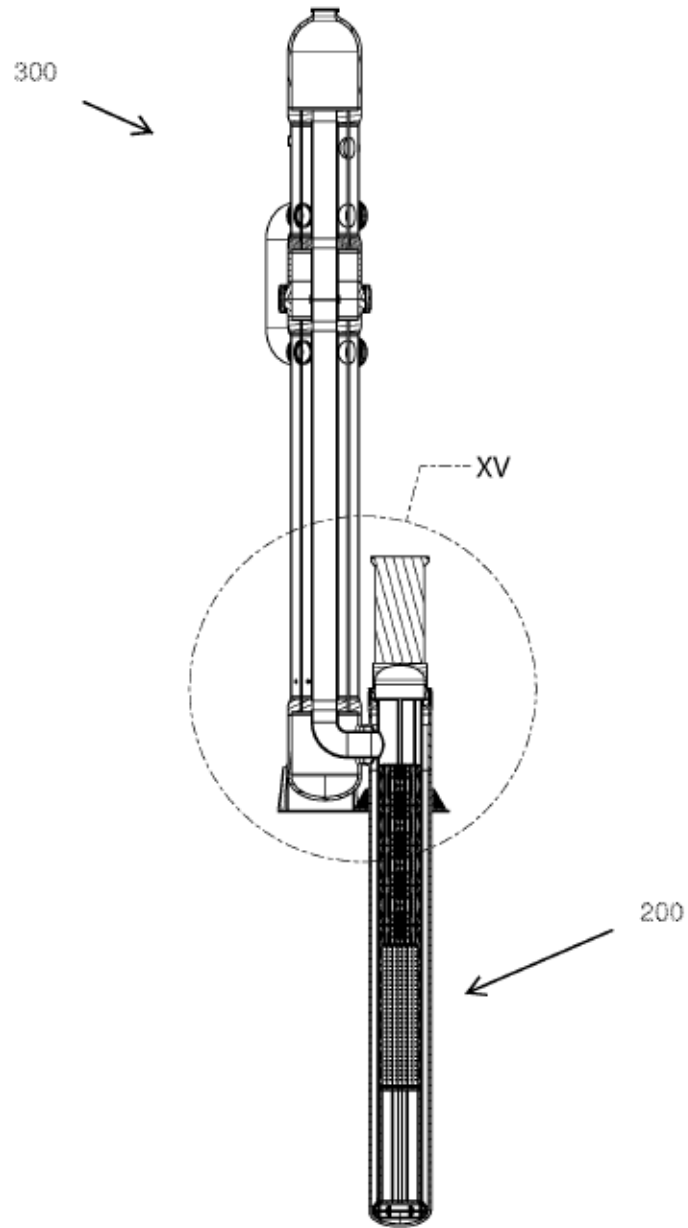


FIG. 14

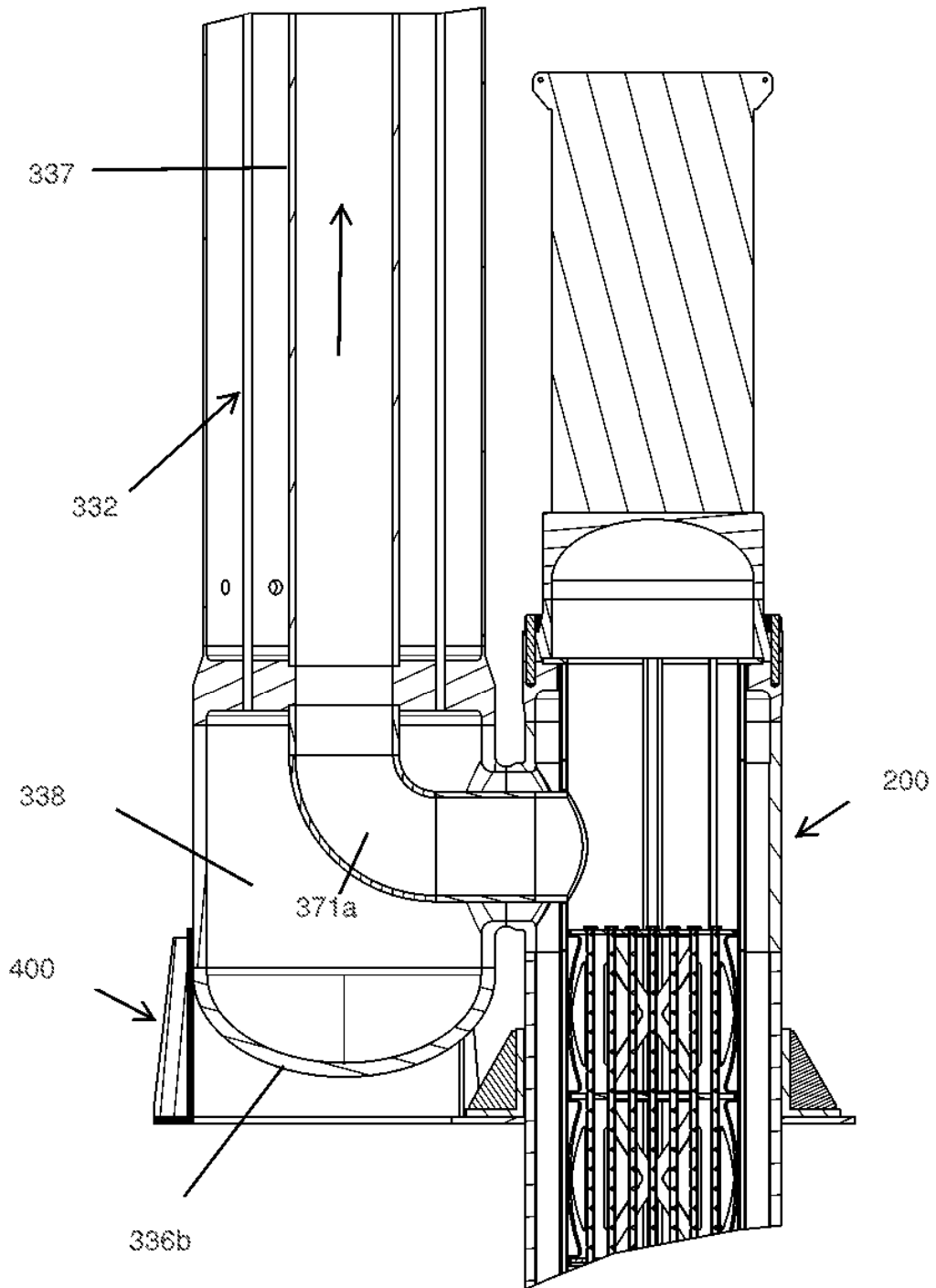


FIG. 15