

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 677 101**

51 Int. Cl.:

G21C 5/02 (2006.01)

G21C 7/22 (2006.01)

G21C 15/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.05.2012 PCT/US2012/037314**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.11.2012 WO12158459**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.05.2012 E 12784860 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.04.2018 EP 2707881**

54 Título: **Método y aparato de control de reactor nuclear**

30 Prioridad:

13.05.2011 US 201161485656 P

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

30.07.2018

73 Titular/es:

**MANN, NEAL (100.0%)
909 Massachusetts Ave. NE
Washington, District of Columbia 20002, US**

72 Inventor/es:

MANN, NEAL

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 677 101 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

Método y aparato de control de reactor nuclear

Solicitudes relacionadas

5 Esta solicitud reivindica el beneficio de la solicitud de patente provisional de EE. UU. N.º 61/485.656, presentada el 13 de mayo de 2011.

Campo técnico

La presente descripción se dirige a un método y un aparato de control de reactor nuclear, y más particularmente, a un método y aparato de control para controlar la potencia de salida total de un reactor nuclear.

Antecedentes

10 Los reactores nucleares que usan sistemas convencionales de control de reactor nuclear tienen varias deficiencias. Los reactores que usan sistemas de control convencionales utilizan ajustes constantes para la cantidad de material absorbente de neutrones en el núcleo de reactor, y tienen una reducida ratio de conversión porque absorben una cantidad excesiva de neutrones. También, los reactores que usan sistemas de control convencionales no tienen un intervalo relativamente grande de control de reactividad y así usan combustible con un intervalo relativamente estrecho
15 de contenido fisionable. Además, los reactores que usan sistemas de control convencionales son reabastecidos frecuentemente, no capturan un gran porcentaje de la energía potencial en el combustible, y dejan una cantidad relativamente alta de desperdicios radioactivos por kWh de potencia generada.

El método de control de los reactores Canadá Deuterio Uranio (CANDU) trató de abordar algunos de estos problemas. Sin embargo, el reactor CANDU usaba varillas de ajuste, que absorbían una cantidad excesiva de neutrones, y así no
20 proporcionaban un sistema de control que venciera adecuadamente deficiencias en la tecnología convencional.

El documento JP H04 296696 A propone proporcionar un alojamiento que tenga una cavidad en forma de “vaso de precipitado invertido” en la piscina de moderador cerca de las varillas de combustible. Dependiendo de la salida de las varillas de combustible la cavidad se rellena con vapor de moderador. La finalidad es ajustar la salida local a fin de hacer plana la distribución de salida del núcleo de reactor.

25 La presente descripción se dirige a vencer una o más de las desventajas presentadas anteriormente y/u otras deficiencias en la técnica.

Compendio de la descripción

Según un aspecto, la presente descripción se dirige hacia un método para controlar la salida de potencia total de un reactor nuclear. El método incluye proporcionar una zona de moderador en un núcleo del reactor nuclear, proporcionar
30 un combustible en la zona de moderador, y proporcionar una pluralidad de alojamientos, teniendo cada uno una cavidad, adyacente al combustible. El método también incluye permitir movimiento de un moderador entre la zona de moderador y la cavidad del uno o más alojamientos en una parte más baja del uno o más alojamientos. El método incluye además confinar moderador en la cavidad del uno o más alojamientos en una parte superior del uno o más alojamientos. El método incluye además retirar una cantidad del calor del moderador en la cavidad que es
35 sustancialmente igual a una cantidad de calor impartido por conducción de calor, neutrones o radiación gamma desde el conjunto de combustible adentro del moderador en la cavidad, de manera que la cantidad de moderador líquido en el alojamiento pueda ser controlada. El calor se retira por medio de un tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador que incluye uno o más orificios ubicados en los lados del tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador configurados para permitir que moderador de neutrones fluido relativamente más frío fluya adentro de la cavidad del
40 alojamiento para mezclarse con moderador de neutrones fluido ya dispuesto en la cavidad.

Según otro aspecto, la presente descripción se dirige hacia un aparato para un reactor nuclear. El reactor nuclear tiene un núcleo de reactor que incluye un conjunto de combustible, una zona de reflector que rodea el núcleo de reactor y una pluralidad de alojamientos dispuestos adyacentes a los tubos de combustible del conjunto de combustible, cada alojamiento tiene una cavidad. La parte más baja de cada alojamiento está abierta para movimiento del moderador
45 adentro y afuera de la cavidad y una parte superior de cada alojamiento está cerrada para movimiento del moderador entre la zona de moderador y la cavidad, de manera que el moderador de neutrones fluido se mueve desde al menos uno de la pluralidad de alojamientos a la zona de reflector a través de la parte más baja del al menos uno de la pluralidad de alojamientos, y el moderador de neutrones fluido se mueve desde la zona de reflector a al menos uno de la pluralidad de alojamientos a través de la parte más baja del al menos uno de la pluralidad de alojamientos.
50 Adicionalmente, se proporciona un tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador. Este tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador incluye uno o más orificios ubicados en los lados del tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador configurado para permitir que moderador de neutrones fluido relativamente más frío fluya adentro de la cavidad del alojamiento para mezclarse con moderador de neutrones fluido ya dispuesto en la cavidad, de manera que el moderador dentro del alojamiento puede ser enfriado y así la cantidad del moderador líquido en el alojamiento
55 puede ser influenciada.

Breve descripción de los dibujos

- la figura 1 es una ilustración esquemática de un sistema ejemplar de reactor nuclear descrito;
- la figura 2 es una vista en planta de un primer reactor ejemplar del sistema de reactor nuclear de la figura 1;
- la figura 2A es una vista escalada en planta de la disposición del sistema de reactor nuclear de la figura 1;
- 5 la figura 3 es una vista en sección tomada a través de la sección A-A del reactor mostrado en la figura 2;
- la figura 3A es una vista en sección escalada tomada a través de la sección A-A del reactor mostrado en la figura 2;
- la figura 4 es una ilustración esquemática de una disposición ejemplar de tubo de combustible del reactor;
- la figura 5 es una vista lateral de la disposición de tubo de combustible de la figura 4;
- la figura 6 es una ilustración esquemática de otra disposición ejemplar de tubo de combustible del reactor;
- 10 la figura 7 es una vista en sección tomada a través de la sección B-B del reactor mostrado en la figura 3;
- la figura 8 es una vista detallada de una distribución ejemplar de cavidad de control del reactor;
- la figura 8A es otra vista detallada de una distribución ejemplar de cavidad de control del reactor;
- la figura 8B es otra vista detallada de una distribución ejemplar de cavidad de control del reactor;
- la figura 8C es una ilustración esquemática de una distribución ejemplar de cavidad de control del reactor;
- 15 la figura 8D es otra ilustración esquemática de una distribución ejemplar de cavidad de control del reactor;
- la figura 9 es una vista en sección de una segunda disposición ejemplar del reactor;
- la figura 10 es una vista lateral del reactor de la figura 9;
- la figura 11 es una vista detallada de una distribución ejemplar de cavidad de control del reactor de la figura 9;
- la figura 12A es una vista en planta de una realización del reactor;
- 20 la figura 12B es una vista en sección de la realización del reactor;
- la figura 12C es una vista en perspectiva de la realización del reactor;
- la figura 12D es una ilustración esquemática de la realización del reactor;
- la figura 12E es otra ilustración esquemática de la realización del reactor;
- la figura 12F es otra ilustración esquemática de la realización del reactor;
- 25 la figura 12G es otra vista en perspectiva de la realización del reactor;
- la figura 12H es una vista en planta de una tercera disposición ejemplar del reactor;
- la figura 12I es una vista esquemática en sección de la tercera disposición ejemplar del reactor;
- la figura 12J incluye tanto una vista esquemática en planta como una vista esquemática en sección de la tercera disposición ejemplar del reactor;
- 30 la figura 12K es una vista esquemática en sección de la tercera disposición ejemplar del reactor;
- la figura 12L incluye tanto una vista en planta esquemática como vistas esquemáticas en sección del tercer reactor ejemplar;
- la figura 12M incluye tanto una vista en planta esquemática como vistas esquemáticas en sección del tercer reactor ejemplar;
- 35 la figura 12N incluye una vista esquemática en sección del tercer reactor ejemplar;
- la figura 13 es una ilustración esquemática de un subsistema ejemplar de refrigerante de reactor;
- la figura 14 es una vista en sección de un pasadizo ejemplar del subsistema de refrigerante de reactor;
- la figura 15 es una vista en sección tomada a través de la sección C-C del subsistema de control de reactor mostrado

en la figura 20;

la figura 16 es una ilustración esquemática de un primer subsistema ejemplar de refrigerante auxiliar;

la figura 17 es una ilustración esquemática de un segundo subsistema ejemplar de refrigerante auxiliar;

la figura 18 es una vista en planta del segundo subsistema de refrigerante auxiliar de la figura 17;

5 la figura 19 es una ilustración esquemática de un tercer subsistema ejemplar de refrigerante auxiliar; y

la figura 20 es una ilustración esquemática de un subsistema ejemplar de control de reactor.

Descripción detallada

La figura 1 ilustra un sistema ejemplar de reactor nuclear 5 para generar potencia a partir de una reacción nuclear. El sistema de reactor nuclear 5 incluye un subsistema de generación de potencia 10 y un reactor 15. El reactor 15 proporciona energía a partir de una reacción nuclear al subsistema de generación de potencia 10. El sistema de reactor nuclear 5 también incluye un intercambiador de calor 20, un subsistema de refrigerante de reactor 25 y un subsistema de la bomba 30. El subsistema de refrigerante de reactor 25 facilita intercambio de calor entre el reactor 15 y el intercambiador de calor 20 y el subsistema de la bomba 30 presuriza el subsistema de refrigerante de reactor 25. El sistema de reactor nuclear 5 puede incluir además un subsistema de refrigerante auxiliar 35 y un subsistema de control de reactor 40. El subsistema de refrigerante auxiliar 35 puede permitir transferencia de calor adicional desde el reactor 15 y el subsistema de control de reactor 40 puede controlar un funcionamiento del reactor 15.

El subsistema de generación de potencia 10 incluye una o más turbinas 45, uno o más conjuntos de impulsión 50, uno o más generadores 55, un subsistema de enfriamiento de turbina 60 y un subsistema de vapor de agua de turbina 65. La turbina 45 impulsa el generador 55 por medio del conjunto de impulsión 50. El subsistema de vapor de agua de turbina 65 transfiere agua (H₂O) y vapor de agua (H₂O) entre la turbina 45 y el subsistema de enfriamiento de turbina 60.

La turbina 45 puede ser cualquier tipo de turbina que sea adecuada para uso con un reactor nuclear, tal como, por ejemplo, una turbina de vapor de agua. La turbina 45 convierte vapor de agua a alta presión (H₂O) que es entregado por el subsistema de vapor de agua de turbina 65 en energía mecánica. Por ejemplo, la turbina 45 incluye una pluralidad de elementos montados sobre un árbol rotatorio. El vapor de agua a alta presión (H₂O) entra a la turbina 45 y pasa sobre los elementos montados sobre el árbol, la energía cinética del vapor de agua (H₂O) fuerza de ese modo a la pluralidad de elementos a hacer rotar el árbol rotatorio. La turbina 45 puede incluir una serie de uno o más cilindros de alta presión seguidos por uno o más cilindros de baja presión. Cada cilindro puede admitir vapor de agua (H₂O) en una parte central, y el vapor de agua (H₂O) puede expandirse progresivamente a través de la serie de cilindros, moviendo de ese modo los elementos montados sobre el árbol de la turbina 45. La turbina 45 puede incluir elementos estacionarios que dirigen un flujo de vapor de agua (H₂O) dentro de la turbina 45. La turbina 45 puede incluir sistemas adicionales tales como, por ejemplo, un sistema de válvulas de control hidráulico que tiene válvulas accionadas por aceite para regular el flujo de vapor de agua (H₂O), un sistema de lubricación para lubricar apoyos que soportan el cilindro y un separador de humedad para retirar humedad del vapor de agua (H₂O) tras dejar los cilindros de alta presión y antes de entrar a los cilindros de baja presión.

El conjunto de impulsión 50 puede ser cualquier conjunto adecuado que transfiera energía mecánica desde la turbina 45 al generador 55, tal como, por ejemplo, un conjunto de árbol de impulsión mecánico. El conjunto de impulsión 50 puede conectar funcionalmente un árbol rotatorio de la turbina 45 al generador 55 de modo que la energía cinética del vapor de agua (H₂O) que golpea los elementos montados sobre el árbol de la turbina 45 puede ser transferida como energía mecánica al generador 55 por medio del conjunto de impulsión 50.

El generador 55 puede ser cualquier tipo de generador que sea adecuado para uso con un reactor nuclear, tal como, por ejemplo, un generador eléctrico. Por ejemplo, el generador 55 puede incluir una disposición de imán e hilo metálico para generar electricidad a partir de la energía mecánica transferida por el conjunto de impulsión 50. Por ejemplo, el conjunto de impulsión 50 puede hacer rotar un elemento magnético dentro del generador 55 para generar potencia eléctrica. El generador 55 puede producir electricidad de CA en cualquier frecuencia adecuada, tal como, por ejemplo, potencia a 50 Hz (50 ciclos) o 60 Hz (60 ciclos). El subsistema de generación de potencia 10 puede ser accionado para mantener uno o más generadores 55 en una frecuencia sustancialmente constante, tal como, por ejemplo, potencia a 50 o 60 ciclos.

El subsistema de enfriamiento de turbina 60 puede ser cualquier tipo de sistema de enfriamiento que sea adecuado para uso con un reactor nuclear, tal como, por ejemplo, un sistema de enfriamiento que usa condensadores, torres de enfriamiento y/o flujo de aire forzado para intercambio de calor. El subsistema de enfriamiento de turbina 60 puede retirar vapor de agua (H₂O) sobrante de la turbina 45 y condensar el vapor de agua (H₂O) sobrante en agua (H₂O). Además de usar condensadores, torres de enfriamiento y/o flujo de aire forzado para condensar vapor de agua (H₂O) en agua (H₂O), el subsistema de enfriamiento de turbina 60 también puede utilizar cuerpos cercanos de agua (H₂O), si están disponibles y son adecuados, para, p. ej., enfriamiento por un paso a través.

- 5 El subsistema de vapor de agua de turbina 65 puede ser cualquier tipo de disposición adecuada para transferir agua (H₂O) y vapor de agua (H₂O) entre el intercambiador de calor 20, la turbina 45 y el subsistema de enfriamiento de turbina 60. El subsistema de vapor de agua de turbina 65 puede incluir un pasadizo 70 que transfiere vapor de agua caliente (H₂O) desde el intercambiador de calor 20 a la turbina 45, un pasadizo 75 que transfiere vapor de agua (H₂O) sobrante o de escape desde la turbina 45 al subsistema de enfriamiento de turbina 60 y un pasadizo 80 que transfiere agua (H₂O) relativamente fría desde el subsistema de enfriamiento de turbina 60 al intercambiador de calor 20. Los pasadizos 70, 75, y 80 pueden ser cualesquiera pasadizos adecuados que transfieran vapor de agua (H₂O) y agua (H₂O) tales como, por ejemplo, tubería de acero.
- 10 El sistema de reactor nuclear 5 también puede proporcionar vapor de agua (H₂O) para cualquier otra finalidad adecuada para la que puede ser útil el vapor de agua (H₂O), además de proporcionar vapor de agua (H₂O) a turbinas para generación de energía. Por ejemplo, el sistema de reactor nuclear 5 puede incluir configuraciones en las que no se devuelve vapor de agua (H₂O) al sistema tras el uso y/o en las que el aporte de agua (H₂O) proviene de una fuente que es diferente del subsistema de vapor de agua de turbina 65. Por ejemplo, el sistema de reactor nuclear 5 puede proporcionar vapor de agua (H₂O) para uso en extracción de aceite geotérmica.
- 15 El intercambiador de calor 20 puede ser cualquier tipo de intercambiador de calor adecuado para transferir energía térmica entre el subsistema de generación de potencia 10 y el reactor 15. Por ejemplo, el intercambiador de calor 20 puede incluir uno o más generadores de vapor de agua que tienen una pluralidad de tubos a través de los que fluye refrigerante de reactor caliente del subsistema de refrigerante de reactor 25. Cada generador de vapor de agua puede incluir, por ejemplo, miles de tubos para recibir refrigerante de reactor caliente. Por ejemplo, cada generador de vapor de agua puede incluir entre aproximadamente 3.000 y aproximadamente 16.000 tubos. El refrigerante de reactor caliente que fluye a través de los tubos de generador de vapor de agua puede hervir agua (H₂O) entregada al intercambiador de calor 20 por el subsistema de vapor de agua de turbina 65. El vapor de agua (H₂O) generado por los generadores de vapor de agua del intercambiador de calor 20 puede entonces ser transferido a la turbina 45 por medio del subsistema de vapor de agua de turbina 65. Mientras pasa a través del intercambiador de calor 20, el refrigerante de reactor puede ser enfriado y posteriormente puede ser devuelto al reactor 15 por medio del subsistema de refrigerante de reactor 25.
- 20 Agua (H₂O) entregada al intercambiador de calor 20 por el subsistema de vapor de agua de turbina 65 puede entrar al intercambiador de calor 20 en una parte superior del intercambiador de calor 20. El agua relativamente fría (H₂O) puede ser inyectada a una parte interior del intercambiador de calor 20 por medio de una pluralidad de toberas 83 (véase la figura 20) que se pueden disponer en una parte central y/o superior del intercambiador de calor 20, sobre paredes interiores del intercambiador de calor 20. La pluralidad de toberas 83 puede ser orientada hacia abajo y puede inyectar el agua (H₂O) a agua en ebullición (H₂O) ya contenida dentro del intercambiador de calor 20. Por lo tanto, el agua relativamente fría (H₂O) puede ser mezclada con el agua en ebullición (H₂O) ya contenida en el intercambiador de calor 20, ayudando de ese modo a reducir una magnitud de un gradiente de temperatura del H₂O contenida dentro del intercambiador de calor 20. El intercambiador de calor 20 puede de ese modo producir vapor de agua (H₂O) a temperaturas más altas, debido al gradiente de temperatura más bajo. Se contempla que la magnitud del gradiente de temperatura también pueda ser reducida aún más usando una bomba de recirculación o usando una combinación de corrientes de convección, con arrastre de agua en ebullición (H₂O) a las corrientes descendentes de agua relativamente fría (H₂O) desde las toberas 83.
- 30 El reactor 15 puede ser cualquier tipo de reactor nuclear adecuado para generar potencia a partir de una reacción nuclear. El reactor 15 puede ser cualquier reactor nuclear que use moderador líquido. También, por ejemplo, el reactor 15 puede ser un reactor moderado por agua pesada y/o enfriado por agua pesada. El reactor 15 puede ser, por ejemplo, un reactor CANDU. Como se ilustra en la figura 2, el reactor 15 incluye una estructura de contención 85, un recipiente a presión 90, una zona de reflector 95 y un núcleo de reactor 100. La estructura de contención 85 y el recipiente a presión 90 alojan la zona de reflector 95. El núcleo de reactor 100 se dispone en la zona de reflector 95.
- 35 La estructura de contención 85 puede ser cualquier tipo de estructura adecuada para alojar la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100, y para blindar el ambiente exterior del reactor 15 de radiación y neutrones emitidos por el reactor 15. Por ejemplo, la estructura de contención 85 puede incluir hormigón reforzado u paredes de hormigón pretensado que rodean la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100. La estructura de contención 85 puede tener paredes que tienen cualquier grosor adecuado para alojar la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100 tales como, por ejemplo, entre aproximadamente 122 cm (cuatro pies) y aproximadamente 305 cm (diez pies). La estructura de contención 85 puede incluir aberturas para recibir diversos elementos del subsistema de refrigerante de reactor 25, el subsistema de refrigerante auxiliar 35, u otros elementos del sistema de reactor nuclear 5. La estructura de contención 85 puede soportar estructuralmente, aislar y servir como barrera contra radiación para la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100. Una piscina reflectante puede, por ejemplo, simplemente rellenar la parte inferior del recipiente a presión 90, o puede ser encerrada en recipientes separados como se describe adicionalmente más adelante.
- 40 El recipiente a presión 90 puede ser cualquier tipo de recipiente a presión o estructura adecuados para presurizar la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100. Por ejemplo, el recipiente a presión 90 puede ser un recipiente de acero que sella y presuriza la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100. El recipiente a presión 90 puede incluir uno o más elementos de acero que se configuran y/o conectan para formar un recipiente sellado. El recipiente a
- 45
- 50
- 55
- 60

presión 90 puede incluir cualquier otro material adecuado con propiedades apropiadas para uso como recipiente a presión, tales como, por ejemplo, materiales que tienen resistencia a la fractura y a fragilidad. El recipiente a presión 90 puede ser usado cuando la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100 incluyen un "moderador caliente" que es mantenido a una temperatura relativamente alta. El recipiente a presión 90 puede incluir aberturas para recibir diversos elementos del subsistema de refrigerante de reactor 25, el subsistema de refrigerante auxiliar 35, u otros elementos del sistema de reactor nuclear 5. Las aberturas del recipiente a presión 90 pueden ser selladas para mantener una presurización de la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100 dentro del recipiente a presión 90.

Como se ilustra en la figura 3, la zona de reflector 95 puede incluir una piscina reflectante 105 y un área de vapor de agua 110. Una frontera 115 puede separar la piscina reflectante 105 y el área de vapor de agua 110.

La piscina reflectante 105 incluye un moderador en estado líquido. Por ejemplo, la piscina reflectante 105 puede incluir D₂O ("agua pesada") en estado líquido. La piscina reflectante 105 puede incluir D₂O fabricada para tener propiedades adecuadas para moderar una reacción nuclear. Por ejemplo, la D₂O de la piscina reflectante 105 puede ser agua pesada de grado de reactor (99,75 % pura). La piscina reflectante 105 también puede incluir moderador H₂O ("agua ligera") en estado líquido. La piscina reflectante 105 puede incluir un "moderador caliente" (p. ej., figura 2) o un "moderador frío" (p. ej., figura 11).

El área de vapor de agua 110 incluye un moderador que es del mismo material que la piscina reflectante 105. El área de vapor de agua 110 incluye moderador que está en estado gaseoso. El calor desde el núcleo de reactor 100 calienta el moderador en la zona de reflector 95, provocando que algo del moderador sea mantenido en estado gaseoso en el área de vapor de agua 110. La temperatura del moderador gaseoso del área de vapor de agua 110 es aproximadamente la misma que la temperatura del moderador líquido de la piscina reflectante 105. El área de vapor de agua 110 puede rellenar sustancialmente la zona de reflector 95 entera si sustancialmente todo el moderador se calienta a un estado gaseoso. También, la piscina reflectante 105 puede rellenar sustancialmente la zona de reflector 95 entera si sustancialmente todo el moderador es enfriado a un estado líquido. Una frontera 115 separa la piscina reflectante 105 y el área de vapor de agua 110.

A continuación se describen disposiciones y realizaciones ejemplares de un núcleo de reactor: núcleo de reactor 100, núcleo de reactor 100', núcleo de reactor 100a y núcleo de reactor 100b. Cuando sea adecuado, los diversos rasgos descritos de cada realización ejemplar (por ejemplo, los numerales de referencia que tienen un modificador "a" para núcleo de reactor 100a) pueden ser combinados con rasgos de las otras realizaciones. Como se describe adicionalmente más adelante, las realizaciones ejemplares descritas ilustran la amplia variedad de posibles realizaciones del sistema de reactor nuclear descrito. Por ejemplo, el núcleo de reactor 100, 100', 100a y 100b muestra que el sistema de reactor nuclear descrito puede incluir disposiciones verticales y horizontales de tubos de combustible, el moderador tanto caliente como frío en el núcleo de reactor, diferentes combustibles nucleares tales como uranio, plutonio y torio en diferentes composiciones tales como metal, óxido, o sales, diferentes disposiciones de tubos de combustible tales como disposiciones hexagonales y cuadradas, diferentes tipos de moderador (p. ej., D₂O y H₂O), diferentes refrigerantes primarios (p. ej. líquidos tales como D₂O, H₂O, y fluidos orgánicos; metales fundidos tales como sodio y plomo; sales fundidas, y gases tales como helio) y diferentes técnicas de enfriamiento de moderador (p. ej., intercambio de calor e intercambio de fluido directo). Al considerar las realizaciones ejemplares descritas más adelante, un experto en la técnica entenderá que los diversos rasgos descritos de cada realización ejemplar pueden ser combinados con rasgos de cualquier otra realización ejemplar, cuando sea apropiado.

Como primer núcleo de reactor ejemplar, el núcleo de reactor 100 incluye un conjunto de combustible 125 y una distribución de cavidades de control 130. La distribución de cavidades de control 130 contiene uno o más bolsillos de moderador y/o vapor de moderador adyacentes al conjunto de combustible 125. Los tubos de combustible 135 pueden ser orientados verticalmente en una distribución cuadrada con esquinas truncadas (como se ilustra en la figura 4), y el moderador y el refrigerante de combustible pueden ser agua pesada (p. ej., D₂O). El moderador puede ser enfriado por conducción desde una parte del flujo de refrigerante primario (refrigerante de combustible).

El conjunto de combustible 125 puede ser cualquier tipo de combustible nuclear adecuado para uso en una reacción nuclear. Por ejemplo, el conjunto de combustible 125 puede incluir manojos de varillas de combustible que se disponen en una pluralidad de tubos de combustible 135. Por ejemplo, el conjunto de combustible 125 puede incluir una disposición de cientos de los tubos de combustible 135. Por ejemplo, el conjunto de combustible 125 puede incluir entre aproximadamente 100 y aproximadamente 500 tubos de combustible 135 que pueden ser de aproximadamente 10,2 cm (cuatro pulgadas) de diámetro. Cada tubo de combustible 135 puede incluir cualquier número adecuado de manojos de combustible tales como, por ejemplo, 12 manojos de combustible. Cada manojos de combustible puede incluir cualquier número adecuado de varillas de combustible tales como, por ejemplo, 37 varillas de combustible. El conjunto de combustible 125 puede incluir cualquier combustible adecuado para una reacción nuclear tal como, por ejemplo, uranio natural, uranio enriquecido, combustible de mezcla de óxidos (MOX), plutonio, torio y/o diversas mezclas de estos y otros materiales. Por ejemplo, el conjunto de combustible 125 puede incluir un combustible mixto de uranio/plutonio o un combustible mixto de uranio/torio.

El conjunto de combustible 125 puede incluir tubos de combustible 135 que se disponen verticalmente (p. ej., como se ilustra en la figura 2). El conjunto de combustible 125 puede incluir tubos de combustible 135 dispuestos en cualquier configuración adecuada tal como, por ejemplo, una distribución en ángulo recto como se ilustra en las figuras 4 y 5.

- Haciendo referencia de nuevo a la figura 2, la distribución de cavidades de control 130 puede incluir una distribución tridimensional de las cavidades de control 140. Por ejemplo, la distribución tridimensional de las cavidades de control 140 puede servir como alojamiento para confinar moderador adyacente a los tubos de combustible 135 del conjunto de combustible 125. Como se representa en las figuras 2, 3 y 7, la pluralidad de cavidades de control 140 se pueden disponer horizontalmente entre sí, así como ser apiladas verticalmente. Las cavidades de control 140 pueden ser escalonadas verticalmente y/o horizontalmente dentro de la distribución de cavidades de control 130. Por ejemplo, el escalonado vertical de las cavidades de control 140 se representa en la figura 3. Las cavidades de control 140 se pueden disponer en cualquier configuración adecuada que confine un moderador adyacente a los tubos de combustible 135.
- Las figuras 2A y 3A ilustran diferentes vistas de las disposiciones del reactor 15. Las figuras 2A y la figura 3A proporcionan vistas de disposiciones escaladas ejemplares del reactor 15.
- Como se representa en las figuras 2 y 8, cada cavidad de control 140 puede incluir un conjunto estructural 145 y un conjunto de cono 150. El conjunto de cono 150 puede confinar moderador dentro del conjunto estructural 145. El conjunto estructural 145 sirve como alojamiento para confinar moderador.
- Como se representa en las figuras 2, 3 y 7, el conjunto estructural 145 puede incluir uno o más miembros superiores 155, uno o más miembros laterales 160, uno o más miembros extremos 165 y uno o más miembros intermedios 170. El miembro superior 155, los miembros laterales 160, el miembro extremo 165 y el miembro intermedio 170 se pueden formar a partir de materiales estructurales adecuados para confinar moderador, tales como, por ejemplo, aleación de circonio. El miembro superior 155, los miembros laterales 160, el miembro extremo 165 y el miembro intermedio 170 pueden ser conectados entre sí por cualquier técnica adecuada tal como, por ejemplo, soldadura. El miembro superior 155, los miembros laterales 160, el miembro extremo 165 y el miembro intermedio 170 también pueden ser formados integralmente entre sí. El miembro superior 155, los miembros laterales 160, el miembro extremo 165 y el miembro intermedio 170 pueden ser cualquier miembro estructural adecuado que confine moderador, tales como, por ejemplo, los miembros sustancialmente planos y/o semejantes a placas. El miembro superior 155 puede ser, por ejemplo, un miembro plano dispuesto sustancialmente horizontal en una parte superior de la cavidad de control 140, y puede ser conectado a miembros laterales sustancialmente planos 160. Los miembros extremos 165 puede ser conectados a partes extremas del miembro superior 155 y de los miembros laterales 160. El miembro superior 155, los miembros laterales 160 y los miembros extremos 165 se conectan para formar una cavidad que tiene una parte superior cerrada y una parte inferior abierta. Así, el miembro superior 155, los miembros laterales 160 y los miembros extremos 165 impiden sustancialmente movimiento de moderador adentro y afuera de una parte superior de la cavidad de control 140, mientras permiten que se mueva moderador adentro y afuera de una parte más baja de la cavidad de control 140. La parte superior de la cavidad de control 140 incluye el miembro superior 155, partes superiores de los miembros laterales 160, y partes superiores de los miembros extremos 165. La parte más baja de la cavidad de control 140 incluye partes más bajas de los miembros laterales 160 y partes más bajas de los miembros extremos 165.
- Uno o más miembros intermedios 170 se pueden disponer entremedio y conectarse a los miembros laterales 160 y al miembro superior 155. Los miembros intermedios 170 se pueden disponer en cualquier intervalo a lo largo de la cavidad de control 140. Los miembros intermedios 170 pueden impedir sustancialmente movimiento de moderador a través de la cavidad de control 140 en una parte superior de la cavidad de control 140. Los miembros extremos 165 y los miembros intermedios 170 pueden tener una altura que sea menor que una altura de los miembros laterales 160. Los miembros laterales 160 de una cavidad de control 140 dada pueden ser conectados al miembro superior 155 de otra cavidad de control 140 dispuesto por debajo, por ejemplo, en el caso de que las cavidades de control 140 estén apiladas verticalmente. Como la altura de los miembros extremos 165 y los miembros intermedios 170 puede ser menor que la altura de los miembros laterales 160, el moderador puede ser libre para moverse bajo los miembros extremos 165 y los miembros intermedios 170 por medio de holguras 175 y holguras 180, respectivamente, como se representa en la figura 7. Así, los miembros extremos 165 y los miembros intermedios 170 pueden servir como deflector para bloquear el movimiento de moderador en una parte superior de la cavidad de control 140 y permitir el movimiento de moderador en una parte más baja de la cavidad de control 140. Las holguras 180 pueden permitir movimiento de moderador a través de una parte más baja de la cavidad de control 140, y las holguras 175 pueden permitir movimiento de moderador entre la zona de reflector 95 y la cavidad de control 140. El moderador puede no moverse bajo los miembros laterales 160, que se pueden conectar al miembro superior 155 de la cavidad de control 140 dispuesto por debajo. Sin embargo, también se contempla que las holguras se puedan proporcionar entre los miembros laterales 160 y el miembro superior 155 de la cavidad de control 140 dispuesta por debajo, para permitir también movimiento de moderador bajo algunos o todos los miembros laterales 160. Así, también se contempla que moderador sea libre para moverse entre la zona de reflector 95 y las cavidades de control 140, bajos los miembros laterales 160.
- Como se representa en las figuras 3 y 7, las cavidades de control 140 incluyen el mismo moderador que la zona de reflector 95, porque el moderador es libre para moverse entre la zona de reflector 95 y las cavidades de control 140 por medio de las holguras 175 y 180. Conforme el moderador confinado en la cavidad de control 140 es calentado por neutrones, radiación gamma y/o conducción térmica desde los tubos de combustible 135, algo o todo el moderador en la cavidad de control 140 puede ser calentado a un estado gaseoso en una zona gaseosa 185. Algo o todo el moderador en la cavidad de control 140 también puede estar en estado líquido en una zona líquida 190. La zona

gaseosa 185 y la zona líquida 190 están separadas por una frontera 195. El tamaño de la zona gaseosa 185 y la zona líquida 190 puede variar entre las cavidades de control 140, y entre diferentes miembros intermedios 170 dentro de una única cavidad de control 140. Así, la ubicación de la frontera 195 puede variar entre las cavidades de control 140 y entre diferentes miembros intermedios 170 dentro de una única cavidad de control 140. Por ejemplo, una cavidad de control 140 dada puede tener tanto una zona gaseosa 185 como una zona líquida 190, sustancialmente solo una zona gaseosa 185, o sustancialmente solo una zona líquida 190.

Calor impartido por medio de neutrones, radiación gamma y/o conducción desde los tubos de combustible 135 puede provocar que el moderador líquido de la zona líquida 190 sea mantenido a una temperatura del punto de ebullición o justo por debajo del moderador. Por ejemplo, el moderador de la zona líquida 190 puede ser mantenido en un estado justo en el punto de ebullición. Conforme el moderador en la zona líquida 190 llega al punto de ebullición, algo del moderador se evapora y sube a la zona gaseosa 185. También, el moderador en la zona gaseosa 185 que está cerca de componentes del subsistema de refrigerante de reactor 25 (p. ej., como se describe más adelante) puede condensarse y gotear nuevamente a la zona líquida 190 a lo largo de superficies interiores de la cavidad de control 140. El tamaño de la zona gaseosa 185 por lo tanto permanece sustancialmente constante, y la frontera 195 permanece relativamente estacionaria, cuando la cantidad del calor impartido por los tubos de combustible 135 y la cantidad de calor retirado por el subsistema de refrigerante de reactor 25 son sustancialmente iguales. Como se describe adicionalmente más adelante, el tamaño de la zona gaseosa 185 y una posición de la frontera 195 pueden variar ligeramente en periodos de tiempo cortos (p. ej., en un periodo de días) basándose en la absorción de xenón y samario de neutrones, y puede variar significativamente en periodos de tiempo largos (p. ej., en un periodo de años), basándose en, por ejemplo, la edad (p. ej., agotamiento) del combustible. El tamaño de la zona gaseosa 185 y la posición de la frontera 195 pueden variar ligeramente durante y brevemente tras periodos de cambio en la tasa de enfriamiento por el subsistema de refrigerante de reactor 25.

Como se representa en mayor detalle en la figura 8, el conjunto de cono 150 puede incluir un conjunto de cono interior 200, un conjunto de cono exterior 205 y un pasadizo 210. Los conjuntos de cono 150 pueden proporcionar una interfaz estructural entre los tubos de combustible 135, que puede pasar a través de las cavidades de control 140, y puede ayudar a distribuir más uniformemente el calor desde los tubos de combustible 135 dentro de las cavidades de control 140. El conjunto de cono interior 200 puede rodear una parte del tubo de combustible 135, el conjunto de cono exterior 205 puede rodear el conjunto de cono interior 200, y el pasadizo 210 se puede disponer entre el conjunto de cono interior 200 y el conjunto de cono exterior 205.

El conjunto de cono interior 200 puede incluir un cono 215 que puede rodear una parte del tubo de combustible 135. El cono 215 se puede formar de material adecuado para confinar moderador líquido o moderador de vapor de agua dentro de la cavidad de control 140, tal como, por ejemplo, aleación de circonio. El cono 215 se puede formar de elementos separados o se puede formar integralmente como único elemento. El cono 215 también puede tener cualquier altura adecuada para confinar moderador. Por ejemplo, el cono 215 puede tener una altura que sea aproximadamente el doble de la altura de la cavidad de control 140. El cono 215 puede pasar a través de una abertura que se forma en el miembro superior 155 del conjunto estructural 145. El cono 215 se puede disponer en cada cavidad de control 140. Como el cono 215 puede tener una altura que sea mayor que una altura de la cavidad de control 140, el cono 215 puede superponerse con otros conos 215 rodeando el mismo tubo de combustible 135. El cono 215 puede formar un pasadizo 220 con el tubo de combustible 135, y conos 215 superpuestos pueden formar un pasadizo 225 entre sí. El pasadizo 220 puede ser una continuación del pasadizo 225. Los pasadizos 220 y 225 pueden rodear los tubos de combustible 135, y pueden ser de cualquier forma adecuada tal como, por ejemplo, los pasadizos en forma cónica. El cono 215 puede ser sellado en el tubo de combustible 135 en la parte superior del cono 215 de modo que el pasadizo 220 puede ser un extremo cerrado, estando el pasadizo 220 sellado en la parte superior. Como el tubo de combustible 135 puede usualmente estar más caliente que el punto de ebullición del moderador, cualquier moderador en el pasadizo 220 puede hervir y el moderador de vapor de agua resultante forzará al moderador líquido a bajar afuera del fondo de los pasadizos 220 y 225 por medio de una holgura 250 y adentro de la parte más baja de la cavidad de control 140. Como el vapor de agua puede conducir calor menos eficazmente que el moderador líquido, la doble holgura resultante de vapor de agua formada por los pasadizos 220 y 225 y los conos 215 superpuestos pueden reducir la transferencia de calor desde los tubos de combustible 135 al moderador en la cavidad de control 140. Así, los conos 215 pueden rodear eficazmente los tubos de combustible 135 con una capa delgada de moderador de vapor de agua en los pasadizos 220 y 225, el moderador de vapor de agua está en comunicación de fluidos con la zona de reflector 95.

El conjunto de cono exterior 205 puede incluir un cono interior 235 y un cono exterior 240. El cono interior 235 y el cono exterior 240 pueden ser de un material similar al cono 215, y pueden rodear el tubo de combustible 135 y el cono 215. El cono interior 235 puede ser conectado a una superficie inferior 245 del miembro superior 155 y puede ser conectado intermitentemente en la parte más baja del cono interior 235 a la parte más baja del cono 215 para integridad estructural, mientras todavía se deja una holgura 230 que puede permitir flujo vertical de moderador líquido desde la parte más baja de una cavidad 140 por medio del pasadizo 210 a las cavidades 140 de encima y debajo. El cono interior 235 puede tener una altura que sea ligeramente menor que una altura de la cavidad de control 140, y puede formar una holgura 250 con una superficie superior 255 de una cavidad de control 140 adyacente que está dispuesta por debajo. El cono exterior 240 también puede ser conectado a la superficie inferior 245 del miembro superior 155, y puede tener una altura que sea menor que una altura del cono interior 235. Entre el cono interior 235 y el cono exterior

240 se forma una cavidad 260. El moderador es libre para moverse entre la zona líquida 190 de la cavidad de control 140 y la cavidad 260. El moderador también es libre para moverse entre la zona líquida 190 y una parte 270 dispuesta entre los conos exteriores 240 adyacentes de los tubos de combustible 135 adyacentes. Una zona líquida 275 que incluye moderador líquido se dispone en la cavidad 260. Conforme neutrones rápidos y radiación gamma desde los tubos de combustible 135 calientan el moderador en la cavidad de control 140, el moderador líquido en la zona líquida 275 puede ser calentado hasta moderador de vapor de agua y puede formar una zona gaseosa 280. También, conforme neutrones a velocidad más alta (p. ej., rápidos) y radiación gamma desde los tubos de combustible 135 calientan el moderador en la cavidad de control 140, el moderador líquido en la zona líquida 190 puede ser calentado hasta moderador de vapor de agua y puede formar una parte de la zona gaseosa 185 dentro de la parte 270 dispuesta entre los conos exteriores 240 adyacentes. Dependiendo de la cantidad de calor impartido por neutrones a velocidad más alta (p. ej., rápido) y radiación gamma desde los tubos de combustible 135, la cavidad 260 y la parte 270 pueden ser rellenadas sustancialmente por completo por la zona gaseosa 280 y 185, respectivamente, o pueden ser rellenadas sustancialmente por completo por las zonas líquidas 275 y 190, respectivamente.

Una frontera 290 separa la zona líquida 275 y la zona gaseosa 280, y la frontera 195 separa la zona líquida 190 y la zona gaseosa 185. La zona líquida 275, la zona gaseosa 280 y la frontera 290 pueden tener características similares a las características de la zona líquida 190, la zona gaseosa 185 y la frontera 195, respectivamente, tratadas anteriormente. Por ejemplo, el tamaño de las zonas gaseosas 280 y 185 permanece sustancialmente constante, y las fronteras 290 y 195 permanecen relativamente estacionarias, cuando la cantidad de calor impartido por neutrones a velocidad más alta (p. ej., rápido) y radiación gamma desde los tubos de combustible 135 y la cantidad de calor retirado por el subsistema de refrigerante de reactor 25 son sustancialmente iguales.

El pasadizo 210 se puede formar entre el cono 215 y el cono interior 235. Entre una parte inferior del cono 215 y una parte inferior del cono interior 235 se puede formar una holgura 300. El moderador puede ser libre para moverse entre el pasadizo 210 y una parte más baja de la cavidad de control 140 por medio de la holgura 300, que puede ser similar a la holgura 230. Así, como la cavidad de control 140 está en comunicación de fluidos con la zona de reflector 95, el moderador es libre para moverse entre el pasadizo 210 y la zona de reflector 95 por medio de la cavidad de control 140. Como el pasadizo 210 puede no estar cerrado en la parte superior, el pasadizo 210 puede ser rellenado sustancialmente con moderador líquido y burbujas de vapor de moderador pueden subir rápidamente a través de él.

Las figuras 8A, 8B, 8C y 8D ilustran vistas alternativas del conjunto de cono 150.

Las figuras 9, 10 y 11 ilustran un segundo reactor ejemplar 15. En esta disposición, el reactor 15 incluye un núcleo de reactor 100' dispuesto en la zona de reflector 95. El núcleo de reactor 100' incluye un conjunto de combustible 125' y una distribución de cavidades de control 130'. La distribución de cavidades de control 130' confina moderador adyacente al conjunto de combustible 125'. En esta segunda disposición, los tubos de combustible 135' se pueden disponer horizontalmente y disponer en una distribución cuadrada con esquinas truncadas, como se ilustra en la figura 10. El moderador puede ser frío y puede ser enfriado bombeando moderador relativamente más frío a las cavidades de control 140'. El moderador puede ser agua pesada (D₂O), y la composición del refrigerante primario puede ser cualquier refrigerante adecuado.

El conjunto de combustible 125' incluye una pluralidad de tubos de combustible 135'. Los tubos de combustible 135' puede ser similares a los tubos de combustible 135 del núcleo de reactor 100. Los tubos de combustible 135' se pueden disponer, por ejemplo, sustancialmente horizontales.

La distribución de cavidades de control 130' incluye una pluralidad de cavidades de control 140'. Como se representa en la vista de extremo del núcleo de reactor 100' ilustrado en la figura 10, las cavidades de control 140' se pueden disponer entre tubos de combustible 135' del conjunto de combustible 125'. Cada cavidad de control 140' puede ser incluida en un conjunto estructural 145' que puede ser un tubo que tiene una longitud mayor que la longitud del conjunto de combustible 125', y puede contener cavidades de control 140' que pueden servir como alojamientos para confinar moderador.

Como se representa en las figuras 9 y 11, el conjunto estructural 145' puede incluir uno o más miembros superiores 155', uno o más miembros extremos 165' y uno o más miembros intermedios 170', que se pueden formar de materiales similares y conectarse mediante técnicas similares a los miembros del conjunto estructural 145' de la cavidad de control 140. El miembro superior 155' puede tener, por ejemplo, una forma curvada que encierra una parte superior de la cavidad de control 140'. Por ejemplo, el miembro superior 155' puede tener una forma semicircular que encierra una parte superior de la cavidad de control 140'. También, por ejemplo, el miembro superior 155' puede tener una forma sustancialmente totalmente circular con una parte más baja 160', de modo que el miembro superior 155' que continúa adentro de la parte más baja 160' puede encerrar totalmente la cavidad de control 140'. Los miembros extremos 165' pueden ser conectados a partes extremas del miembro superior 155' y partes más bajas 160' para encerrar totalmente cavidades de control 140'. El conjunto estructural 145' se puede extender más allá de la extensión de las varillas de combustible (que se pueden disponer en los tubos de combustible 135') para incluir compartimentos extremos 142'. Los miembros extremos 165' puede tener un pasadizo 166' que está en comunicación de fluidos con el tubo vertical 167', que puede permitir que fluya moderador líquido afuera en una ubicación cerca de la parte superior de los compartimentos extremos 142', y puede permitir que fluya libremente vapor de moderador en cualquier dirección entre los compartimentos extremos 142' y el tubo vertical 167'. El extremo más bajo del tubo vertical 167' puede llevar

adentro del depósito de moderador 168', que puede contener tanto moderador líquido como vapor de moderador. Cuando el miembro superior 155' tiene, por ejemplo, forma semicircular, el miembro superior 155' y los miembros intermedios 170' forman una cavidad que tiene una parte superior cerrada y una parte inferior abierta. Así, el miembro superior 155' y los miembros intermedios 170' impiden sustancialmente movimiento de moderador adentro y afuera de una parte superior de la cavidad de control 140', mientras permiten que moderador sea libre para moverse adentro y afuera de una parte más baja de la cavidad de control 140'. Cuando el miembro superior 155' es, por ejemplo, un círculo sustancialmente completo, los miembros intermedios 170' pueden cubrir únicamente una parte superior de una sección transversal circular abierta formada por el miembro superior 155' que incluye la parte más baja 160'. Así, los miembros intermedios 170' y el miembro superior 155' que tiene la parte más baja 160' impiden sustancialmente movimiento de moderador adentro y afuera de una parte superior de la cavidad de control 140', mientras permiten que se mueva moderador adentro y afuera de una parte más baja de la cavidad de control 140'.

Uno o más miembros intermedios 170' se pueden disponer entremedio y conectar a una superficie interior del miembro superior 155'. Los miembros intermedios 170' se pueden disponer en cualquier intervalo a lo largo de la cavidad de control 140'. Los miembros intermedios 170' pueden impedir sustancialmente movimiento de moderador a través de la cavidad de control 140' en una parte superior de la cavidad de control 140'. Los miembros intermedios 170' pueden tener una altura que sea menor que una altura de la cavidad de control 140'. Así, los miembros intermedios 170' pueden servir como deflector para bloquear el movimiento de moderador en una parte superior de la cavidad de control 140' y permitir el movimiento de moderador en una parte más baja de la cavidad de control 140'. El moderador es libre para moverse a través de una parte más baja de la cavidad de control 140' moviéndose bajo los miembros intermedios 170', y puede moverse entre la zona de reflector 95, los compartimentos extremos 142' y la cavidad de control 140' al moverse bajo los miembros intermedios 170'.

Como se representa en las figuras 9 y 11, las cavidades de control 140' incluyen el mismo moderador que el moderador en los compartimentos extremos 142', porque el moderador se mueve entre la zona de reflector 95 y las cavidades de control 140'. Conforme el moderador confinado en la cavidad de control 140' es calentado por neutrones, radiación gamma y conducción térmica desde los tubos de combustible 135', algo o todo el moderador en la cavidad de control 140' puede ser calentado a un estado gaseoso en una zona gaseosa 185'. Algo o todo el moderador en la cavidad de control 140' también puede estar en estado líquido en una zona líquida 190'. La zona gaseosa 185' y la zona líquida 190' están separadas por una frontera 195'. El tamaño de la zona gaseosa 185' y la zona líquida 190' puede variar entre las cavidades de control 140', y entre diferentes miembros intermedios 170' dentro de un único conjunto estructural 145'. Así, la ubicación de la frontera 195' puede variar entre las cavidades de control 140' y entre diferentes miembros intermedios 170' dentro de un único conjunto estructural 145'. Por ejemplo, una cavidad de control 140' dada puede tener tanto una zona gaseosa 185' como una zona líquida 190', sustancialmente solo una zona gaseosa 185', o sustancialmente solo una zona líquida 190'.

La zona líquida 190', la zona gaseosa 185' y la frontera 195' pueden tener características similares a las características de la zona líquida 190, la zona gaseosa 185 y la frontera 195, respectivamente, tratadas anteriormente con referencia a la cavidad de control 140. Por ejemplo, el tamaño de la zona gaseosa 185' permanece sustancialmente constante, y la frontera 195' permanece relativamente estacionaria, cuando la cantidad de calor impartido por neutrones rápidos, radiación gamma y conducción desde los tubos de combustible 135' y la cantidad de calor retirada por el subsistema de refrigerante de reactor 25 son sustancialmente iguales.

Las figuras 12A a 12F ilustran una tercera realización ejemplar alternativa del reactor 15. Esta realización incluye una distribución hexagonal de tubos de combustible verticales (por ejemplo, como se ilustra en las figuras 12A y 6) y un moderador caliente que es enfriado bombeando moderador caliente afuera de una piscina reflectante, enfriando el moderador caliente, y bombeando el moderador nuevamente adentro del núcleo de reactor y las cavidades de control por medio del subsistema de refrigerante de reactor 25. En esta realización (como se ilustra en la figura 12F), cada conjunto de cavidades de control puede encajar verticalmente en el espacio limitado por cuatro tubos de combustible verticales. Como se ilustra en la figura 12B, esta realización puede incluir un núcleo de reactor 100a.

El núcleo de reactor 100a incluye un conjunto de combustible 125a que es similar al conjunto de combustible 125 y una distribución de cavidades de control 130a. La distribución de cavidades de control 130a contiene un bolsillo de moderador y/o vapor de moderador adyacente al conjunto de combustible 125a. En esta realización, como se describe más completamente a continuación, un tubo de refrigerante de moderador 335a tiene pequeños orificios 337a dispuestos en los lados y que se extienden a lo largo de una longitud del tubo de refrigerante de moderador 335a, y las cavidades de control 140a son enfriadas por un rociado fino de moderador relativamente más frío rociado desde el tubo de refrigerante de moderador 335a.

La distribución de cavidades de control 130a puede incluir una distribución tridimensional de las cavidades de control 140a. Por ejemplo, la distribución tridimensional de las cavidades de control 140a sirve como alojamiento para compartimentar y/o confinar bolsillos de moderador adyacentes a los tubos de combustible 135a del conjunto de combustible 125a. Como se representa en las figuras 12A a 12F, la pluralidad de cavidades de control 140a se puede disponer en pilas verticales con las pilas dispuestas horizontalmente entre sí así como apilarse verticalmente. Como se representa en la figura 12E, las cavidades de control 140a pueden ser escalonadas verticalmente dentro de la distribución de cavidades de control 130a. Las cavidades de control 140a se pueden disponer en cualquier configuración adecuada para confinar bolsillos de moderador y/o vapor de moderador adyacente a los tubos de

combustible 135a.

Como se representa en las figuras 12C a 12F, cada cavidad de control 140a incluye tubo de refrigerante de moderador 335a, un miembro superior aproximadamente cónico 155a y un miembro lateral 160a. Como se ilustra, el miembro lateral 160a puede ser aproximadamente trapezoidal (por ejemplo, en la distribución ilustrada de tubos de combustible hexagonales) con esquinas indentadas 161a para tubos de combustible 135a o aproximadamente cuadradas (no ilustradas) para una distribución de tubos de combustible cuadrados. El miembro superior 155a se une sin holguras con el miembro lateral 160a y el tubo de refrigerante de moderador 335a para confinar un bolsillo de moderador y/o vapor de moderador adyacente a los tubos de combustible 135a. El moderador es libre para moverse adentro o afuera de la cavidad de control 140a por medio de la parte inferior abierta de la cavidad de control 140a y a través de una holgura 162a entre la parte inferior de un miembro lateral 160a dado y la parte superior del miembro lateral 160a de la cavidad de debajo.

El miembro superior 155a, el miembro lateral 160a y el tubo de refrigerante de moderador 335a se pueden formar de materiales estructurales adecuados para dirigir el movimiento de moderador y/o confinar moderador, tal como, por ejemplo, aleación de circonio. El miembro superior 155a, el miembro lateral 160a y el tubo de refrigerante de moderador 335a se pueden conectar entre sí mediante cualquier técnica adecuada, tal como, por ejemplo, soldadura. El miembro superior 155a, el miembro lateral 160a y el tubo de refrigerante de moderador 335a también se pueden formar integralmente entre sí. El miembro superior 155a, el miembro lateral 160a y el tubo de refrigerante de moderador 335a se conectan para formar, por ejemplo, una cavidad que tiene una parte superior cerrada y una parte inferior abierta. Así, el miembro superior 155a, el miembro lateral 160a y el tubo de refrigerante de moderador 335a impiden sustancialmente el movimiento de moderador adentro y afuera de una parte superior de la cavidad de control 140a, mientras permiten que el moderador sea libre para moverse adentro y afuera de una parte más baja de la cavidad de control 140a. La parte superior de la cavidad de control 140a incluye un miembro superior 155a, partes superiores del miembro lateral 160a y partes del tubo de refrigerante de moderador 335a. La parte más baja de la cavidad de control 140a incluye partes más bajas del miembro lateral 160a y partes del tubo de refrigerante de moderador 335a.

La holgura 162a puede permitir movimiento de moderador entre la zona de reflector 95 y la cavidad de control 140a, ya sea directamente o por medio de una holgura 182a formada entre las cavidades de control 140a adyacentes, dispuestas horizontalmente, o entre las cavidades de control 140a y los tubos de combustible 135a.

Como se representa en las figuras 12B y 12E, las cavidades de control 140a incluyen el mismo moderador que la zona de reflector 95, porque el moderador es libre para moverse entre la zona de reflector 95 y las cavidades de control 140a por medio de las holguras 162a y 182a. Conforme el moderador confinado en la cavidad de control 140a es calentado por neutrones y radiación gamma emitida desde los tubos de combustible 135a, y se conduce calor desde los tubos de combustible 135a, algo o todo el moderador en la cavidad de control 140a puede ser calentado hasta un estado gaseoso en una zona gaseosa 185a. Algo o todo el moderador en la cavidad de control 140a también puede estar en estado líquido en una zona líquida 190a. La zona gaseosa 185a y la zona líquida 190a están separadas por una frontera 195a. El tamaño de la zona gaseosa 185a y la zona líquida 190a puede variar entre diferentes cavidades de control 140a y dentro de cada cavidad de control 140a en diferentes momentos durante un funcionamiento del reactor 15.

Así, la ubicación de la frontera 195a puede variar entre las cavidades de control 140a. Por ejemplo, una cavidad de control 140a dada puede tener tanto una zona gaseosa 185a como una zona líquida 190a, sustancialmente solo una zona gaseosa 185a, o sustancialmente solo una zona líquida 190a.

Calor impartido por medio de neutrones, radiación gamma y/o conducción desde los tubos de combustible 135a puede provocar que el moderador líquido de la zona líquida 190a sea mantenido a una temperatura muy cerca del punto de ebullición del moderador. Por ejemplo, el moderador de la zona líquida 190a puede ser mantenido en un estado justo en el punto de ebullición. Conforme el moderador en la zona líquida 190a llega al punto de ebullición, algo del moderador se evapora y sube a la zona gaseosa 185a. El moderador en la zona líquida 190a puede ser enfriado mezclando con moderador relativamente más frío que pasa a la cavidad de control 140a a través de pequeños orificios 337a en el tubo de refrigerante de moderador 335a. También, el moderador en la zona gaseosa 185a puede condensarse alrededor de gotas de un rocío de moderador fino, relativamente más frío, que pasa a través de pequeños orificios 337a en el tubo de refrigerante de moderador 335a, o puede condensar y gotear nuevamente a la zona líquida 190a a lo largo de superficies interiores de la cavidad de control 140a y/o una superficie exterior del tubo de refrigerante de moderador 335a. El tamaño de la zona gaseosa 185a puede por lo tanto permanecer sustancialmente constante, y la frontera 195a puede permanecer relativamente estacionaria, cuando la cantidad de calor impartido por neutrones y radiación gamma desde los tubos de combustible 135a y la cantidad de calor retirado por el subsistema de refrigerante de reactor 25 son sustancialmente iguales. Como se describe adicionalmente más adelante, el tamaño de la zona gaseosa 185a y una posición de la frontera 195a pueden variar ligeramente en periodos de tiempo cortos (p. ej., en un periodo de días) basándose en la carga de xenón y samario del combustible, y pueden variar significativamente en periodos de tiempo largos (p. ej., en un periodo de años), basándose en, por ejemplo, la edad (o agotamiento) del combustible. El tamaño de la zona gaseosa 185a y la posición de la frontera 195a pueden variar ligeramente durante y brevemente tras periodos de cambio en la tasa de enfriamiento por el subsistema de refrigerante de reactor 25.

Como se ilustra en la figura 12E, las cavidades de control 140a pueden ser enfriadas por movimiento de moderador más frío a través del tubo de refrigerante de moderador 335a y adentro de las cavidades de control 140a a través de uno o más orificios 337a ubicados en los lados del tubo de refrigerante de moderador 335a. Los orificios 337a pueden ser de cualquier tamaño adecuado para movimiento de moderador, tal como, por ejemplo, orificios que son de tamaño pequeño. Un volumen sustancialmente igual de moderador más caliente puede moverse entonces afuera de la cavidad de control 140a a la zona de reflector 95 por medio de la holgura 162a en la parte más baja de la cavidad de control 140a.

Como se representa en las figuras 12C y 12D, la parte más baja de la zona de reflector 95 puede ser enfriada por movimiento de moderador más frío desde el tubo de refrigerante de moderador 335a a través de uno o más pequeños orificios 338a ubicados en un capuchón sobre un extremo más bajo del tubo de refrigerante de moderador 335a.

La figura 12G proporciona una vista en perspectiva de la disposición de las cavidades de control 140a del núcleo de reactor 100a. Se contempla que los diversos elementos de reactores 100, 100', 100a y/o 100b descritos puedan ser usados en combinación entre sí.

Las figuras 12H a 12M representan una disposición adicional con una distribución de tubos de combustible verticales y moderador caliente enfriado al bombear moderador caliente afuera de la piscina reflectante 105 y la distribución de cavidades de control 130b, enfriándolo, y bombeando el moderador más frío nuevamente adentro de la distribución de cavidades de control 130b y la piscina reflectante 105. En esta disposición cada conjunto de cavidades de control puede ser una pila anular de cavidades de control que rodea un único tubo vertical de combustible. Como se ilustra en la figura 12H, esta disposición puede incluir un núcleo de reactor 100b.

El núcleo de reactor 100b incluye un conjunto de combustible 125b, que es similar al conjunto de combustible 125 y una distribución de cavidades de control 130b. Las cavidades de control 140b de la distribución de cavidades de control 130b contienen un bolsillo de moderador y/o vapor de moderador adyacente al conjunto de combustible 125b.

El conjunto de combustible 125b puede ser cualquier tipo de combustible nuclear adecuado para uso en una reacción nuclear. Por ejemplo, como se ilustra en la figura 12J, el conjunto de combustible 125b puede incluir manojos de varillas de combustible 127b que se disponen en una pluralidad de tubos de combustible 135b. Por ejemplo, el conjunto de combustible 125b puede incluir una disposición de docenas a cientos de los tubos de combustible 135b. Por ejemplo, el conjunto de combustible 125b puede incluir entre aproximadamente 19 y aproximadamente 500 tubos de combustible 135b que son de aproximadamente 7,62 cm (tres pulgadas) a aproximadamente 45,72 cm (18 pulgadas) de diámetro. Cada tubo de combustible 135b puede incluir un único manojos de combustible de varillas de combustible 127b relativamente largas o cualquier número adecuado de manojos de combustible tales como, por ejemplo, 12 manojos de combustible de varillas de combustible 127b relativamente cortas. Cada manojos de combustible puede incluir cualquier número adecuado de varillas de combustible 127b entre aproximadamente 19 y aproximadamente 1231 varillas de combustible tales como, por ejemplo, 37 varillas de combustible. El conjunto de combustible 125b puede incluir cualquier combustible adecuado para una reacción nuclear, tal como, por ejemplo, uranio natural, uranio enriquecido, plutonio o torio, individualmente o en diversas mezclas. Las varillas de combustible 127b pueden ser combustible metálico vertido, o varillas de combustible o pellets de óxido de combustible en un tubo de revestimiento (p. ej., un tubo de aleación de circonio). Por ejemplo, el conjunto de combustible 125b puede incluir un combustible mixto de uranio/plutonio o un combustible mixto de combustible de reactor usado de agua ligera y torio. Los tubos de combustible 135b también pueden contener combustible en forma distintas varillas tales como, por ejemplo, esferas o guijarros. Los tubos de combustible 135b también pueden contener una sal fundida en la que el ion metálico de la sal es un ion del combustible, y la sal fundida funciona tanto como combustible como refrigerante.

Cada tubo de combustible 135b puede contener refrigerante primario además del combustible. El refrigerante primario puede incluir cualquier material en un estado fluido adecuado tal como, por ejemplo, agua pesada, agua ligera, metal líquido adecuado (p. ej., plomo o sodio), sales fundidas adecuadas, fluidos orgánicos adecuados y/o un gas adecuado (p. ej., helio).

El conjunto de combustible 125b puede incluir tubos de combustible 135b que se disponen verticalmente (p. ej., como se ilustra en la figura 2). El conjunto de combustible 125b puede incluir tubos de combustible 135b dispuestos en cualquier configuración adecuada tal como, por ejemplo, una distribución en ángulo recto como se ilustra en las figuras 4 y 5. El conjunto de combustible 125b también puede incluir, por ejemplo, tubos de combustible 135b que se disponen en una distribución hexagonal como se ilustra en la figura 6. Los tubos de combustible 135b se pueden disponer, por ejemplo, sustancialmente verticales.

Haciendo referencia de nuevo a las figuras 12H a 12M, la distribución de cavidades de control 130b puede incluir una distribución tridimensional de las cavidades de control 140b. Por ejemplo, la distribución tridimensional de las cavidades de control 140b sirve como alojamiento para compartimentar y/o confinar bolsillos de moderador adyacentes a los tubos de combustible 135b del conjunto de combustible 125b. Como se representa en las figuras 12H a 12M, la pluralidad de cavidades de control 140b se puede disponer en pilas verticales con las pilas dispuestas horizontalmente entre sí así como apilarse verticalmente. Las cavidades de control 140b pueden ser escalonadas verticalmente dentro de la distribución de cavidades de control 130b. Las cavidades de control 140b se pueden disponer en cualquier configuración adecuada para confinar bolsillos de moderador y/o vapor de moderador adyacente a los tubos de

combustible 135b.

Como se representa en las figuras 12J a 12M, cada cavidad de control 140b incluye un tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b, un tubo de flujo saliente de moderador 337b, un miembro superior inclinado 155b y los miembros laterales 160b y 162b. Como se representa en la figura 12L, el miembro lateral 160b puede ser, por ejemplo, aproximadamente circular o aproximadamente hexagonal para una distribución de tubos de combustible hexagonales, o aproximadamente cuadrado para una distribución de tubos de combustible cuadrados. El miembro superior 155b se une sin holguras a los miembros laterales 160b y 162b, al tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b y/o al tubo de flujo saliente de moderador 337b para confinar un bolsillo de moderador y/o vapor de moderador adyacente a los tubos de combustible 135b. El moderador es libre para moverse entre la cavidad de control 140b y el tubo de flujo saliente de refrigerante de moderador 337b por medio de un orificio 338b ubicado en la parte más baja de cada cavidad de control 140b.

El miembro superior 155b, los miembros laterales 160b y 162b, y los tubos 335b y 337b se pueden formar de materiales estructurales adecuados para dirigir el movimiento de moderador o confinar moderador, tal como, por ejemplo, aleación de circonio. El miembro superior 155b, los miembros laterales 160b y 162b, y los tubos 335b y 337b se pueden conectar entre sí mediante cualquier técnica adecuada, tal como, por ejemplo, soldadura. El miembro superior 155b, los miembros laterales 160b y 162b, y los tubos 335b y 337b también se pueden formar integralmente entre sí. El miembro superior 155b, los miembros laterales 160b y 162b, y los tubos 335b y 337b se conectan para formar, por ejemplo, una cavidad que tiene una parte superior cerrada y una parte inferior abierta. Así, el miembro superior 155b, los miembros laterales 160b y 162b, y los tubos 335b y 337b impiden sustancialmente el movimiento de moderador adentro y afuera de una parte superior de la cavidad de control 140b, mientras permiten que el moderador se mueva adentro y afuera de una parte más baja de la cavidad de control 140b. La parte superior de la cavidad de control 140b incluye el miembro superior 155b, partes superiores de los miembros laterales 160b y 162b, y partes de los tubos 335b y 337b. La parte más baja de la cavidad de control 140b incluye partes más bajas de los miembros laterales 160b y 162b, y partes de los tubos 335b y 337b. El orificio 338b y el tubo de flujo saliente de moderador 337b permiten movimiento de moderador entre la zona de reflector 95 y las cavidades de control 140b. El tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b es sellado en su extremo superior (por ejemplo, en la cavidad de control 140b más superior asociada con un tubo de combustible 135b dado, como se ilustra en la figura 12K). Entre las cavidades de control 140b y los tubos de combustible 135b se puede disponer una holgura 180b, y puede ser rellena con un gas inerte u otro material adecuado, y puede ser cerrada en una parte superior y/o una parte inferior para contener dicho material o para reducir la circulación por convección.

Como se representa en las figuras 12I y 12L, las cavidades de control 140b incluyen sustancialmente el mismo moderador que la zona de reflector 95, porque el moderador se mueve entre la zona de reflector 95 y las cavidades de control 140b por medio del tubo de flujo saliente de moderador 337b y el orificio 338b. Conforme el moderador confinado en la cavidad de control 140b es calentado por neutrones y radiación gamma emitida desde los tubos de combustible 135b y por conducción térmica desde el tubo de combustible 135b, algo o todo el moderador en la cavidad de control 140b puede ser calentado hasta un estado gaseoso en una zona gaseosa 185b. Algo o todo el moderador en la cavidad de control 140b también puede estar en estado líquido en una zona líquida 190b. La zona gaseosa 185b y la zona líquida 190b pueden estar separadas por una frontera 195b. El tamaño de la zona gaseosa 185b y la zona líquida 190b puede variar entre diferentes cavidades de control 140b. Así, la ubicación de la frontera 195b puede variar entre las cavidades de control 140b. Por ejemplo, una cavidad de control 140b dada puede tener tanto una zona gaseosa 185b como una zona líquida 190b, sustancialmente solo una zona gaseosa 185b, o sustancialmente solo una zona líquida 190b.

Calor impartido por medio de neutrones, radiación gamma y/o conducción térmica desde los tubos de combustible 135b puede provocar que el moderador líquido de la zona líquida 190b sea mantenido a una temperatura muy cerca del punto de ebullición del moderador. Por ejemplo, el moderador de la zona líquida 190b puede ser mantenido en un estado justo en el punto de ebullición. Conforme el moderador en la zona líquida 190b llega al punto de ebullición, algo del moderador se evapora y sube a la zona gaseosa 185b.

También, el moderador en la zona gaseosa 185b que está cerca del tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b o que tiene moderador frío rociado en él desde el tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b por medio de los orificios 336b se condensa y gotea nuevamente a la zona líquida 190b de la cavidad de control 140b. Los orificios 336b pueden ser de cualquier tamaño adecuado para movimiento de moderador, tal como, por ejemplo, orificios que son de tamaño pequeño. El tamaño de la zona gaseosa 185b puede por lo tanto permanecer sustancialmente constante, y la frontera 195b puede permanecer relativamente estacionaria, cuando la cantidad de calor impartido a cada cavidad de control 140b por los tubos de combustible 135b (p. ej., por transferencia de calor, ralentización de neutrones y/o radiación gamma) y la cantidad de calor retirada por el flujo entrante de moderador más frío son sustancialmente iguales. Como se describe adicionalmente más adelante, el tamaño de la zona gaseosa 185b y una posición de la frontera 195b pueden variar ligeramente en periodos de tiempo cortos (p. ej., en un periodo de horas o días) basándose en la carga de xenón y samario del combustible, y pueden variar significativamente en periodos de tiempo largos (p. ej., en un periodo de años), basándose en, por ejemplo, la edad (o agotamiento) del combustible. El tamaño de la zona gaseosa 185b y la posición de la frontera 195b pueden variar ligeramente durante y brevemente tras periodos de cambio en la tasa de enfriamiento por el subsistema de refrigerante de reactor 25.

5 Como se ilustra en la figura 12J, las cavidades de control 140b pueden ser enfriadas por movimiento de moderador más frío a través del tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b y adentro de las cavidades de control 140b a través de los orificios 336b en los lados de tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b. Un volumen sustancialmente igual de moderador más caliente puede moverse saliendo de la cavidad de control 140b a la zona de reflector 95 y al subsistema de refrigerante de reactor 25 por medio del orificio 338b y el tubo de flujo saliente de moderador 337.

10 Como se representa en las figuras 12I, 12J y 12K, la parte más baja de la zona de reflector 95 puede ser enfriada por flujo de moderador más frío desde el tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b a través de los orificios 336b en la parte más baja de tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b, con exceso de moderador fluyendo al subsistema de refrigerante de moderador 315 (descrito más adelante) por medio del tubo de flujo saliente de refrigerante de moderador 337b.

15 Como se representa en las figuras 12I, 12J y 12K, la parte superior de la zona de reflector 95 y la distribución de cavidades de control 130b pueden ser enfriadas por evaporación que ocurre en la frontera 115. Durante la evaporación, el exceso de moderador de vapor de agua puede moverse adentro del subsistema de refrigerante de moderador 315 (descrito más adelante) por medio de un tubo de transferencia 323b.

20 Como se representa en la figura 12N, un tanque 377b que contiene agua no presurizada (H_2O) puede incluir una pluralidad de tubos de intercambio de calor de moderador 390b que se conectan para transmisión de fluidos a un tubo de refrigerante de moderador 327b. Los tubos de intercambio de calor de moderador 390b se pueden extender a través el agua no presurizada (H_2O) contenida en el tanque 377b, y se puede conectar para transmisión de fluidos por medio de un pasadizo 355b con una bomba de refrigerante de moderador 350b. Un pasadizo 322b puede conectar para transmisión de fluidos la bomba de refrigerante de moderador 350b al tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b que se dispone en la distribución de cavidades de control 130b.

25 Una válvula de control de presión de vapor de agua 380b puede permitir el paso de algo de moderador de vapor de agua desde el tubo de transferencia de vapor de agua 323b a una pluralidad de tubos de intercambio de calor de vapor de agua 385b cuando una presión en el tubo de transferencia de vapor de agua 323b es mayor que una presión deseada. Vapor de moderador en los tubos de intercambio de calor de vapor de agua 385b se puede condensar sobre paredes interiores de los tubos de intercambio de calor de vapor de agua 385b o puede escapar fuera de una parte inferior de los tubos de intercambio de calor de vapor de agua 385b y condensar en el moderador frío dispuesto en tubo de intercambio de calor de moderador 390b.

30 El tanque 377b puede ser cualquier tanque adecuado para ser rellenado sustancialmente con agua no presurizada (H_2O) de modo que la temperatura no pueda superar el punto de ebullición del agua (H_2O). En funcionamiento normal, el tanque 377b puede ser enfriado por cualquier método adecuado a justo por debajo del punto de ebullición del agua (H_2O). En una situación donde se interrumpe la alimentación al reactor 15, u otra situación en la que el enfriamiento normal funcione anómalamente, el tanque 377b puede ser enfriado por evaporación de la superficie del agua (H_2O) dispuesta en el tanque 377b.

35 Como se ilustra en la figura 13, el subsistema de refrigerante de reactor 25 puede incluir un subsistema de transferencia 305, un subsistema de refrigerante de combustible 310 y un subsistema de refrigerante de moderador 315. El subsistema de transferencia 305 puede transferir refrigerante de reactor entre el intercambiador de calor 20 y el núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b. El subsistema de refrigerante de combustible 310 puede facilitar el intercambio de calor desde los tubos de combustible 135, 135', 135a y 135b, y el subsistema de refrigerante de moderador 315 puede facilitar el intercambio de calor desde las cavidades de control 140', 140a, 140b y la zona de reflector 95.

40 El refrigerante de reactor del subsistema de refrigerante de reactor 25 puede ser cualquier material fluido adecuado que facilite el intercambio de calor desde el núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b. Por ejemplo, el refrigerante de reactor puede incluir D_2O ("agua pesada"), H_2O ("agua ligera"), metal o sal fundidos, o un gas. Un refrigerante similar puede ser usado para el subsistema de refrigerante de combustible 310 y el subsistema de refrigerante de moderador 315, o un refrigerante diferente puede ser usado para el subsistema de refrigerante de combustible 310 y el subsistema de refrigerante de moderador 315.

45 El subsistema de transferencia 305 puede incluir un pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 y un pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325. Los pasadizos 320 y 325 se pueden formar de material adecuado para transferir refrigerante de reactor, tales como, por ejemplo, acero y/o aleación de circonio. El mismo pasadizo 320 y el pasadizo 325 pueden transferir refrigerante de reactor tanto para el subsistema de refrigerante de combustible 310 como para el subsistema de refrigerante de moderador 315 (como en, p. ej., la primera disposición ejemplar), o se pueden proporcionar pasadizos separados 320 y 325 para el subsistema de refrigerante de combustible 310 y los pasadizos 322a, 327a, 322b, 327b, y pasadizos similares en el núcleo de reactor 100' (no se muestra) para el subsistema de refrigerante de moderador 315. El pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 puede transferir refrigerante de reactor frío desde el intercambiador de calor 20 al reactor 15. El refrigerante de reactor frío puede estar en estado líquido y puede estar a cualquier temperatura adecuada para facilitar el intercambio de calor desde el reactor 15.

Haciendo referencia de nuevo a la figura 2, por ejemplo, el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 puede pasar a

través de aberturas de la estructura de contención 85 y a la zona de reflector 95. El pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 puede comunicarse con los pasadizos del subsistema de refrigerante de combustible 310 y el subsistema de refrigerante de moderador 315 dentro de la zona de reflector 95, y puede de ese modo suministrar refrigerante de reactor frío al subsistema de refrigerante de combustible 310 y al subsistema de refrigerante de moderador 315 para intercambio de calor. El pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 puede estar en comunicación de fluidos con el subsistema de refrigerante de combustible 310 y el subsistema de refrigerante de moderador 315, y puede recibir refrigerante de reactor caliente (p. ej., refrigerante de reactor que ha pasado a través del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b, facilitando de ese modo el intercambio de calor con el núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b) desde el subsistema de refrigerante de combustible 310 y el subsistema de refrigerante de moderador 315. El pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 puede transferir refrigerante de reactor caliente desde el reactor 15 nuevamente al intercambiador de calor 20.

Como se ilustra, por ejemplo, en la figura 3, el subsistema de refrigerante de combustible 310 puede incluir una pluralidad de pasadizos 330 que pueden estar en comunicación de fluidos con el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 y el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de transferencia 305. El refrigerante de reactor frío puede fluir desde el pasadizo de reactor frío 320 a los pasadizos 330. Los pasadizos 330 se pueden disponer hacia y desde los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b. El refrigerante de reactor frío puede pasar a través de los pasadizos 330, pasando de ese modo a través de los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b para facilitar el intercambio de calor con los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b. El refrigerante de reactor frío puede ser calentado por combustible dispuesto en los tubos 135, 135', 135a y/o 135b, y puede ser transferido afuera de los tubos de combustible 135, 135', 135a y 135b por medio de los pasadizos 330. Los pasadizos 330 pueden entonces transferir el refrigerante de reactor caliente al pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de transferencia 305. El refrigerante de reactor caliente puede estar en un estado sustancialmente totalmente líquido, puede estar en un estado parcialmente líquido y un estado parcialmente gaseoso, o puede estar en un estado sustancialmente totalmente gaseoso.

Como se ilustra, por ejemplo, en la figura 2, el subsistema de refrigerante de moderador 315 puede incluir una pluralidad de pasadizos 335 que pueden estar en comunicación de fluidos con el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 y el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de transferencia 305. El refrigerante de reactor frío puede fluir desde el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 a los pasadizos 335 y 330. El refrigerante de reactor frío puede estar en un estado líquido. Los pasadizos 335 se pueden disponer dentro de las cavidades de control 140. El refrigerante de reactor frío puede pasar a través de los pasadizos 335, pasando de ese modo a través de las cavidades de control 140 para facilitar el intercambio de calor con las cavidades de control 140. El refrigerante de reactor frío puede ser calentado por moderador confinado dentro de las cavidades de control 140 hasta refrigerante de reactor cálido, y puede ser transferido afuera de las cavidades de control 140 por medio de los pasadizos 335. De manera similar al intercambio de calor realizado por los pasadizos 335 en las cavidades de control descritas, los pasadizos 330 pueden transferir refrigerante de reactor frío desde el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 a través de la piscina reflectante 105. También se contempla que el refrigerante de reactor frío pueda ser calentado por el moderador de la piscina reflectante 105 hasta refrigerante de reactor cálido. Los pasadizos 335 y 330 pueden entonces transferir el refrigerante de reactor cálido a una parte más baja de los tubos de combustible 135, a través de los tubos de combustible 135 (donde es calentado por el combustible para volverse refrigerante de reactor caliente), y entonces al pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de transferencia 305. El refrigerante de reactor caliente puede estar en un estado sustancialmente totalmente líquido o puede estar en un estado parcialmente líquido y un estado parcialmente gaseoso.

La figura 14 ilustra una ilustración detallada ejemplar del pasadizo 335 conforme atraviesa las cavidades de control 140 para facilitar el intercambio de calor desde las cavidades de control 140. El pasadizo 335 se conecta al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 y/o al pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de transferencia 305 ya sea directamente o por medio de un pasadizo intermedio 345. En esta realización, el pasadizo 335 incluye un miembro de entrada 350, un miembro interior 355, un miembro exterior 360 y un miembro de salida 365. El miembro de entrada 350 conecta para transmisión de fluidos el pasadizo intermedio 345 con el miembro interior 355. El miembro interior 355 se dispone dentro de un interior del miembro exterior 360. Por ejemplo, el miembro interior 355 y el miembro exterior 360 pueden ser una disposición de tubos concéntricos. Aquí, el miembro de salida 365 conecta para transmisión de fluidos el miembro exterior 360 con el pasadizo intermedio 345. El miembro de entrada 350 atraviesa una abertura en una pared del miembro de salida 365, y se dispone parcialmente dentro del miembro de salida 365. El miembro interior 355 tiene una parte extrema 370 que está abierta. A través de una pared del miembro interior 355 se puede formar una pluralidad de aberturas 375. Las aberturas 375 pueden aumentar de tamaño y un espaciamiento entre las aberturas 375 puede disminuir, en una dirección moviéndose hacia la parte extrema 370 del miembro interior 355. El refrigerante de reactor fluye desde el miembro de entrada 350 y a través de un canal 380 del miembro interior 355. Algo del refrigerante de reactor puede pasar a través de las aberturas 375 y a un canal 385, antes de llegar a la parte extrema abierta 370 del miembro interior 355. Un tamaño y una frecuencia de las aberturas 375 puede aumentar, en una dirección moviéndose hacia la parte extrema 370 y una cantidad de mezcla de refrigerante de reactor entre los canales 380 y 385 puede aumentar en una dirección moviéndose hacia la parte extrema 370. El canal 385 se forma entre el miembro interior 355 y el miembro exterior 360, y puede ser un canal en forma anular. Después de pasar a través de las aberturas 375 y/o la parte extrema abierta 370, el refrigerante de reactor fluye a través del canal 385 y al pasadizo intermedio 345, por medio del miembro de salida 365. El refrigerante de reactor dispuesto en el canal 385

puede ser calentado por conducción térmica desde el moderador más caliente en la cavidad de control 140 a través de la pared del miembro exterior 360. Al permitir algo de flujo de refrigerante relativamente más frío desde el canal 380 al canal 385 por medio de las aberturas 375, la temperatura de refrigerante en el canal 385 puede ser relativamente constante a lo largo de su longitud. Se pueden añadir aletas de transferencia de calor (no se muestran) a la superficies interior y/o exterior del miembro exterior 360 para facilitar la transferencia de calor.

Haciendo referencia de nuevo a la figura 13, el subsistema de la bomba 30 puede incluir una bomba de refrigerante 390, una bomba de H₂O 395 y un motor 400. El motor 400 puede impulsar la bomba de refrigerante 390 y la bomba de H₂O 395.

La bomba de refrigerante 390 puede ser cualquier tipo de bomba adecuada para presurizar el flujo de refrigerante de reactor en el subsistema de transferencia 305. Por ejemplo, la bomba de refrigerante 390 puede ser una bomba de desplazamiento positivo, tal como una bomba tipo rotatorio, una bomba tipo en vaivén, o una bomba tipo lineal. También, por ejemplo, la bomba de refrigerante 390 puede ser una bomba de vapor de agua, una bomba de impulsos, una bomba de cilindro hidráulico, o una bomba centrífuga. La bomba de refrigerante 390 puede presurizar un flujo de refrigerante de reactor en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 desde el intercambiador de calor 20 al reactor 15, y dentro del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 desde el reactor 15 nuevamente al intercambiador de calor 20. La bomba de refrigerante 390 puede presurizar el mismo refrigerante de reactor en el subsistema de transferencia 305 tanto para el subsistema de refrigerante de combustible 310 como para el subsistema de refrigerante de moderador 315, o una o más bombas de refrigerante 390 pueden presurizar por separado refrigerante de reactor para el subsistema de refrigerante de combustible 310 y moderador frío para el subsistema de refrigerante de moderador 315.

La bomba de H₂O 395 puede ser de un tipo similar a la bomba de refrigerante 390 y puede presurizar un flujo de agua (H₂O) y vapor de agua (H₂O) en el subsistema de vapor de agua de turbina 65. La bomba de H₂O 395 puede presurizar un flujo de vapor de agua caliente (H₂O) en el pasadizo 70 desde el intercambiador de calor 20 a la turbina 45, un flujo de vapor de agua (H₂O) sobrante o de escape en el pasadizo 75 desde la turbina 45 al subsistema de enfriamiento de turbina 60 y un flujo de agua (H₂O) en el pasadizo 80 desde el subsistema de enfriamiento de turbina 60 al intercambiador de calor 20.

El motor 400 puede ser cualquier tipo adecuado de motor para impulsar la bomba de refrigerante 390 y la bomba de H₂O 395, tal como, por ejemplo, un motor de desplazamiento fijo o variable, un motor hidráulico de tipo eje doblado, un motor hidráulico lineal, un cilindro hidráulico o un motor eléctrico. El motor 400 puede impulsar la bomba de refrigerante 390 y la bomba de H₂O 395 de cualquier manera adecuada, tal como, por ejemplo, por medio de uno o más árboles mecánicos 405. Por ejemplo, el motor 400 puede impulsar tanto la bomba de refrigerante 390 como la bomba de H₂O 395 por medio de un único árbol mecánico 405. El árbol mecánico 405 puede incluir un volante de inercia que funciona para mitigar cambios rápidos de flujo conforme el motor 400 impulsa la bomba de refrigerante 390 y la bomba de H₂O 395. El motor 400 también puede impulsar la bomba de refrigerante 390 y la bomba de H₂O 395 por separado. También se contempla que el motor 400 pueda impulsar la bomba 390 y la bomba de H₂O 395 mediante otras técnicas adecuadas tales como, por ejemplo, hidráulicamente. El motor 400 se puede configurar para impulsar tanto la bomba de refrigerante 390 como la bomba de H₂O 395 en un nivel optimizado cuando el sistema de reactor nuclear 5 está funcionando a plena potencia. El motor 400 puede impulsar tanto la bomba de refrigerante 390 como la bomba de H₂O 395 cuando el motor 400 está parado o deja de funcionar, y tanto la bomba de refrigerante 390 como la bomba de H₂O 395 también pueden pararse simultáneamente. También se contempla que cada bomba pueda tener un motor separado.

Como se ilustra en las figuras 16-18, el subsistema de refrigerante auxiliar 35 puede incluir un subsistema de bucle de convección 410 y un subsistema de intercambio de calor auxiliar 415. El subsistema de bucle de convección 410 y el subsistema de intercambio de calor auxiliar 415 pueden proporcionar sistemas auxiliares para facilitar el intercambio de calor desde el reactor 15.

Como se ilustra en la figura 16, el subsistema de bucle de convección 410 de esta realización incluye un empalme 425, un pasadizo 430, un pasadizo 435, una pluralidad de pasadizos 440 y 445, una parte de combinación 450, un empalme 455, una válvula 460 y una válvula 465. El empalme 425, el pasadizo 430, el pasadizo 435, la pluralidad de pasadizos 440 y 445, la parte de combinación 450 y el empalme 455 se pueden formar de cualquier material adecuado para transferir refrigerante de reactor, y están en comunicación de fluidos para proporcionar un camino de refrigerante de reactor auxiliar. El empalme 425 se puede configurar para mantener una presión A en una entrada del pasadizo 430. Una parte del refrigerante de reactor que fluye a través del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 fluye al pasadizo 430 en el empalme 425. El pasadizo 430 guía flujo de refrigerante de reactor hacia abajo, por debajo de la frontera 115 de la zona de reflector 95, guiando de ese modo flujo por debajo de una superficie superior de la piscina reflectante 105. El refrigerante de reactor fluye desde el pasadizo 430, hacia arriba a través del pasadizo 435, y luego hacia la estructura de contención 85 y el recipiente a presión 90 por medio de la pluralidad de pasadizos 440. La pluralidad de pasadizos 440 están en comunicación de fluidos con la pluralidad de pasadizos 445. La pluralidad de pasadizos 440 y 445 pueden tener un tamaño para que sean más pequeños que los pasadizos 430 y 435, y pueden ser, por ejemplo, una pluralidad de tubos pequeños. La pluralidad de pasadizos 445 se pueden disponer adyacentes a una superficie del recipiente a presión 90 para tener buen intercambio de calor con el recipiente a presión 90. Por ejemplo, la pluralidad de pasadizos 445 pueden ser soldados en el recipiente a presión 90. La pluralidad de pasadizos

445 transfieren refrigerante de reactor hacia abajo a lo largo del recipiente a presión 90, a una posición cerca o por debajo de una parte inferior del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b.

En la realización mostrada la pluralidad de pasadizos 445 se conectan para transmisión de fluidos y se combinan en una o más partes de combinación 450, que son más grandes que la pluralidad de pasadizos 445. Por ejemplo, varios pasadizos 445 pueden combinarse en cada una de una pluralidad de partes de combinación más grandes 450. Una o más partes de combinación 450 se conectan para transmisión de fluidos al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 en el empalme 455. El empalme 455 se puede configurar para mantener una presión B en una salida de una o más partes de combinación 450 de manera que cuando la bomba de refrigerante 390 está proporcionando un flujo de refrigerante para funcionamiento a plena potencia, la presión A en el pasadizo 430 puede equilibrar la presión B de modo que pasa relativamente poco refrigerante entre el empalme 425 y el empalme 455 por medio de los pasadizos 430, 435, 440, 445, y la parte de combinación 450. Cuando la bomba 390 no está funcionando y el núcleo de reactor 100 todavía está produciendo calor, el refrigerante caliente en los tubos de combustible 135 sube y fluye al pasadizo 430 porque el pasadizo 325 está bloqueado sustancialmente por la bomba 390. El refrigerante caliente continúa a través de los pasadizos 435 y 440 a la pluralidad de pasadizos 445. En los pasadizos 445, el refrigerante transfiere calor a la zona de reflector 95 y al recipiente a presión 90, y se vuelve más denso conforme se enfría. Este moderador relativamente más denso cae a través del pasadizo 445 y el empalme 455 y desplaza moderador relativamente más caliente en los tubos de combustible 135, creando así un circuito de convección que puede enfriar los tubos de combustible 135.

Las válvulas 460 y 465 se pueden proporcionar para aislar un flujo de refrigerante de reactor dentro del subsistema de bucle de convección 410 en caso de interrupción del flujo y/o pérdida de refrigerante, externo al reactor 15, del subsistema de refrigerante de reactor 25. La válvula 460 se puede disponer en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, y puede ser cualquier válvula adecuada para bloquear sustancialmente el flujo de refrigerante de reactor afuera del reactor 15. Por ejemplo, la válvula 460 puede ser una válvula de una vía o una válvula de bloqueo inverso que pueda permitir que fluya refrigerante de reactor adentro del reactor 15 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, pero pueda bloquear sustancialmente un flujo de refrigerante de reactor afuera del reactor 15 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320. Por ejemplo, la válvula 460 se puede disponer en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 en una posición en una superficie exterior, o cerca de esta, de la estructura de contención 85. La válvula 465 se puede disponer en el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325, y puede ser cualquier válvula adecuada que bloquee sustancialmente el flujo de refrigerante de reactor afuera del reactor 15 cuando la cantidad de refrigerante de reactor es menor que una cantidad umbral. Por ejemplo, la válvula 465 puede ser una válvula flotante que puede permitir que fluya refrigerante de reactor afuera del reactor 15 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 cuando el nivel de refrigerante de reactor es mayor que la cantidad umbral, pero puede bloquear sustancialmente un flujo de refrigerante de reactor afuera del reactor 15 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 cuando el nivel de refrigerante de reactor es menor que la cantidad umbral. Por ejemplo, la válvula 465 puede bloquear sustancialmente el flujo de refrigerante de reactor afuera del reactor 15 cuando el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 es menor que la mitad de todo el refrigerante de reactor. La válvula 465 se puede disponer en el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 en una posición de una superficie exterior, o cerca de esta, de la estructura de contención 85.

Como se ilustra en las figuras 17 y 18, el subsistema de intercambio de calor auxiliar 415 puede incluir uno o más miembros de intercambio de calor 470, uno o más miembros de intercambio de calor 475 y uno o más miembros de intercambio de calor 480. El miembro de intercambio de calor 470, el miembro de intercambio de calor 475 y el miembro de intercambio de calor 480 pueden facilitar el intercambio de calor para el calor producido por el núcleo de reactor 100, 100', 100a o 100b a una ubicación alejada del reactor 15.

El miembro de intercambio de calor 470 puede ser un elemento alargado para alojar un material. El miembro de intercambio de calor se puede disponer en la estructura de contención 85 (p. ej., vertido dentro de una pared de la estructura de contención 85), y se puede disponer cerca del recipiente a presión 90 o en contacto con una superficie exterior del recipiente a presión 90. El miembro de intercambio de calor 470 se puede disponer radialmente en la estructura de contención 85, de modo que un extremo del miembro de intercambio de calor 470 pueda estar adyacente o en contacto con el recipiente a presión 90, y otro extremo del miembro de intercambio de calor 470 pueda estar cerca de una parte exterior de la estructura de contención 85. Por ejemplo, el miembro de intercambio de calor 470 puede ser una cavidad alargada que aloja un material de estado cambiante. Por ejemplo, el miembro de intercambio de calor 470 puede incluir una cavidad que aloja una aleación de metal. Por ejemplo, el miembro de intercambio de calor 470 puede ser un tubo de acero que se rellena con una aleación de metal. La aleación de metal de estado cambiante puede ser un material que tiene un punto de fusión que sea ligeramente más alto que una temperatura de funcionamiento normal del moderador de la zona de reflector 95. Por ejemplo, el miembro de intercambio de calor 470 puede ser un tubo de acero hueco que se rellena sustancialmente por completo con plomo, estaño y/o cualquier otro material con un punto de fusión adecuado. Si la temperatura del moderador dentro de la zona de reflector 95 supera su temperatura de funcionamiento normal, el material de estado cambiante alojado dentro del miembro de intercambio de calor 470 puede ser calentado desde un estado sólido hasta un estado líquido. Por ejemplo, el miembro de intercambio de calor 470 puede incluir plomo como material de estado cambiante, que puede fundirse hasta plomo fundido cuando el moderador dentro de la zona de reflector 95 supera su temperatura de funcionamiento normal. Cuando el material de estado cambiante cambia de estados (p. ej., cuando se funde el plomo), las propiedades de

conductividad del material de estado cambiante pueden mejorar. Por lo tanto, el material de estado cambiante del miembro de intercambio de calor 470 puede transferir eficientemente calor (por ejemplo, por convección) alejándose del recipiente a presión 90, y hacia un exterior de la estructura de contención 85 (que puede tener baja conductividad térmica), conforme se funde el material de estado cambiante. También se contempla que el material de estado cambiante alojado dentro del miembro de intercambio de calor 470 pueda estar en un estado líquido a temperaturas de funcionamiento normales de moderador, y pueda ser calentado hasta un estado gaseoso cuando la temperatura del moderador supera una temperatura de funcionamiento normal.

El miembro de intercambio de calor 475 también puede ser una cavidad alargada que aloja un material de estado cambiante, similar al miembro de intercambio de calor 470. El material de estado cambiante del miembro de intercambio de calor 475 puede ser un material con un punto de fusión y/o ebullición más bajo que el material de estado cambiante del miembro de intercambio de calor 470. Por ejemplo, el material de estado cambiante puede ser un material en un estado líquido, y puede tener un punto de ebullición que sea menor que la temperatura a la que el miembro de intercambio de calor 470 experimenta un cambio de estado (p. ej., el punto de fusión del plomo o cualquier otro material de estado cambiante adecuado del miembro de intercambio de calor 470). Por ejemplo, el miembro de intercambio de calor 475 puede ser un tubo de acero que se rellena con agua (H₂O) o cualquier otro material adecuado en un estado líquido. El miembro de intercambio de calor 475 se puede disponer sustancialmente vertical dentro de la estructura de contención 85 (p. ej., vertido dentro de una pared de la estructura de contención 85). Como se ilustra en las figuras 17 y 18, el miembro de intercambio de calor 475 puede estar en contacto o dispuesto cerca de una parte extrema de uno o más miembros de intercambio de calor 470, y se puede disponer cerca de una superficie exterior de la estructura de contención 85. El material de estado cambiante del miembro de intercambio de calor 475 puede ser calentado por calor transferido desde el miembro de intercambio de calor 470, y puede experimentar un cambio de estado. Por ejemplo, calor transferido desde una parte extrema del miembro de intercambio de calor 470 al miembro de intercambio de calor 475 puede provocar que el material de estado cambiante cambie de estados (p. ej., puede provocar que agua alojada en el tubo de acero hierva). También se contempla que el material de estado cambiante del miembro de intercambio de calor 475 pueda estar en un estado sólido a temperaturas de funcionamiento normales de moderador, y pueda ser calentado hasta un estado líquido cuando la temperatura del moderador supera una temperatura de funcionamiento normal.

El miembro de intercambio de calor 480 puede ser similar al miembro de intercambio de calor 475, y puede estar en comunicación de fluidos con el miembro de intercambio de calor 475. El material de estado cambiante del miembro de intercambio de calor 475 puede fluir así desde el miembro de intercambio de calor 475 al miembro de intercambio de calor 480. El miembro de intercambio de calor 480 se puede disponer con un ligero ángulo respecto a un plano sustancialmente horizontal. El miembro de intercambio de calor 480 se puede disponer con una ligera pendiente tal como, por ejemplo, 1 en 20 (elevación sobre la extensión) o 1 en 50 (elevación sobre la extensión). Como se ilustra en la figura 18, los miembros de intercambio de calor 480 pueden salir en abanico desde el reactor 15, transfiriendo de ese modo calor lejos del reactor 15. Los miembros de intercambio de calor 480 se pueden disponer bajo una superficie de suelo, transfiriendo de ese modo calor desde el reactor 15 bajo cualquier cantidad adecuada de la superficie de suelo. Por ejemplo, los miembros de intercambio de calor 480 se pueden disponer bajo un campo grande y/o aparcamiento, utilizando de ese modo la gran capacidad térmica del suelo para absorber calor, y utilizar la superficie de suelo para disipar calor. Como el miembro de intercambio de calor 480 puede estar en una ligera inclinación, el material de estado cambiante alojado dentro del miembro de intercambio de calor 480 puede ser enfriado a una distancia dada desde el reactor 15 hasta el estado anterior. Por ejemplo, el miembro de intercambio de calor 475 puede incluir agua que puede ser calentada hasta vapor de agua (H₂O) y transferida al miembro de intercambio de calor 480. En un extremo exterior, el miembro de intercambio de calor 480 puede terminar en un pequeño tanque o depósito de agua de modo que los miembros de intercambio de calor 475 y 480 están sustancialmente siempre llenos de agua. El miembro de intercambio de calor 480 puede ser una tubería corrugada configurada para aumentar un área de contacto de la tubería (p. ej., aumentar el área de contacto por unidad de distancia a lo largo del suelo), y también aumentar el área de contacto de cualquier vapor de agua (H₂O) en la tubería con la superficie interior de tubería. Como el vapor de agua (H₂O) que se traslada hacia fuera a lo largo de la superficie superior del agua (H₂O) en la tubería rellena la parte superior de cada corrugación en la tubería antes que vapor de agua (H₂O) pueda trasladarse aún más saliendo en la tubería, la corrugación aumenta el área superficial de agua (H₂O) en la tubería que está en contacto con el vapor de agua (H₂O). A una distancia dada, se puede disipar suficiente calor de manera que el vapor de agua (H₂O) se condense hasta agua (H₂O).

Como se ilustra en la figura 19, un subsistema de parada de reactor auxiliar 420 puede incluir un depósito presurizado 485, uno o más pasadizos 490, un pasadizo de drenaje 495 y una bomba 500. El depósito presurizado 485 puede suministrar agua presurizada (H₂O) al pasadizo 490. La bomba 500 puede presurizar agua (H₂O) al pasadizo de drenaje 495.

El depósito presurizado 485 puede ser cualquier recipiente adecuado para almacenar líquido presurizado, tal como, por ejemplo, un recipiente presurizado de acero. Cualquier material adecuado de absorción de neutrones puede ser almacenado en el depósito presurizado 485, tal como, por ejemplo, agua (H₂O). También, en el depósito presurizado 485 se puede almacenar agua boricada (H₂O), que tiene boro absorbido mezclado en el agua (H₂O). El depósito presurizado 485 se puede disponer en un lado exterior de la estructura de contención 85, y puede incluir una válvula 487 que puede ser abierta y cerrada al flujo para permitir y bloquear selectivamente y flujo de material presurizado

desde el depósito presurizado 485 a uno o más pasadizos 490.

El pasadizo 490 puede ser cualquier pasadizo adecuado para transferir un material presurizado. El pasadizo 490 se puede conectar para transmisión de fluidos al depósito presurizado 485, y puede transferir material presurizado desde el depósito presurizado 485, a través de una abertura de la estructura de contención 85, y puede dividirse en uno o más tubos en forma de U que desciendan a través del área de núcleo a la zona de reflector 95 por debajo del núcleo de reactor 100, 100', 100a o 100b, y luego nuevamente arriba a través del núcleo de reactor 100, 100', 100a o 100b. El pasadizo 490 puede transferir material presurizado a través de la zona de reflector 95 y el núcleo de reactor 100, 100', 100a o 100b de cualquier manera adecuada. Por ejemplo, como se ilustra en la figura 19, el pasadizo 490 puede entrar a una parte superior de la piscina reflectante 105 y formar una configuración sustancialmente en forma de U. El pasadizo 490 se puede formar en cualquier configuración adecuada dentro de la zona de reflector 95. Cuando la válvula 487 está bloqueando flujo de material presurizado desde el depósito presurizado 485 al pasadizo 490, el pasadizo 490 puede ya estar relleno con vapor de agua (H₂O). Cuando se desea una parada rápida del reactor (p. ej., SCRAM), se abre la válvula 487 y material absorbente de neutrones presurizado, tal como, por ejemplo, agua boricada (H₂O) rellena el pasadizo 490, el material absorbente de neutrones presurizado puede presurizar cada vez más el vapor de agua (H₂O) que estaba previamente dispuesto en el pasadizo 490. Por lo tanto, el vapor de agua (H₂O) previamente dispuesto en el pasadizo 490 puede ser presurizado cada vez más en una parte extrema 505 de cada uno del uno o más pasadizos 490, ralentizando y gradualmente parando el flujo.

El pasadizo de drenaje 495 puede disponerse en una parte más baja de la piscina reflectante 105 y puede conectar para transmisión de fluidos cualquier parte (p. ej., una parte más baja) del pasadizo 490 con el depósito presurizado 485. La bomba 500 se puede disponer en el pasadizo de drenaje 495 y puede presurizar el material absorbente de neutrones para que fluya desde la parte más baja del pasadizo 490 nuevamente al depósito presurizado 485 cuando se desea reiniciar el reactor 15. La bomba 500 también puede presurizar material absorbente de neutrones dispuesto en el depósito presurizado 485. La bomba 500 de ese modo puede bombear el material absorbente de neutrones, tal como, por ejemplo, agua boricada (H₂O), desde el pasadizo 490 nuevamente al depósito presurizado 485.

Como se ilustra en la figura 20, el subsistema de control de reactor 40 puede incluir un subsistema de control 510, un subsistema de seguimiento de carga 515, un subsistema de baipás 520, un subsistema de estabilización de moderador 525, un subsistema de estabilización de refrigerante de reactor 530 y un subsistema de flujo diferencial 535. El subsistema de control 510, el subsistema de seguimiento de carga 515, el subsistema de baipás 520, el subsistema de estabilización de moderador 525, el subsistema de estabilización de refrigerante de reactor 530, y el subsistema de flujo diferencial 535 pueden controlar y/o estabilizar un funcionamiento del sistema de reactor nuclear 5.

El subsistema de control 510 puede incluir un controlador 540 que puede ser cualquier tipo de controlador lógico programable adecuado para automatizar procesos de máquina. El controlador 540 se puede conectar a los componentes del sistema de reactor nuclear 5 por medio de líneas eléctricas (no se muestra), y puede controlar un funcionamiento de cualquier componente adecuado del sistema de reactor nuclear 5 por medio de las líneas eléctricas. Por ejemplo, el controlador 540 puede ser conectado eléctricamente y controlar componentes del subsistema de generación de potencia 10, el reactor 15, el intercambiador de calor 20, el subsistema de refrigerante de reactor 25, el subsistema de la bomba 30, el subsistema de refrigerante auxiliar 35 y/o el subsistema de control de reactor 40. El subsistema de control 510 también puede incluir componentes de entrada y/o salida que están en comunicación eléctrica con el controlador 540, tales como, por ejemplo, pantallas, monitores, teclados, y otros dispositivos para uso por operarios del sistema de reactor nuclear 5. El subsistema de control 510 también puede incluir sensores que se disponen en los diversos pasadizos y componentes del sistema de reactor nuclear 5. Los sensores pueden medir cualquier parámetro adecuado, tales como, por ejemplo, temperatura y/o presión de, p. ej., H₂O o refrigerante de reactor. Los sensores se puede conectar eléctricamente al controlador 540, y pueden aportar datos detectados al controlador 540 para uso en el control del sistema de reactor nuclear 5.

El subsistema de seguimiento de carga 515 puede incluir compuertas 545 y 550, los pasadizos 555, 560, 565, 580 y 590, un condensador 570, una válvula 575, un intercambiador de calor 585 y un empalme 595, que pueden ser cualesquiera elementos adecuados para transferir vapor de agua (H₂O) y agua (H₂O).

La compuerta 545 se puede disponer en el pasadizo 70 y puede permitir selectivamente flujo desde el pasadizo 70 al pasadizo 555. La compuerta 545 puede ser movida selectivamente desde una posición de cierre que bloquea sustancialmente el flujo de vapor de agua (H₂O) desde el pasadizo 70 al pasadizo 555, una posición de apertura que permite flujo sustancialmente completo desde el pasadizo 70 al pasadizo 555 y una posición de apertura parcial posicionado en cualquier intervalo deseado entre la posición de cierre y la posición de apertura y permite de ese modo un flujo parcial, proporcional a la cantidad que se abre la compuerta 545, de vapor de agua (H₂O) desde el pasadizo 70 al pasadizo 555. La compuerta 545 puede de ese modo reducir selectivamente un flujo de vapor de agua (H₂O) a través del pasadizo 70 al desviar vapor de agua (H₂O) a través del pasadizo 555.

La compuerta 550 se puede disponer en el pasadizo 555 y puede permitir selectivamente flujo desde el pasadizo 555 al pasadizo 560 de una manera similar al funcionamiento de la compuerta 545. La compuerta 550 de ese modo puede bloquear selectivamente, permitir parcialmente o permitir totalmente flujo de vapor de agua (H₂O) desde el pasadizo 555 al pasadizo 560. El pasadizo 560 puede hacer de baipás de la turbina 45 y transferir vapor de agua (H₂O) directamente al subsistema de enfriamiento de turbina 60. Por lo tanto, la compuerta 550 puede funcionar para permitir

selectivamente vapor de agua (H₂O) para que sea trasferido directamente al subsistema de enfriamiento de turbina 60 en ciertas situaciones tales como, por ejemplo, cuando se desea una parada rápida de la turbina 45.

5 El pasadizo 555 puede estar en comunicación de fluidos con el pasadizo 565. El pasadizo 565 puede trasferir vapor de agua (H₂O) desde el pasadizo 555 al condensador 570. El pasadizo 565 puede pasar por un exterior del intercambiador de calor 20, en lugar de pasar a través de un interior del intercambiador de calor 20.

10 El condensador 570 se puede disponer en contacto o adyacente al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320. El condensador 570 puede ser cualquier condensador adecuado para condensar vapor de agua (H₂O) hasta agua (H₂O). La válvula 575 se puede disponer en el condensador 570 en cualquier ubicación adecuada, tal como, por ejemplo, en una parte inferior del condensador 570. La válvula 575 puede ser cualquier válvula adecuada que permita que fluya agua (H₂O) afuera del condensador 570 mientras bloquea sustancialmente un flujo de vapor de agua (H₂O) afuera del condensador 570. Por ejemplo, la válvula 575 puede ser una válvula de flotador. El condensador 570 y la válvula 575 pueden servir como sistema de reducción de presión, reduciendo la alta presión del vapor de agua (H₂O) en el pasadizo 565 a una presión relativamente baja del agua (H₂O) en el pasadizo 580.

15 El pasadizo 580 puede estar en comunicación de fluidos con el condensador 570. El pasadizo 580 puede trasferir agua (H₂O) desde el condensador 570 al intercambiador de calor 585. El pasadizo 580 puede pasar por un exterior del intercambiador de calor 20, en lugar de pasar a través de un interior del intercambiador de calor 20.

20 El intercambiador de calor 585 puede ser cualquier dispositivo adecuado que facilite el intercambio de calor desde el agua (H₂O) trasferida a través del pasadizo 580. El intercambiador de calor 585 se puede disponer en o cerca de un pasadizo del subsistema de vapor de agua de turbina 65 que transfiere agua (H₂O) desde una salida de la bomba de H₂O 395 al intercambiador de calor 20. El intercambiador de calor 585 puede enfriar una temperatura del agua (H₂O) a sustancialmente la misma temperatura que el agua (H₂O) que es trasferida por el pasadizo 80 del subsistema de vapor de agua de turbina 65. El pasadizo 590 puede trasferir agua (H₂O) desde el intercambiador de calor 585 al pasadizo 80 por medio del empalme 595. El agua (H₂O) trasferida por el pasadizo 590 al pasadizo 80 puede tener sustancialmente la misma temperatura que la temperatura del agua (H₂O) que ya fluye en el pasadizo 80. El pasadizo 25 80 puede entonces trasferir el agua (H₂O) a una entrada de la bomba de H₂O 395 del subsistema de la bomba 30.

30 El subsistema de baipás 520 puede incluir una bomba 600 y un pasadizo 605. El pasadizo 605 puede conectar para transmisión de fluidos el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 y el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de transferencia 305. La bomba 600 se puede disponer en el pasadizo 605. La bomba 600 puede tener una capacidad relativamente pequeña, tal como, por ejemplo, entre aproximadamente el 2 % y aproximadamente el 20 % de la capacidad de la bomba 390. La bomba 600 puede funcionar para presurizar refrigerante de reactor en el pasadizo 605 para bombear refrigerante de reactor desde el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, haciendo baipás de ese modo el intercambiador de calor 20 y la bomba 390. La bomba 600 y el pasadizo 605 pueden permitir que refrigerante de reactor relativamente caliente fluya a través del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 para baipás del intercambiador de calor 20 y fluya directamente al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, permitiendo de ese modo que refrigerante caliente se mezcle con el refrigerante relativamente frío y suba la temperatura del refrigerante que fluye en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320. El subsistema de baipás 520 puede funcionar, por ejemplo, durante una parada y/o carga inicial de refrigerante de reactor del sistema de reactor nuclear 5. El sistema de baipás 520 puede servir también para ajustar las ratios eficaces de flujo de las bombas 390 y 395 (p. ej., el subsistema de la bomba 30 se puede diseñar para proporcionar la ratio correcta del flujo de refrigerante de reactor con el flujo de vapor de agua de turbina a plena potencia, pero puede ser deseable una ratio ligeramente diferente en funcionamiento con potencia más baja).

El subsistema de estabilización de moderador 525 puede incluir pasadizos 610, 630, 640 y 650, una válvula 615, un depósito 625, un condensador 635 y una bomba 645, que pueden ser cualesquiera elementos adecuados para trasferir vapor de agua (H₂O) y agua (H₂O).

45 El pasadizo 610 puede ser un pasadizo relativamente grande que puede conectar para transmisión de fluidos el área de vapor de agua 110 de la zona de reflector 95 con el depósito 625. La válvula 615 se puede disponer en el pasadizo 610. La válvula 615 puede estar en una posición de cierre, bloqueando sustancialmente el flujo de moderador de vapor de agua durante funcionamiento normal. Cuando la válvula 615 está abierta, el moderador de vapor de agua puede fluir al depósito 625 por medio del pasadizo 610. El depósito 625 puede ser un depósito de baja presión que puede ser mantenido a una presión que sea menor que una presión del área de vapor de agua 110 de la zona de reflector 95. El depósito 625 puede ser un área de almacenamiento relativamente grande y fría. Por ejemplo, el depósito 625 puede ser enfriado con una cantidad relativamente grande del agua (H₂O). Por ejemplo, el depósito 625 puede ser enfriado con agua (H₂O) del subsistema de vapor de agua de turbina 65. Al entrar al depósito 625 por medio del pasadizo 610, el moderador de vapor de agua puede expandirse y condensarse sobre superficies relativamente frías de las paredes interiores del depósito 625. Cuando la válvula 615 está abierta, el rápido flujo de vapor de moderador afuera del área de vapor de agua 110 de la zona de reflector 95 puede reducir la presión del moderador de vapor de agua en el área de vapor de agua 110 y la presión de moderador en la zona de reflector 95, permitiendo así el rápido flujo de moderador afuera de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b, reduciendo de ese modo la masa de moderador en las cavidades de control, reduciendo el número de neutrones térmicos (lentos) disponibles para provocar fisión, llevando así a una parada rápida del reactor 15.

El pasadizo 630 puede conectar para transmisión de fluidos el pasadizo 610 con el condensador 635. El pasadizo 630 puede ser un pasadizo relativamente pequeño. Por ejemplo, el pasadizo 630 puede ser una tubería que tiene un diámetro significativamente más pequeño que el pasadizo 610. El pasadizo 630 puede conectar para transmisión de fluidos el pasadizo 610 al condensador 635. El condensador 635 se puede disponer en contacto o adyacente al pasadizo 80, que puede transferir agua relativamente fría (H₂O), del subsistema de vapor de agua de turbina 65. El condensador 635 puede ser cualquier condensador adecuado para condensar moderador de vapor de agua hasta moderador líquido. El moderador de vapor de agua transferido desde el pasadizo 610 por medio del pasadizo 630 puede ser condensado hasta moderador líquido por el condensador 635. El pasadizo 640 puede conectar para transmisión de fluidos el condensador 635 con la bomba 645.

La bomba 645 puede bloquear selectivamente un flujo de moderador líquido condensado desde el pasadizo 640 al pasadizo 650. La bomba 645 también puede permitir selectivamente que el moderador líquido condensado fluya al pasadizo 650, y puede funcionar para presurizar el moderador líquido condensado para que fluya a través del pasadizo 650. El pasadizo 650 puede transferir moderador líquido condensado nuevamente adentro del reactor 15. Por ejemplo, el pasadizo 650 puede conectar para transmisión de fluidos el pasadizo 650 con una parte superior de la zona de reflector 95, p. ej., el área de vapor de agua 110. El moderador líquido condensado transferido al área de vapor de agua 110 por medio del pasadizo 650 puede provocar que se condense moderador de vapor de agua adicional en el área de vapor de agua 110. La zona de reflector 95 puede ser calentada por neutrones que escapan del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b, y se puede evaporar moderador en la zona de reflector 95 hasta moderador de vapor de agua en el área de vapor de agua 110. La bomba 645 puede funcionar para condensar el exceso de moderador de vapor de agua desde el área de vapor de agua 110 para mantener una presión estable en el área de vapor de agua 110 y la zona de reflector 95.

El subsistema de estabilización de refrigerante de reactor 530 puede incluir un depósito 655, un elemento de calentamiento 660 y un pasadizo 665. El depósito 655 puede ser un tanque de almacenamiento presurizado que puede almacenar refrigerante de reactor. El depósito 655 puede ser suministrado con refrigerante de reactor desde el subsistema de refrigerante de reactor 25 por medio del pasadizo 665 desde el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325. El depósito 655 puede incluir refrigerante líquido de reactor en una parte inferior y refrigerante gaseoso de reactor en una parte superior. El elemento de calentamiento 660 puede calentar selectivamente el depósito 655 para mantener el refrigerante de reactor almacenado dentro del depósito 655 a una temperatura y/o presión deseadas. El elemento de calentamiento 660 puede ser cualquier dispositivo adecuado para calentar selectivamente el depósito 655, tal como, por ejemplo, un calentador eléctrico. El refrigerante de reactor frío desde el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 puede ser bombeado selectivamente al depósito 655 por una bomba y una línea de suministro (no se muestra) desde el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320. Por ejemplo, la bomba (no se muestra) puede incluir un inyector que rocía refrigerante de reactor presurizado frío desde el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 a la parte superior (vapor de agua) del depósito 655. Por ejemplo, refrigerante de reactor relativamente frío puede ser rociado por la bomba (no se muestra) al depósito 655 para condensar una parte del refrigerante de reactor de vapor de agua en el depósito 655 para provocar que algo del refrigerante de reactor de vapor de agua se condense y de ese modo reducir una presión en el depósito 655 y el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325.

Como se ilustra en las figuras 15 y 20, el subsistema de flujo diferencial 535 puede incluir una pluralidad de pasadizos concéntricos 670 dispuestos en una parte 675 del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320. Los pasadizos concéntricos 670 pueden sustituir a la parte 675 del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, y se pueden conectar para transmisión de fluidos en ambos extremos de la parte 675 a las otras partes del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320. La parte 675 puede ser una parte ascendente del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 que se puede disponer aguas abajo de la bomba 390. Dentro del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 se puede disponer cualquier número adecuado de pasadizos concéntricos 670, tal como, por ejemplo, aproximadamente diez pasadizos concéntricos 670. Los pasadizos concéntricos 670 pueden ser, por ejemplo, tuberías de acero concéntricas. El área entre pasadizos concéntricos puede aumentar, moviéndose desde el pasadizo más interior 670 al pasadizo más exterior 670. Por ejemplo, un área A2 entre los pasadizos concéntricos primero y segundo 670 puede ser el doble de grande que el área A1 formada dentro del primer pasadizo concéntrico 670, un área A3 entre los pasadizos concéntricos cuarto y quinto 670 puede ser cinco veces más grande que el área A1 formada dentro del primer pasadizo concéntrico 670 y un área A4 entre los pasadizos concéntricos noveno y décimo 670 puede ser diez veces más grande que el área A1 formada dentro del primer pasadizo concéntrico 670. Partes de cada área entre cada pasadizo concéntrico sucesivo 670 pueden ser bloqueadas en cada extremo para mantener sustancialmente el mismo caudal adentro y afuera de cada uno de los pasadizos concéntricos 670. Los pasadizos concéntricos 670 pueden tardar de ese modo una cantidad de tiempo proporcionalmente más larga para transferir la misma cantidad de fluido en los pasadizos concéntricos exteriores respecto a los pasadizos concéntricos interiores, y por lo tanto se pueden mitigar cambios rápidos de temperatura en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320.

Aplicabilidad industrial

En al menos algunas disposiciones ejemplares del sistema de reactor nuclear descrito, se usa un método de control de reactor que tiene cavidades de control que encierran un moderador en un núcleo de un reactor. En al menos algunas disposiciones ejemplares, el moderador en el reactor se divide en tres áreas: un área de núcleo que se puede disponer en cualquier lugar en el reactor a menos de aproximadamente 0,3 m (1 pie = 0,3 m) desde cualquier parte

de una fuente de combustible, una zona de reflector que puede incluir cualquier moderador fuera del área de núcleo pero a menos de 91,5 a 121,9 cm (tres o cuatro pies) de cualquier parte de una fuente de combustible y una piscina de moderador que puede incluir cualquier moderador fuera del área de núcleo y la zona de reflector. Una función del moderador en el área de núcleo es ralentizar los neutrones a alta velocidad emitidos por la fisión de combustible a velocidades relativamente lentas a las que los neutrones son mucho más propensos a provocar nuevas fisiones. Una función del moderador en la zona de reflector es reflejar neutrones que escapan del área de núcleo nuevamente adentro del núcleo para disminuir el número de neutrones que se pierden del reactor. El moderador en la piscina de moderador puede tener poco efecto sobre el reactor (p. ej., el moderador puede ir a la piscina de moderador cuando es desplazado desde las cavidades de control de moderador de núcleo o puede salir de la piscina de moderador cuando el moderador retorna al núcleo). En al menos algunas disposiciones ejemplares, las cavidades de control descritas pueden encerrar la mayoría del moderador en el área de núcleo de reactor, y están cerradas en la parte superior pero se permite el libre movimiento de moderador entre la parte inferior de la cavidad de control y el reflector y áreas de piscina de moderador.

En al menos algunas disposiciones ejemplares del sistema de reactor nuclear descrito, cuando el sistema de reactor nuclear descrito está produciendo potencia a una tasa constante, el combustible está en un estado de equilibrio nuclear y las cavidades de control están en un estado de equilibrio térmico. Los dos estados de equilibrio se acoplan por realimentación negativa de manera que cualquier cambio desde el equilibrio en uno provoca un cambio en el equilibrio del otro, lo que actuará para contrarrestar el cambio en el primero. Las cavidades de control descritas se proporcionan con un sistema de enfriamiento de moderador que enfría las cavidades de control a aproximadamente la misma tasa (o proporcional al volumen de cada cavidad de control si las cavidades de control no tienen todas el mismo volumen) ya sea bombeando moderador frío adentro de las cavidades de control, que se mezcla con el moderador más caliente en la cavidad de control mientras una masa igual del moderador más caliente sale de la cavidad de control al reflector y áreas de piscina de moderador, o pasando fluido más frío a través de uno o más tubos en la cavidad de control que entonces enfría la cavidad de control por conducción. A la cavidad de control entra calor por conducción térmica desde los tubos de combustible caliente y por energía depositada en el moderador por neutrones rápidos y radiación gamma desde el combustible. Cuando entra más calor a la cavidad de control que el que deja la cavidad de control, el moderador líquido en la cavidad se evapora y sube a una burbuja de vapor de agua en la parte superior de la cavidad de control, mientras desplaza moderador líquido afuera de la parte inferior de la cavidad de control y reduce la masa total de moderador en el núcleo de reactor porque el vapor de agua puede ser mucho menos denso que el moderador líquido. Cuando entra menos calor a la cavidad que el extraído por el sistema de enfriamiento de moderador, algo del vapor de agua en la burbuja de vapor de agua se condensa, reduciendo el tamaño de la burbuja de vapor de agua y atrayendo moderador líquido adentro de la cavidad desde la zona de reflector y piscina de moderador, aumentando de ese modo la masa total de moderador en el núcleo.

En al menos algunas disposiciones ejemplares del sistema de reactor nuclear descrito, se emiten neutrones a alta velocidad con cada fisión de un átomo en el combustible. La mayoría de estos neutrones a alta velocidad escapan del combustible al moderador (junto con radiación gamma emitida por el combustible) y son ralentizados por colisiones con el moderador. Estos neutrones más lentos se difunden desde el moderador nuevamente al combustible. Aquí, algunos de los neutrones más lentos son absorbidos por los átomos fisionables en el combustible y provocan nuevas fisiones, algunos son absorbidos por los átomos fértiles en el combustible (p. ej., uranio 238, plutonio 240, y/o torio 232, si presente) y crean nuevos átomos de combustible fisionable, y algunos son absorbidos en el combustible sin provocar fisión o creación de nuevos átomos fisionables o pueden difundirse nuevamente en el moderador. La tasa de reacción es estable cuando, de media, exactamente un neutrón liberado por cada fisión provoca una nueva fisión. La probabilidad de que un neutrón que vuelve a entrar al combustible desde el moderador provoque una fisión disminuye cuando la velocidad es relativamente alta, y la probabilidad de que un neutrón cree combustible nuevo aumenta cuando la velocidad es relativamente alta. Neutrones que dejan el moderador tienen una velocidad media más alta cuando hay menos masa de moderador en la cavidad, y tiene una velocidad media más baja cuando hay más masa de moderador en la cavidad. Por consiguiente, conforme la burbuja de vapor de agua aumenta de tamaño (y por lo tanto disminuye la masa de moderador en la cavidad), la velocidad media de los neutrones que entran al combustible aumenta, lo que aumenta el número de neutrones que son desviados eficazmente para que no provoquen nuevas fisiones y disminuye el número de neutrones que son desviados a la producción de combustible nuevo fisionable. Este efecto baja la tasa de fisión, reduciendo la energía transferida al moderador, reduciendo el tamaño de la burbuja de vapor de agua, y proporcionando de ese modo realimentación negativa que mantiene un tamaño estable de la burbuja de vapor de agua y mantiene una tasa de fisión que es estable y aproximadamente proporcional a la tasa de enfriamiento de moderador.

Colectivamente, en al menos algunas disposiciones ejemplares del sistema de reactor nuclear descrito, las cavidades de control mantienen la salida de potencia total estable y proporcional a la tasa total de enfriamiento de moderador. La tasa de enfriamiento de moderador puede ser controlada manteniendo la temperatura de refrigerante de moderador relativamente constante y al variar la tasa de bombeo para controlar la tasa de enfriamiento total. Individualmente, cada cavidad influye en la tasa de fisión del combustible cerca de ella, lo que provoca que la tasa de reacción sea casi la misma en todos los puntos en el reactor en lugar de más alta en el centro del núcleo y más baja cerca de los cantos del núcleo. Esto puede minimizar puntos calientes en el combustible y suprimir ondas de xenón, llevando a tasas deseables más altas de extracción de calor del combustible.

Durante funcionamiento de reactor normal en al menos algunas disposiciones ejemplares del sistema de reactor nuclear descrito, calor de los tubos de combustible es extraído por el refrigerante primario. Cuando se aumenta la tasa de reacción, también se aumenta la tasa de bombeo de refrigerante primario, de modo que la temperatura de los tubos de combustible no varía con la tasa de reacción. Bajo condiciones anormales, el flujo de refrigerante primario puede ser insuficiente y los tubos de combustible pueden calentarse más. En tales condiciones, puede haber más conducción de calor desde los tubos de combustible adentro de las cavidades de control, lo que puede aumentar la tasa de evaporación de moderador en las cavidades de control y aumentar el tamaño de las burbujas de vapor de agua en las cavidades de control. Esto puede provocar que moderador líquido sea desplazado desde el fondo de las cavidades, reduciendo la densidad media del moderador y aumentando la velocidad media de los neutrones que se difunden desde el moderador al combustible, y disminuyendo de ese modo la tasa de fisión.

En al menos algunas disposiciones ejemplares del sistema de reactor nuclear descrito, como la burbuja de vapor de agua en las cavidades de control es mucho menos densa que el moderador líquido en las cavidades de control y la burbuja de vapor de agua puede variar de tamaño desde sustancialmente no existente a casi el tamaño de la cavidad de control entera, el sistema puede permitir que la densidad media del moderador en el núcleo varíe desde la densidad total del moderador líquido a menos del 15 % de la densidad total. Esto permite el control del reactor bajo condiciones variables de reactividad de combustible que va de combustible nuevo enriquecido sin carga de xenón a combustible moderadamente usado con una carga de xenón en equilibrio a combustible con un alto agotamiento y consiguiente alta carga de subproductos de fisión absorbentes de neutrones. Esto puede lograrse sustancialmente sin pérdida de neutrones para controlar absorbentes y proporcionar sustancialmente máxima producción de nuevo combustible fisionable y un ratio de conversión de combustible sustancialmente máxima en todos los puntos en el ciclo de vida de combustible.

El sistema de reactor nuclear descrito puede ser utilizado en cualquier aplicación que use potencia de generación nuclear. Por ejemplo, el sistema de reactor nuclear descrito puede ser usado en cualquier aplicación que use vapor de agua (H₂O) generado usando potencia de una reacción nuclear. El funcionamiento descrito más adelante puede generalmente aplicarse a un funcionamiento de todas las disposiciones descritas del sistema de reactor nuclear 5. Adicionalmente, como se describe más adelante, algunos subsistemas del sistema de reactor nuclear descrito pueden ser usados en aplicaciones adicionales distintas a potencia de generación nuclear.

Haciendo referencia a la figura 3, un funcionamiento del sistema de reactor nuclear 5 puede ser iniciado cuando se proporciona combustible en el conjunto de combustible 125, 125', 125a o 125b que tiene tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b. Cuando se inicia el reactor 15 con combustible fresco en los tubos 135, 135', 135a y/o 135b, el nivel de moderador en la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b se estabiliza en el nivel de equilibrio basándose en el diseño de reactor y reactividad del combustible incluido en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b. En un periodo inicial (p. ej., unos pocos días), los niveles de xenón-135 y samario-149 absorbentes de neutrones suben a niveles de equilibrio, y la tasa de enfriamiento del moderador puede ser mantenida sustancialmente constante por un funcionamiento del subsistema de refrigerante de reactor 25 (el funcionamiento general del subsistema de refrigerante de reactor se describirá más en detalle a continuación). Mientras el subsistema de refrigerante de reactor 25 funciona para proporcionar una tasa de enfriamiento constante del moderador en la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b, subirá el nivel de xenón y samario en el combustible y caerá lentamente la reactividad del reactor 15 por debajo de uno, provocando que la tasa de reacción disminuya y la energía depositada en el moderador disminuya de modo que se condense parte del vapor de moderador. Por lo tanto, se extrae más moderador adentro de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b, lo que sube el nivel del moderador y la densidad media de moderador. Esto disminuirá el número de neutrones que experimentan captura por resonancia, y de ese modo se compensan los neutrones que son absorbidos por las cantidades gradualmente crecientes de xenón y samario absorbentes de neutrones en el combustible del reactor 15. Así, usando la distribución de cavidades de control 130 como ejemplo, se aumenta el tamaño de las zonas líquidas 190 y 275 en la distribución de cavidades de control 130, y se disminuye el tamaño de las zonas gaseosas 185 y 280 en la distribución de cavidades de control 130. Un efecto similar ocurre en las otras disposiciones descritas.

Si el reactor 15 tiene un ratio de conversión mayor que uno, o recibe fuel principalmente con U235 y U238, durante funcionamiento en estado constante puede haber un periodo de tiempo durante el que la reactividad del combustible puede aumentar ya sea porque se crea más combustible fisionable que el que es usado o porque se está creando Pu239 a partir de U238 conforme se quema U235 (porque el Pu239 es más reactivo que el U235). Si ocurre esto, la tasa de fisión subirá mientras el enfriamiento permanece constante, más neutrones depositarán energía en el moderador, la tasa de evaporación en las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b será mayor que la tasa de condensación, y el moderador líquido será desplazado de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b por el exceso de moderador de vapor de agua. Esto provoca menos moderación de los neutrones y un aumento en el número de neutrones absorbidos en la U238 (o Th232) fértil, disminuye el número de neutrones térmicos disponibles para provocar fisión y reducir la tasa de reacción a la tasa donde se deposita tanta energía en las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b como es retirada por el subsistema de refrigerante de reactor 25. El nivel de moderador líquido disminuirá gradualmente siempre que suba la reactividad del combustible continúa (p. ej., en un periodo que puede durar de días a años). Durante este periodo, el contenido fisionable del combustible puede aumentar, y puede continuar aumentando al siguiente periodo de tiempo (tratado más adelante).

En el siguiente periodo de tiempo (p. ej., los siguientes pocos meses o años), conforme disminuye por agotamiento el contenido fisión del combustible y sube el nivel de subproductos de fisión absorbentes de neutrones, el mecanismo de realimentación negativa de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b funciona para provocar que el nivel de moderador en la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b suba muy lentamente para compensar la reactividad del combustible que disminuye por agotamiento. Finalmente, el nivel de moderador subirá a la parte superior de la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b, y el reactor 15 se volverá subcrítico y dejará de producir potencia. Así, usando la distribución de cavidades de control 130 como ejemplo, en este momento sustancialmente no habrá zonas gaseosas 185 y 280 en la distribución de cavidades de control 130. Un efecto similar ocurre en las otras disposiciones descritas. Cuando el reactor 15 se para, el xenón-135 que ha sido producido hasta ahora por el reactor 15 continúa degradándose, de modo que en un periodo de tiempo relativamente breve (p. ej., uno o dos días), degradará suficiente xenón-135 de modo que el reactor 15 se pueda reiniciar de nuevo. Cuando se reinicia el reactor 15, el reactor 15 puede funcionar hasta que la concentración de xenón-135 sube de nuevo en un periodo de tiempo relativamente corto (p. ej., unos pocos días). Como la concentración de equilibrio de xenón-135 cambia proporcionalmente al nivel de potencia, el funcionamiento del reactor 15 puede continuar duraciones relativamente más largas conforme se reduce el nivel de potencia del reactor 15.

Tras el procedimiento de iniciación descrito anteriormente, el reactor 15 puede ser mantenido en un funcionamiento de estado estable. En el funcionamiento de estado estable, se produce energía por fisión de átomos de combustible en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b. La mayoría de esta energía es depositada en las varillas de combustible dispuestas en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b como calor, que es extraído de las varillas de combustible de los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b por un flujo de refrigerante de reactor a través de los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b que es proporcionado por un funcionamiento del subsistema de refrigerante de reactor 25 y el subsistema de la bomba 30. Antes de continuar con la descripción del funcionamiento de estado estable del reactor 15 y el núcleo de reactor 100, se describirá el funcionamiento del subsistema de refrigerante de reactor 25 y el subsistema de la bomba 30.

Haciendo referencia a las figuras 2, 3 y 13, el subsistema de transferencia 305 del subsistema de refrigerante de reactor 25 transfiere refrigerante de reactor entre el intercambiador de calor 20 y el núcleo de reactor 100, 100', 100a o 100b. La bomba de refrigerante 390 del subsistema de la bomba 30 puede presurizar un flujo de refrigerante de reactor en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 del subsistema de transferencia 305 para transferir refrigerante de reactor frío desde el intercambiador de calor 20 al reactor 15. El refrigerante de reactor frío que fluye en el pasadizo 320 puede de ese modo fluir a través de aberturas de la estructura de contención 85 y a la zona de reflector 95.

El refrigerante de reactor frío que fluye en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 puede fluir a los pasadizos 330 del subsistema de refrigerante de combustible 310. El refrigerante de reactor frío que fluye en los pasadizos 330 atraviesa los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b para facilitar el intercambio de calor con los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b. Los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b imparten calor por medio de transferencia de calor al refrigerante de reactor frío que fluye a través de los pasadizos 330, cambiando de ese modo el refrigerante de reactor frío a refrigerante de reactor caliente. Así, el refrigerante de reactor deja los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b con más energía por kilogramo (libra) que el refrigerante de reactor tenía cuando entró a los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b, ya sea aumentando la temperatura del refrigerante de reactor o cambiando el refrigerante de reactor de un estado líquido a un gaseoso, o ambos. Los pasadizos 330 pueden entonces transferir el refrigerante de reactor caliente al pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de transferencia 305.

En la primera disposición descrita, algo del refrigerante de reactor frío que fluye en el pasadizo de refrigerante de reactor fríos 330 también fluye a los pasadizos 335 del subsistema de refrigerante de moderador 315. El refrigerante de reactor frío que fluye en los pasadizos 335 atraviesa las cavidades de control 140 para facilitar el intercambio de calor con las cavidades de control 140. El refrigerante de reactor frío que fluye en el pasadizo 335 es calentado en cierto modo por intercambio de calor por moderador confinado dentro de las cavidades de control 140, y es transferido afuera de las cavidades de control 140 por medio de los pasadizos 335 y nuevamente adentro de los pasadizos 330. El refrigerante de reactor frío que fluye en los pasadizos 330 atraviesa la piscina reflectante 105. El refrigerante de reactor frío que fluye a través de los pasadizos 330 es calentado en cierto modo por intercambio de calor por el moderador de la piscina reflectante 105. El refrigerante de reactor que fluye en los pasadizos 330 puede entonces atravesar los tubos de combustible 135 y de ese modo ser calentado desde refrigerante de reactor frío a refrigerante de reactor caliente. Los pasadizos 330 pueden entonces transferir el refrigerante de reactor caliente al pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de transferencia 305.

El refrigerante de reactor que fluye a través del pasadizo 335 del subsistema de refrigerante de moderador 315 puede fluir, por ejemplo, en la disposición representada en la figura 14. El refrigerante de reactor desde el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 del subsistema de transferencia 305 puede fluir al pasadizo 335 por medio del pasadizo intermedio 330 y el miembro de entrada 350. El refrigerante de reactor fluye entonces a través del canal 380 del miembro interior 355. Algo del refrigerante de reactor puede fluir a lo largo de una longitud completa del canal 380 hasta llegar a la parte extrema 370. Sin embargo, algo del refrigerante de reactor puede fluir también directamente desde el canal 380 al canal 385, por medio de las aberturas 375, antes de llegar a la parte extrema 370. Como algo del refrigerante de reactor relativamente frío pasa directamente al canal 385 por medio de las aberturas 375, y se

mezcla con el refrigerante de reactor relativamente caliente en el canal 385, una temperatura del refrigerante de reactor en el canal 385 puede permanecer relativamente constante a lo largo de la longitud del pasadizo 335. Tamaños y/o espaciamentos de las aberturas 375 se pueden diseñar para maximizar el mantenimiento de una temperatura generalmente constante en el canal 385. Por ejemplo, la cantidad de mezcla de refrigerante de reactor entre los canales 380 y 385 puede aumentar en una dirección moviéndose hacia la parte extrema 370. El refrigerante de reactor fluye entonces a través del canal 385, y nuevamente adentro del pasadizo de refrigerante de reactor 330 del subsistema de transferencia 305, por medio del miembro de salida 365.

La bomba de refrigerante 390 del subsistema de la bomba 30 puede presurizar un flujo de refrigerante de reactor frío en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 del subsistema de transferencia 305 a través de los tubos de combustible 135 y un flujo de refrigerante de reactor caliente desde el reactor 15 nuevamente al intercambiador de calor 20 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325.

La fisión del combustible en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b produce neutrones energéticos a velocidad más alta (p. ej., neutrones desplazándose en una velocidad relativamente intermedia o alta). Estos neutrones energéticos de velocidad más alta depositan energía en el moderador de la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b por colisión con átomos de moderador. Los neutrones energéticos de velocidad más alta son ralentizados a un estado de energía baja ("neutrones lentos") por estas colisiones con átomos de moderador, y algunos de los neutrones lentos provocan entonces fisión de los átomos de combustible. El reactor es considerado estable (p. ej., en una producción constante de potencia) cuando, para cada fisión de un átomo de combustible, uno de los neutrones producido provoca una nueva fisión. Así, el reactor es considerado estable cuando, de media, exactamente uno de los neutrones producido por la fisión de un átomo de combustible provoca una nueva fisión.

Conforme el moderador en distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b es calentado por neutrones energéticos, algo del moderador puede evaporarse hasta moderador de vapor de agua (p. ej., hervir hasta un estado gaseoso). El moderador de vapor de agua en el estado gaseoso es menos denso que el moderador líquido (p. ej., en un estado líquido) y subirá a la parte superior de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b en las que es confinado porque las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b están cerradas en una parte superior y por lo tanto confinan el moderador en una parte superior. Como los volúmenes de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b son constantes, moderador de vapor de agua gaseoso de baja densidad que es confinado y que se acumula en las partes superiores de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b desplazará moderador líquido de densidad más alta afuera de las partes más bajas de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b. Así, se reduce la densidad media total del moderador en las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b. Para mantener sustancialmente todo el moderador en las cavidades de control 140, 140' y 140a para que no se vuelva moderador de vapor de agua, las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b son enfriadas por el subsistema de refrigerante de reactor 25. El subsistema de refrigerante de reactor 25 provoca que algo del moderador de vapor de agua gaseoso se condense hasta el moderador líquido más denso. Por lo tanto se confinará menos moderador de vapor de agua en las partes superiores de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b, por lo que se desplazará moderador líquido con densidad relativamente menos alta afuera de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b. Por consiguiente, el moderador líquido fluirá nuevamente adentro de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b a través de las partes más bajas abiertas y/o partes laterales de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b.

Haciendo referencia a las figuras 7 y 8 y usando la distribución de cavidades de control 130 como ejemplo, el subsistema de refrigerante de reactor 25 puede eliminar menos energía por transferencia de calor del moderador confinado en la distribución de cavidades de control 130. Por consiguiente, una cantidad creciente de moderador será calentada por neutrones energéticos hasta moderador de vapor de agua. Así, como hay una cantidad creciente de moderador de vapor de agua confinada y se acumula en partes superiores de las cavidades de control 140, la frontera 195 caerá conforme una cantidad creciente de moderador líquido sea desplazada afuera de las cavidades de control 140 (p. ej., desplazada bajo el miembro intermedio 170 y el miembro extremo 165). Así, la zona gaseosa 185 aumentará de tamaño, y las zonas líquidas 190 disminuirán de tamaño. De manera similar en el conjunto de cono 150, como el subsistema de refrigerante de reactor 25 retira menos energía por transferencia de calor, una cantidad creciente de moderador de vapor de agua es confinada y se acumula en partes superiores de los conjuntos de cono interior 200 y los conjuntos de cono exterior 205. Así, la frontera 290 caerá conforme una cantidad creciente de moderador líquido sea desplazada afuera de los conjuntos de cono interior 200 y los conjuntos de cono exterior 205 (p. ej., desplazada bajo el cono interior 235 y el cono exterior 240). Así, la zona gaseosa 280 aumentará de tamaño, y las zonas líquidas 190 y 275 disminuirán de tamaño. Un efecto similar ocurre en las otras disposiciones descritas del reactor 15.

También ocurre el efecto contrario. De nuevo usando la distribución de cavidades de control 130 como ejemplo, el subsistema de refrigerante de reactor 25 puede retirar más energía por transferencia de calor del moderador confinado en la distribución de cavidades de control 130. Por consiguiente, una cantidad decreciente de moderador será calentada por neutrones energéticos hasta moderador de vapor de agua. Así, como una cantidad decreciente de moderador de vapor de agua es confinada y se acumula en partes superiores de las cavidades de control 140, la frontera 195 subirá conforme moderador líquido vuelva a entrar en las cavidades de control 140 (p. ej., volver a entrar bajo el miembro intermedio 170 y el miembro extremo 165). Así, la zona gaseosa 185 disminuirá de tamaño, y la zona líquida 190 aumentará de tamaño. De manera similar en el conjunto de cono 150, conforme el subsistema de refrigerante de reactor 25 retira más energía por transferencia de calor, una cantidad decreciente de moderador de

vapor de agua es confinada y se acumula en partes superiores de los conjuntos de cono interior 200 y los conjuntos de cono exterior 205. Así, la frontera 290 subirá conforme una cantidad creciente de moderador líquido vuelve a entrar en los conjuntos de cono interior 200 y los conjuntos de cono exterior 205 (p. ej., volver a entrar bajo el cono interior 235 y el cono exterior 240). Así, la zona gaseosa 280 disminuirá de tamaño, y las zonas líquidas 190 y 275 aumentarán de tamaño. También se puede condensar moderador de vapor de agua a lo largo de los lados de las cavidades de control 140 y gotear nuevamente adentro de las zonas líquidas 190 y 275. Un efecto similar ocurre en las otras disposiciones descritas del reactor 15.

Cuando el subsistema de refrigerante de reactor 25 funciona para extraer sustancialmente tanta energía de las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b como es depositada desde el combustible en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b, la tasa de evaporación y la tasa de condensación en las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b serán sustancialmente iguales, y el tamaño de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b permanecerá sustancialmente constante. Así, sustancialmente no habrá movimiento de moderador adentro o afuera de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b.

Los neutrones de velocidad más alta pueden ser ralentizados por colisiones con átomos de moderador cuando los átomos de moderador están ya sea en el estado líquido (líquido moderador) o el estado gaseoso (moderador de vapor de agua). Cuando se disminuye la densidad media del moderador (p. ej., aumentando un tamaño de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b), se aumenta una distancia media entre átomos de moderador y se aumenta una distancia media que deben trasladarse los neutrones entre colisiones. Cuando los neutrones de velocidad más alta se trasladan aún más entre cada colisión, emplean más tiempo en las velocidades más altas y así el número medio de neutrones que se trasladan en velocidades relativamente altas e intermedias es mayor. Si bien los neutrones lentos pueden tener una probabilidad relativamente alta de provocar fisión cuando colisionan con átomos de combustible dispuestos en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b, los neutrones de velocidad más alta pueden tener una probabilidad relativamente más alta de ser absorbidos dentro del reactor 15 sin provocar fisión. Por consiguiente, disminuirá el número de neutrones lentos disponibles para provocar fisión.

Cuando el reactor 15 funciona en un nivel de funcionamiento de estado estable, el subsistema de refrigerante de reactor 25 funciona para mantener las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b en un tamaño deseado sustancialmente constante. Este tamaño deseado de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b proporciona una densidad deseada de moderador dentro de la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b de modo que justo bastantes neutrones de velocidad más alta serán absorbidos a velocidades intermedias y altas de modo que haya una cantidad deseada de neutrones lentos restantes que se trasladan en velocidades relativamente lentas para provocar una nueva fisión para cada fisión antigua en los conjuntos de combustible 125, 125', 125a y 125b.

Las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b se pueden mantener en un tamaño deseado sustancialmente constante usando realimentación negativa. Como se ha descrito anteriormente, el subsistema de refrigerante de reactor 25 puede ser controlado que hacer coincidir sustancialmente la tasa de enfriamiento del núcleo de reactor 100, 100', 100a y 100b (p. ej., controlando el flujo de refrigerante a través de distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b) con la tasa de fisión (y de ese modo la tasa de calentamiento del calor impartido al moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b por fisión en los conjuntos de combustible 125, 125', 125a y 125b) del núcleo de reactor 100, 100', 100a y 100b. Si la tasa de calentamiento del calor impartido a distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y 130b por fisión en el conjunto de combustible 125, 125', 125a y 125b es mayor que la tasa de enfriamiento proporcionada por el subsistema de refrigerante de reactor 25, las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b se expandirán. La expansión de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b disminuye la densidad media del moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b, lo que aumenta el porcentaje de neutrones perdidos por absorción a velocidades intermedias y altas (captura de resonancia), disminuyendo así el porcentaje de neutrones lentos disponibles para provocar fisión, lo que disminuye la tasa de calentamiento del reactor 15. Si la tasa de calentamiento es más baja que la tasa de enfriamiento, las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b se encogerán, aumentando la densidad media del moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b, disminuyendo el porcentaje de neutrones perdidos por captura de resonancia, aumentando así el porcentaje de neutrones lentos disponibles para provocar fisión, lo que aumenta la tasa de calentamiento. Así, el reactor 15 es controlado para provocar que la tasa de reacción siga la tasa de enfriamiento de la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b por el subsistema de refrigerante de reactor 25. Por consiguiente, aumentar o disminuir la tasa de enfriamiento de la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b provocará un correspondiente aumento o disminución en la salida de potencia total del reactor 15. Como la cantidad de energía depositada en el moderador puede ser únicamente un pequeño porcentaje (p. ej., entre aproximadamente el 1 % y aproximadamente el 5 %, tal como, por ejemplo, aproximadamente el 3 %) de la energía total producida por el reactor 15, únicamente una cantidad de energía relativamente pequeña (y calor correspondiente) de la energía total producida por el reactor 15 es ajustada mediante una tasa de enfriamiento relativamente pequeña (respecto a la energía total producida por el reactor 15) para mantener el control del reactor 15. Así, controlar una tasa de enfriamiento relativamente pequeña permite un control simple y estable de una salida de potencia total del reactor 15 que es, por ejemplo, aproximadamente 30 veces mayor que la cantidad de calor y energía que es impartida al moderador (y que es controlado ajustando la tasa de enfriamiento).

Solamente para ilustrar una comparación entre una salida de potencia total relativamente grande del reactor 15 y la

- cantidad de energía relativamente pequeña impartida a un moderador, se puede considerar un ejemplo de un reactor para alimentar un generador eléctrico de 1000 Megavatios de potencia. La energía total producida por el generador de potencia ejemplar puede ser aproximadamente 10.550.559.960 kvatios (10.000.000.000 BTU/hora) cuando el generador está funcionando a plena potencia. Si el moderador es agua pesada (D₂O) a una temperatura de alrededor de 282 °C (540 grados Fahrenheit), el núcleo de reactor puede contener, por ejemplo, alrededor de 100 toneladas de moderador. Asumiendo que el 3 % de la energía total producida por el reactor se deposita en el moderador de núcleo, entonces la cantidad de energía impartida al moderador es alrededor de 316.516.800 kvatios (300.000.000 BTU/hora) o 1.500 BTU/hora por 0,453 kg (1 libra) de moderador. Con esta tasa, incluso si no se proporcionara enfriamiento, se tardarían aproximadamente 25 minutos en hervir cada 0,453 kg (1 libra) de moderador. Como el moderador de vapor de agua gaseoso es aproximadamente 20 veces menos denso que el moderador líquido a esta temperatura ejemplar, se tardaría aproximadamente un minuto en hervir suficiente moderador para desplazar el resto de los 0,453 kg (1 libra) de moderador líquido de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b en este ejemplo. Este ejemplo se proporciona puramente para mostrar la cantidad de energía relativa impartida al moderador. El método y el aparato descritos pueden ser usados en cualquier tipo o tamaño de sistema de reactor nuclear.
- El reactor 15 puede proporcionar energía a partir de una reacción nuclear al subsistema de generación de potencia 10 en cualquier momento adecuado durante su funcionamiento. Ahora se proporcionará un ejemplo de cómo el reactor 15 alimenta el subsistema de generación de potencia 10, usando funcionamiento de estado estable como ejemplo ilustrativo. El reactor 15 también puede alimentar de manera similar al subsistema de generación 10 durante otras fases y estados funcionamiento del sistema de reactor nuclear 5.
- Haciendo referencia a las figuras 1 y 13, la bomba de refrigerante 390 presuriza un flujo de refrigerante de reactor a través del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 y el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de refrigerante de reactor 25. El subsistema de refrigerante de reactor 25 de ese modo transporta refrigerante de reactor caliente a los generadores de vapor de agua dispuestos en el intercambiador de calor 20 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325. El refrigerante de reactor caliente que fluye a través de los tubos de generador de vapor de agua hierve agua (H₂O), que fue entregada al intercambiador de calor 20 por el subsistema de vapor de agua de turbina 65 (como se explica adicionalmente más adelante), por medio de transferencia de calor. Mientras pasa a través del intercambiador de calor 20, el refrigerante de reactor que fluye a través del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 es enfriado a través de transferencia de calor entre el refrigerante de reactor y agua (H₂O) en el intercambiador de calor 20. El refrigerante de reactor enfriado es entonces posteriormente devuelto al reactor 15 por medio de refrigerante pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 del subsistema de refrigerante de reactor 25. El subsistema de refrigerante de reactor 25 repite continuamente este ciclo, transfiriendo una cantidad deseada de refrigerante de reactor caliente, que ha sido calentado por el reactor 15, al intercambiador de calor 20 y entonces posteriormente devuelve el refrigerante de reactor enfriado al reactor 15. El vapor de agua a alta presión (H₂O) generado por los generadores de vapor de agua del intercambiador de calor 20 es entonces trasferido a la turbina 45 por medio del pasadizo 70 del subsistema de vapor de agua de turbina 65 (del subsistema de generación de potencia 10), basándose en un flujo de vapor de agua (H₂O) y agua (H₂O) producido por la bomba de H₂O 395. La bomba de H₂O 395 presuriza un flujo de vapor de agua (H₂O) y agua (H₂O) en el intercambiador de calor 20, el pasadizo 70, los pasadizos de la turbina 45, el pasadizo 75, el subsistema de enfriamiento de turbina 60 y el pasadizo 80.
- La turbina 45 convierte el vapor de agua a alta presión (H₂O) que es entregado por el pasadizo 70 del subsistema de vapor de agua de turbina 65 en energía mecánica. Por ejemplo, el vapor de agua (H₂O) obliga a la pluralidad de elementos montados en el árbol rotatorio ejemplar de la turbina 45 descrito anteriormente, y se expande a través de la serie de cilindros ejemplares descritos anteriormente para impulsar el árbol de la turbina 45. Este funcionamiento de la turbina 45 meramente ilustra uno de cualesquiera métodos adecuados para producir energía mecánica a partir de vapor de agua (H₂O). La energía mecánica del árbol ejemplar de la turbina 45 es entonces trasferida mecánicamente para impulsar el conjunto 50 del subsistema de generación de potencia 10.
- El conjunto de impulsión 50 transfiere entonces mecánicamente la energía mecánica impartida al generador 55 del subsistema de generación de potencia 10 por medio del conjunto de árbol de impulsión ejemplar descrito anteriormente o por medio de cualquier otra conexión mecánica adecuada. El conjunto de impulsión 50 puede de ese modo impulsar el generador 55 para producir electricidad. Como ejemplo, el generador 55 genera electricidad de CA en cualquier frecuencia adecuada tal como, por ejemplo, potencia a 50 Hz (50 ciclos) o 60 Hz (60 ciclos). La electricidad del generador 55 es proporcionada entonces por medio de técnicas de transferencia convencionales a una red de energía eléctrica o cualquier otro emplazamiento o actividad que use electricidad.
- El pasadizo 75 del subsistema de vapor de agua de turbina 65 transfiere vapor de agua (H₂O) sobrante o de escape a la turbina 45 al subsistema de enfriamiento de turbina 60 del subsistema de generación de potencia 10. El subsistema de enfriamiento de turbina 60 usa cualquier técnica adecuada tal como, por ejemplo, usar condensadores, torres de enfriamiento, flujo de aire forzado y/o enfriamiento una vez a través para condensar el vapor de agua (H₂O) hasta agua (H₂O). El agua relativamente fría (H₂O) es entonces trasferida desde el subsistema de enfriamiento de turbina 60 al intercambiador de calor 20 por medio del pasadizo 80.
- El agua relativamente fría (H₂O) entregada al intercambiador de calor 20 por medio del pasadizo 80 del subsistema de vapor de agua de turbina 65 entra al intercambiador de calor 20. Algo del agua relativamente fría (H₂O) entra a la

parte interior más baja del intercambiador de calor 20 y algo del agua relativamente fría (H₂O) entra al intercambiador de calor 20 en la parte central y/o superior del intercambiador de calor 20. El agua relativamente fría (H₂O) que entra a la parte interior más baja es calentada y es hervida por transferencia de calor con el refrigerante de reactor caliente transferido al intercambiador de calor 20 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 del subsistema de refrigerante de reactor 25. El agua relativamente fría (H₂O) que entra a la parte superior es inyectada a la parte interior más baja del intercambiador de calor 20 por medio de la pluralidad de toberas 83 dispuestas en la parte central y/o superior del intercambiador de calor 20, en las paredes interiores del intercambiador de calor 20. La pluralidad de toberas 83 inyectan el agua (H₂O) al agua en ebullición (H₂O) ya contenida dentro de la parte interior del intercambiador de calor 20. El agua relativamente fría (H₂O) se mezcla con el agua en ebullición (H₂O) para ayudar a reducir la magnitud de la gradiente de temperatura de H₂O contenido dentro del intercambiador de calor 20. La ilustración ejemplar anterior de transferencia de agua (H₂O) al intercambiador de calor 20 se proporciona meramente como ejemplo, y en el intercambiador de calor 20 se puede usar cualquier técnica conocida adecuada para intercambio de calor.

El proceso descrito anteriormente para usar energía de una reacción nuclear en el reactor 15 para producir vapor de agua (H₂O) en el intercambiador de calor 20, usando el vapor de agua (H₂O) para impulsar la turbina 45, e impulsar el generador 55 por la turbina 45 se repite continuamente para producir una cantidad deseada de electricidad. De manera similar, el proceso para condensar vapor de agua (H₂O) hasta agua (H₂O) y devolver el agua (H₂O) al intercambiador de calor 20 se repite continuamente según se desee. Así, este proceso se repite continuamente según se desee conforme el reactor 15 alimenta el subsistema de generación de potencia 10 para producir energía tal como, por ejemplo, electricidad.

Como el sistema de reactor nuclear funciona en un funcionamiento de estado estable, las demandas de potencia pueden fluctuar. Las demandas de potencia pueden fluctuar diariamente. Dependiendo del momento del día o durante la noche, demandas promedio de potencia pueden cambiar (p. ej., las demandas de potencia pueden ser más bajas a mitad de la noche en un noche de semana en comparación con durante una mañana de un día de la semana o una noche durante el fin de semana). El controlador 540 del subsistema de control de reactor 40 puede funcionar para variar una salida de potencia del sistema de reactor nuclear 5. El controlador 540 puede funcionar para controlar el subsistema de control de reactor 40 y el subsistema de la bomba 30 para variar una tasa de enfriamiento de refrigerante de reactor y/o el refrigerante de moderador en el reactor 15, variando de ese modo una salida de potencia del sistema de reactor nuclear 5 usando realimentación negativa.

Cuando se desea que el sistema de reactor nuclear 5 genere una mayor cantidad de potencia, el controlador 540 funciona para controlar el subsistema de control de reactor 40 y el subsistema de la bomba 30 para aumentar una tasa de enfriamiento de moderador en el reactor 15 de modo que la tasa de enfriamiento de moderador es mayor que la tasa de calentamiento del moderador por los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b. El controlador 540 controla la bomba de refrigerante 390 para provocar que una cantidad relativamente mayor de refrigerante de reactor fluya a través del reactor 15. Si la tasa de enfriamiento proporcionada por el subsistema de refrigerante de reactor 25 al moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b es mayor que la tasa de calentamiento del calor impartida al moderador en la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b por fisión en el conjunto de combustible 125, 125', y 125a, las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b se encogerán. El encogimiento de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b aumenta la densidad media del moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b, lo que disminuye el porcentaje de neutrones perdidos por captura de resonancia, aumentando así el porcentaje de neutrones lentos disponibles para provocar fisión, y aumentando la tasa de calentamiento del reactor 15. Al aumentar la tasa de calentamiento del reactor 15, se impartirá una mayor cantidad de calor al refrigerante de reactor que fluye en el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 y por lo tanto una mayor cantidad de calor será transferida por el subsistema de refrigerante de reactor 25 al intercambiador de calor 20. El intercambiador de calor 20 de ese modo producirá una mayor cantidad de vapor de agua (H₂O) y una mayor cantidad de vapor de agua (H₂O) será transferida desde el intercambiador de calor 20 a la turbina 45 por medio del pasadizo 70. El controlador 540 también funciona para provocar que la bomba de H₂O 395 provoque que un mayor flujo de vapor de agua (H₂O) sea transferido a la turbina 45. La mayor cantidad de vapor de agua (H₂O) provocará que la turbina 45 produzca una mayor cantidad de energía mecánica, que cuando sea transferida desde la turbina 45 al generador 55 por medio del conjunto de impulsión 50, provocará que el generador 55 produzca una cantidad relativamente mayor de potencia (p. ej., electricidad).

Cuando se desea que el sistema de reactor nuclear 5 genere una menor cantidad de potencia, el controlador 540 funciona para controlar el subsistema de control de reactor 40 y el subsistema de la bomba 30 para disminuir una tasa de enfriamiento de moderador en el reactor 15 de modo que la tasa de enfriamiento de moderador es menor que la tasa de calentamiento del moderador por los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b. El controlador 540 controla la bomba de refrigerante 390 para provocar que una cantidad relativamente menor de refrigerante de reactor fluya a través del reactor 15. Si la tasa de enfriamiento proporcionada por el subsistema de refrigerante de reactor 25 al moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b es menor que la tasa de calentamiento del calor impartida al moderador en la distribución de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b por fisión en el conjunto de combustible 125, 125', y 125a, las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b se expandirán. La expansión de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b disminuye la densidad media del moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b, lo que aumenta el porcentaje de

neutrones perdidos por captura de resonancia, disminuyendo así el porcentaje de neutrones lentos disponibles para provocar fisión, y disminuyendo la tasa de calentamiento del reactor 15. Al disminuir la tasa de calentamiento del reactor 15, se impartirá una menor cantidad de calor al refrigerante de reactor que fluye en el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 y por lo tanto una menor cantidad de calor será transferida por el subsistema de refrigerante de reactor 25 al intercambiador de calor 20. El intercambiador de calor 20 producirá de ese modo una menor cantidad de vapor de agua (H₂O) y una menor cantidad de vapor de agua (H₂O) será transferida desde el intercambiador de calor 20 a la turbina 45 por medio del pasadizo 70. El controlador 540 también funciona para provocar que la bomba de H₂O 395 provoque que un menor flujo de vapor de agua (H₂O) sea transferido a la turbina 45. La menor cantidad de vapor de agua (H₂O) provocará que la turbina 45 produzca una menor cantidad de energía mecánica, que cuando sea transferida desde la turbina 45 al generador 55 por medio del conjunto de impulsión 50, provocará que el generador 55 produzca una cantidad relativamente menor de potencia (p. ej., electricidad).

El encogimiento y/o la expansión de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b puede ser muy gradual y/o ligera y todavía proporcionar suficiente control del sistema de reactor nuclear 5. Así, incluso un pequeño cambio en el volumen de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 280 y/o 185b puede proporcionar una gran diferencia suficiente para afectar a la captura de resonancia y para controlar suficientemente el reactor 15 por realimentación negativa.

El funcionamiento del núcleo de reactor 100b generalmente sigue el funcionamiento de los núcleos de reactor 100, 100', y 100a descritos anteriormente. Como se representa en las figuras 12I, 12J y 12K, el reactor 100b proporciona rasgos adicionales para confinar moderador en la distribución de cavidades de control 130b que puede ser usado con, por ejemplo, un porcentaje más alto de fisión rápida.

Como se ilustra en las figuras 12I, 12J y 12K, moderador relativamente frío es libre para moverse desde la piscina reflectante 105 y al tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b. El moderador dispuesto en el tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b es entonces libre para moverse adentro de las cavidades de control 140b por medio de los orificios 336b, enfriando de ese modo moderador en las cavidades de control 140b. Un volumen sustancialmente igual de moderador más caliente sale de la cavidad de control 140b y al tubo de flujo saliente de moderador 337b por medio de los orificios 338b. El moderador en el tubo de flujo saliente de moderador 337b es libre para moverse desde el tubo de flujo saliente de moderador 337b a la zona de reflector 95. Como las cavidades de control 140b tienen partes superiores cerradas, el moderador puede no ser libre para moverse entre las partes superiores de las cavidades de control 140b y la zona de reflector 95.

Haciendo referencia a la figura 12N, la disposición descrita puede funcionar cuando, por ejemplo, el moderador es enfriado por circulación de moderador relativamente frío a través y adentro de la piscina reflectante 105 y/o la cavidad de control 140b (y/o 140' y/o 140a). La disposición de la figura 12N puede funcionar basándose en la estabilidad de la presión de moderador de vapor de agua en sustancialmente todos los puntos en el sistema, y estabilidad de la altura de la frontera 115 dispuesta en la parte superior de la piscina reflectante 105 por encima de las varillas de combustible 127b (y/o varillas de combustible similares dispuestas en el núcleo de reactor 100' y 100a). El tubo de refrigerante de moderador 327b (y/o tubos de refrigerante de moderador similares dispuestos en el núcleo de reactor 100' y 100a) permite el flujo de moderador desde la zona de reflector 95 y las cavidades de control 140b (y/o cavidades de control 140' y/o 140a) a los tubos de intercambio de calor de moderador 390b que atraviesan el tanque 377b al pasadizo 355b y la bomba de refrigerante de moderador 350b. La tasa de enfriamiento de moderador puede ser, por ejemplo, el caudal de bomba multiplicado por la diferencia de temperatura entre la temperatura de agua (H₂O) en el tanque 377b y la temperatura de moderador en la piscina reflectante 105. Como la diferencia de temperatura puede ser mantenida en un nivel constante, la tasa de enfriamiento de cavidad de control de moderador y así la salida de potencia total de reactor son proporcionales al caudal de bomba. Así, un funcionamiento inapropiado de la bomba de refrigerante de moderador 350b y/o una perturbación de potencia de bomba detendrán la reacción en el reactor 15. El moderador enfriado fluye desde la bomba de refrigerante de moderador 350b por medio del pasadizo 322b (y/o pasadizo similar dispuesto en el núcleo de reactor 100' y/o 100a) a los tubos de flujo entrante de refrigerante de moderador 335b (y/o tubos similares dispuestos en el núcleo de reactor 100' y/o 100a). Un condensador y la parte de flujo diferencial similar en forma y función al condensador 570 y la parte de flujo diferencial 675 del subsistema de seguimiento de carga 515 pueden ser insertados en el pasadizo 322b adyacente a la bomba 350b.

Ahora se describirá el funcionamiento del subsistema de control de reactor 40, empezando con una descripción de un funcionamiento ejemplar del subsistema de seguimiento de carga 515. El funcionamiento del subsistema de control de reactor es controlado por medio del controlador 540 del subsistema de control 510.

Como se ilustra en la figura 20, la compuerta 545 del subsistema de seguimiento de carga 515 reduce selectivamente un flujo de vapor de agua (H₂O) desde el intercambiador de calor 20 a la turbina 45 por medio del pasadizo 70 desviando vapor de agua (H₂O) desde el pasadizo 70 al pasadizo 555. Para desviar vapor de agua (H₂O) al pasadizo 555, la compuerta 545 es movida desde la posición de cierre a la posición de apertura parcial o la posición de apertura total. Cuando la compuerta 545 está en la posición de cierre, sustancialmente todo el flujo de vapor de agua (H₂O) fluye desde el pasadizo 70 a la turbina 45. Cuando la compuerta 545 es movida a la posición de apertura parcial, (p. ej. cuando el flujo deseado de vapor de agua a la turbina 45 debe disminuir para cumplir una demanda más baja de potencia eléctrica) el exceso de vapor de agua (H₂O), que es proporcional a la cantidad que se abre la compuerta 545, fluye desde el pasadizo 70 al pasadizo 555. Así, el funcionamiento de la compuerta 545 controla la cantidad de vapor de agua (H₂O) que es desviada desde el pasadizo 70 al pasadizo 555. Un funcionamiento de la compuerta 550, que

es similar al funcionamiento de la compuerta 545, controla una cantidad vapor de agua (H₂O) que es desviada desde el pasadizo 555 al pasadizo 560. El vapor de agua (H₂O) que fluye al pasadizo 560 es trasferido directamente al subsistema de enfriamiento de turbina 60 por medio del pasadizo 560. Así, un funcionamiento de la compuerta 550 controla la cantidad de flujo de vapor de agua (H₂O) que hace baipás de la turbina 45 y es trasferida directamente al subsistema de enfriamiento de turbina 60. Dependiendo de su posición, y funcionado de manera similar a la compuerta 545, la compuerta 550 puede desviar sustancialmente todo el flujo, sustancialmente nada de flujo, o algo del flujo de vapor de agua (H₂O) desde el pasadizo 555 al subsistema de enfriamiento de turbina 60 por medio del pasadizo 560. Cuando se desea una parada rápida de la turbina 45, la compuerta 545 es movida a la posición de apertura para transferir sustancialmente todo el flujo de vapor de agua (H₂O) desde el pasadizo 70 al pasadizo 555, y la compuerta 550 es movida a la posición de apertura para transferir sustancialmente todo el flujo de vapor de agua (H₂O) desde el pasadizo 555 al pasadizo 560. Así, sustancialmente todo el flujo de vapor de agua (H₂O) desde el intercambiador de calor 20 es desviado al subsistema de enfriamiento de turbina 60, facilitando la parada rápida de la turbina 45.

El vapor de agua (H₂O) que fluye a través del pasadizo 555, que no es desviado al subsistema de enfriamiento de turbina 60 por medio del pasadizo 560, fluye al condensador 570 por medio del pasadizo 565 o puede fluir a un condensador similar (no se muestra) en el pasadizo 322b, como se representa en la figura 12N. Debido al intercambio de calor entre el vapor de agua (H₂O) dispuesto en el condensador 570 y el refrigerante de reactor frío que fluye a través del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, algo o sustancialmente todo el vapor de agua (H₂O) dispuesto en el condensador 570 se condensa hasta agua (H₂O). La válvula 575 funciona para permitir que fluya agua (H₂O) saliendo del condensador 570 mientras se bloquea sustancialmente un flujo de vapor de agua (H₂O) afuera del condensador 570. Entonces fluye agua (H₂O) desde el condensador 570 al intercambiador de calor 585 por medio del pasadizo 580. El intercambiador de calor 585 enfría una temperatura del agua (H₂O) a una temperatura deseada (p. ej., sustancialmente la misma temperatura que el agua (H₂O) que es trasferida por el pasadizo 80 del subsistema de vapor de agua de turbina 65). El pasadizo 590 transfiere entonces agua (H₂O) desde el intercambiador de calor 585 al pasadizo 80 por medio del empalme 595. El pasadizo 80 transfiere entonces el agua (H₂O) a una entrada de la bomba 395 del subsistema de la bomba 30.

Por lo tanto, el subsistema de seguimiento de carga 515 permite el control de la turbina 45 ajustando la compuerta 545 para dirigir más o menos del vapor de agua (H₂O) desde el intercambiador de calor 20 para que pase a través de la turbina 45 conforme fluctúa la demanda de potencia. En algunos casos de funcionamiento normal, el exceso de vapor de agua (H₂O) se usa para precalentar la materia prima aportada desde el subsistema de enfriamiento de turbina 60 al intercambiador de calor 20. También, algo del exceso de vapor de agua (H₂O) puede ser usado para calentar refrigerante de cavidad de control de moderador primario por medio de un intercambiador de calor (p. ej., un pequeño intercambiador de calor) dispuesto en el pasadizo 322b o pasadizo 320, reduciendo así el enfriamiento de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b y el reactor salida de potencia cuando la cantidad de exceso de vapor de agua (H₂O) aumenta (o aumentando la salida de potencia cuando la cantidad de exceso de vapor de agua (H₂O) disminuye).

Ahora se describirá un funcionamiento ejemplar del subsistema de baipás 520. La bomba 600 es controlada por el controlador 540 para presurizar selectivamente refrigerante de reactor en el pasadizo 605 para bombear refrigerante de reactor desde el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, que de ese modo hace baipás al intercambiador de calor 20 y la bomba 390. Así, la bomba 600 y el pasadizo 605 permiten que refrigerante de reactor relativamente caliente fluya a través del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 para baipás del intercambiador de calor 20 y fluya directamente al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, permitiendo de ese modo que refrigerante caliente se mezcle con el refrigerante relativamente frío y suba la temperatura del refrigerante que fluye en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 en momentos deseados durante el funcionamiento del reactor 15 (p. ej., durante una parada, funcionamiento a baja potencia y/o carga inicial de refrigerante de reactor).

Por lo tanto, el subsistema de baipás 520 permite que una cantidad relativamente pequeña de refrigerante primario sea forzada desde el camino normal de refrigerante, haciendo baipás al intercambiador de calor 20 y/o núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b. El subsistema de baipás 520 puede funcionar cuando la bomba de refrigerante 390 y/o la bomba de H₂O 395 son impulsadas por un único motor, y cantidades proporcionales de fluido son bombeadas a través del subsistema de transferencia 305 para equilibrar la cantidad de calor que entra al intercambiador de calor 20 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 y la cantidad de calor que deja el intercambiador de calor 20 por medio de flujo de vapor de agua (H₂O) a través del pasadizo 70 a la turbina 45 durante funcionamiento normal. A baja potencia, pueden ocurrir desviaciones significativas de temperatura (p. ej., desviaciones más grandes de temperatura que a plena potencia), y estas desviaciones de temperatura pueden cambiar la ratio de flujo entre un caudal de refrigerante primario a través del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 y un caudal de materia prima de turbina a través del pasadizo 70 alejado de un caudal deseado. El funcionamiento de subsistema de baipás 520 compensa estas desviaciones de temperatura y mantiene la ratio de flujo entre un caudal de refrigerante primario a través del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 y un caudal de materia prima de turbina a través del pasadizo 70 en un caudal deseado. En respuesta a estas desviaciones de temperatura, la bomba 600 puede funcionar a una capacidad relativamente baja. Por ejemplo, la capacidad de bomba 600 puede ser el 3 % de la capacidad de la bomba 390 a plena potencia, que puede corresponder al 30 % de la capacidad de la bomba 390 al 10 % de potencia, que puede ser capacidad suficiente para que la bomba 600 compense un desequilibrio significativo de la ratio de flujo

deseada. La bomba 600 también puede funcionar en situaciones cuando no es deseable que discurra materia prima de turbina a través del pasadizo 70 a la turbina 45, pero es deseable mantener un pequeño flujo de refrigerante primario de reactor a través del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b (p. ej., en el arranque del reactor para llevar el núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b uniformemente a la temperatura de funcionamiento).

5 Ahora se describirá un funcionamiento ejemplar del subsistema de estabilización de moderador 525. Durante funcionamiento normal del reactor 15, la válvula 615 está en una posición de cierre, bloqueando sustancialmente el flujo de moderador de vapor de agua desde el área de vapor de agua 110 de la zona de reflector 95 al depósito 625 por medio del pasadizo 610. Cuando el controlador 540 controla la válvula 615 para que se abra, el moderador de vapor de agua fluye desde el área de vapor de agua 110 al depósito 625 por medio del pasadizo 610. Al entrar al depósito 625 por medio del pasadizo 610, el moderador de vapor de agua se condensa en superficies relativamente frías de paredes interiores del depósito 625. La válvula 615 puede ser abierta cuando se desea una parada rápida del reactor. El moderador de vapor de agua que fluye a través del pasaje 610 también fluye al condensador 635 por medio del pasadizo 630. Debido al intercambio de calor con agua relativamente fría (H₂O) que fluye a través del pasadizo 80, el moderador de vapor de agua dispuesto en el condensador 635 se condensa hasta moderador líquido. La bomba 645 presuriza selectivamente un flujo de moderador líquido en los pasadizos 640 y 650, bombeando de ese modo moderador líquido condensado nuevamente adentro del reactor 15, p. ej., al área de vapor de agua 110. El moderador líquido condensado transferido al área de vapor de agua 110 por medio del pasadizo 650 provoca que moderador de vapor de agua adicional en el área de vapor de agua 110 se condense, y reduce una temperatura del moderador en la zona de reflector 95. La bomba 645 puede funcionar a un caudal que mantenga una presión constante de vapor de agua en el área de vapor de agua 110 y la zona de reflector 95. Esta función también es servida por la válvula de control de presión de vapor de agua 380b, representada en la figura 12N.

Por lo tanto, el subsistema de estabilización de moderador 525 funciona para condensar el exceso de moderador de vapor de agua y la bomba nuevamente adentro de la piscina reflectante 105 cuando una presión del moderador de vapor de agua en el área de vapor de agua 110 sube por encima de un valor deseado. Mantener la presión de moderador de vapor de agua en el área de vapor de agua 110 en un intervalo deseado de presión permite un funcionamiento normal de las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b, porque el subsistema de estabilización de moderador 525 funciona para mantener la estabilidad del vapor de agua presión en vapor de agua zona 110, para mantener la estabilidad de una temperatura del moderador de vapor de agua cerca de la frontera 115 de la zona de reflector 95, y para mantener la estabilidad de una temperatura de moderador líquido cerca de la frontera 115 de la zona de reflector 95.

Ahora se describirá un funcionamiento ejemplar del subsistema de estabilización de refrigerante de reactor 530. El paso sustancialmente libre de refrigerante de reactor entre el depósito 655 y el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 ocurre por medio del pasadizo 665. El elemento de calentamiento 660 calienta selectivamente el depósito 655 para mantener el refrigerante de reactor almacenado dentro del depósito 655 en una temperatura y/o presión deseadas cuando la presión cae por debajo del valor deseado. Cuando la presión sube por encima de un valor deseado, refrigerante de reactor frío desde el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 es inyectado selectivamente al depósito 655 por una bomba (no se muestra). El refrigerante de reactor relativamente frío rociado al depósito 655 condensa una parte del refrigerante de reactor de vapor de agua en el depósito 655, reduciendo de ese modo selectivamente una presión en el depósito 655 y el pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325.

Haciendo referencia a las figuras 15 y 20, ahora se describirá un funcionamiento ejemplar del subsistema de flujo diferencial 535. Como las partes de cada área (p. ej., área A1, A2, A3 y/o A4) en los extremos de entrada y salida de cada pasadizo concéntrico sucesivo 670 pueden estar bloqueadas, se mantiene un caudal sustancialmente igual en cada uno de los pasadizos concéntricos 670 a través de las partes del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 en las que se disponen los pasadizos concéntricos 670. Así, como las áreas de los pasadizos concéntricos pueden variar, el tiempo para que el fluido atravesase los diferentes pasadizos concéntricos puede variar, y cambios rápidos de temperatura en el pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 se dispersan en el tiempo.

El sistema de reactor nuclear 5 puede funcionar en cualquier periodo de tiempo adecuado, tal como, por ejemplo, un periodo de años o de décadas de funcionamiento continuo. Conforme el sistema de reactor nuclear funciona en este periodo de años o décadas, se provocará que un tamaño de las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b se encoja gradualmente y desaparezca sustancialmente hacia la final del periodo de tiempo de funcionamiento. Se provocará que las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b se encojan y finalmente desaparezcan sustancialmente porque la cantidad de contenido fisionable del combustible en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b disminuirá con el tiempo, y así se usará una densidad más alta de moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b para compensar el menor contenido fisionable y para mantener una tasa de fisión deseada. También se provocará que las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b se encojan y finalmente desaparezcan sustancialmente porque subproductos de fisión absorbentes de neutrones se acumularán continuamente en el periodo de funcionamiento del sistema de reactor nuclear 5. Por consiguiente, también se provocará que las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b se encojan y finalmente desaparezcan sustancialmente debido al aumento en subproductos de fisión absorbentes de neutrones con el tiempo, y así también se usará una densidad más alta de moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b para compensar la mayor captura de neutrones y para mantener una tasa de fisión deseada.

Con el tiempo, después de que se ha provocado que las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b desaparezcan sustancialmente, la cantidad de contenido fisionable del combustible en los tubos de combustible 135, 135', 135a y/o 135b puede finalmente volverse bastante pequeña y/o la cantidad de subproductos de fisión absorbentes de neutrones producidos en el reactor 15 finalmente se volverá bastante grande de modo que el reactor 15 se vuelve subcrítico y la tasa de fisión en el sistema de reactor nuclear 5 puede volverse insignificante. Así, el reactor 15 se parará. En este punto, se puede proporcionar combustible nuevo al reactor 15, o el reactor 15 puede funcionar breves periodos después de la parada tras la degradación de xenón.

El sistema de reactor nuclear 5 también puede ser parado, si se desea, antes de la parada al final del periodo de tiempo de funcionamiento descrito anteriormente. El sistema de reactor nuclear puede ser parado intencionadamente por el subsistema de control de reactor 40. En el caso de parada intencionada, el funcionamiento del subsistema de refrigerante de reactor 25 puede ser controlado para suministrar una cantidad relativamente pequeña o sustancialmente nada de refrigerante de reactor y/o refrigerante de moderador al reactor 15. En este caso, el moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b se calentará mucho, provocando que las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b se expandan para rellenar sustancialmente todas las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b. Como se ha descrito anteriormente, cuando las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b rellenan sustancialmente todas las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b, la densidad media del moderador en las distribuciones de cavidades de control 130, 130', 130a y/o 130b disminuye. Esta disminución de densidad de moderador aumenta el porcentaje de neutrones perdidos por absorción a velocidades intermedias y altas (captura de resonancia), disminuyendo así el porcentaje de neutrones lentos disponible para provocar fisión, lo que disminuye la tasa de calentamiento del reactor 15. Por consiguiente, si el flujo de refrigerante de reactor y de refrigerante de moderador al reactor 15 permanece pequeño o sustancialmente detenido, las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b continuarán rellenoando sustancialmente todas las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b, y el reactor 15 se parará. De manera similar a la parada intencionada, si el subsistema de refrigerante de reactor 25 no funciona apropiadamente y no proporciona refrigerante de reactor y/o refrigerante de moderador al reactor 15, las zonas gaseosas 185, 185', 185a, 185b, 280 y/o 185b se expandirán para rellenar sustancialmente todas las cavidades de control 140, 140', 140a y/o 140b, y el reactor 15 finalmente se parará por sí mismo de la misma manera que se ha descrito anteriormente para parada intencionada.

Ahora se describirá el funcionamiento del subsistema de refrigerante auxiliar 35, empezando con una descripción de un funcionamiento ejemplar del subsistema de bucle de convección 410.

Haciendo referencia a la figura 16, los empalmes 425 y 455 se pueden configurar de modo que a flujo sustancialmente completo de refrigerante (funcionamiento a plena potencia) la presión A en el pasadizo 430 y la presión B en el empalme 455 se oponen y equilibran entre sí de modo que sustancialmente no hay flujo de fluido a través de los pasadizos 430, 435, 440 y 445, la parte de combinación 450, y el empalme 455. Si la bomba de refrigerante 390 deja de bombear refrigerante de reactor frío a través del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320, a través del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b, y afuera del pasadizo de refrigerante de reactor caliente 325 al intercambiador de calor 20, entonces el refrigerante de reactor caliente que sale del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b puede fluir al pasadizo 430 del subsistema de bucle de convección 410 en el empalme 425. El refrigerante de reactor caliente fluye hacia abajo por medio del pasadizo 430, por debajo de una elevación de la superficie superior de la piscina reflectante 105. El refrigerante de reactor caliente fluye entonces hacia arriba desde el pasadizo 430 al pasadizo 435, y entonces hacia la estructura de contención 85 y el recipiente a presión 90 por medio de la pluralidad de pasadizos 440. El refrigerante de reactor caliente fluye desde la pluralidad de pasadizos 440 a la correspondiente pluralidad de pasadizos 445. El refrigerante de reactor caliente fluye a través de la pluralidad de pasadizos 445, impartiendo calor por intercambio de calor al recipiente a presión 90. El refrigerante de reactor fluye por medio de la pluralidad de pasadizos 445 a una posición cerca o por debajo de la parte inferior del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b. El refrigerante de reactor fluye entonces al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 por medio del empalme 455. El refrigerante de reactor que entra al pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 entra entonces al núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b. Tras salir del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b, algo del refrigerante de reactor vuelve a entrar al subsistema de bucle de convección 410 en el empalme 425.

La presión A se opone y equilibra la presión B cuando la bomba 390 está haciendo circular refrigerante de moderador frío a una tasa correspondiente a funcionamiento a máxima potencia del reactor de modo que fluye muy poco refrigerante a través del bucle de convección a plena potencia. A menos de plena potencia (que puede ser a mucho menos de flujo de refrigerante de reactor completo o a sustancialmente nada de flujo de refrigerante de reactor), un bucle de convección funciona para hacer circular refrigerante de reactor a través del subsistema de bucle de convección 410. Así, si se desea, el subsistema de bucle de convección 410 funciona para hacer circular refrigerante de reactor a través del reactor 15 incluso cuando el subsistema de refrigerante de reactor 25 no está funcionando. El subsistema de bucle de convección 410 y las válvulas 460 y 465 pueden ser sistemas autónomos que funcionan independientemente del controlador 540 y de cualquier suministro de energía eléctrica. Por ejemplo, las válvulas 460 y 465 pueden funcionar para aislar un flujo de refrigerante de reactor dentro del subsistema de bucle de convección 410 en caso de interrupción de flujo del subsistema de refrigerante de reactor 25 o fuga en cualquiera de los componentes de subsistema refrigerante fuera de la estructura de contención 85. La válvula 460 funciona para bloquear sustancialmente un flujo de refrigerante de reactor afuera del reactor 15 por medio del pasadizo de refrigerante de reactor frío 320 en cualquier caso cuando la presión externa es menor que la presión en el pasadizo

de refrigerante de reactor frío 320 dentro del recipiente a presión 90. También, la válvula 465 funciona para bloquear sustancialmente el flujo de refrigerante de reactor afuera del reactor 15, cuando la cantidad de refrigerante de reactor en el reactor 15 es menor que una cantidad umbral deseada. Así, el subsistema de bucle de convección 410 funciona para mantener la circulación de refrigerante de reactor a través del reactor 15, independientemente de un funcionamiento del subsistema de refrigerante de reactor 25, si se desea.

Haciendo referencia a las figuras 17 y 18, ahora se describirá un funcionamiento ejemplar del subsistema de intercambio de calor auxiliar 415. Cuando la temperatura del moderador dentro de la zona de reflector 95 supera su temperatura de funcionamiento normal, el recipiente a presión 90 también es calentado a aproximadamente la misma temperatura por conducción desde el moderador y el vapor de moderador. El material de estado cambiante alojado dentro del miembro de intercambio de calor 470 es calentado cada vez más. Si se calienta más allá de un nivel umbral, se provocará que el material de estado cambiante dispuesto en los miembros de intercambio de calor 470 cambie de estados (p. ej., calentado desde un estado sólido hasta un estado líquido, o calentado desde un estado líquido hasta un estado gaseoso), lo que mejora las propiedades de conductividad del material de estado cambiante dispuesto en los miembros de intercambio de calor 470. El material de estado cambiante del miembro de intercambio de calor 470 transferirá eficientemente calor lejos del recipiente a presión 90 por convección o transferencia de vapor de agua, y hacia un exterior de la estructura de contención 85 (que puede tener conductividad térmica baja).

El material de estado cambiante del miembro de intercambio de calor 475 es entonces calentado por calor trasferido desde el miembro de intercambio de calor 470. Si se calienta más allá de un nivel umbral, se provocará que el material de estado cambiante dispuesto en los miembros de intercambio de calor 475 cambie de estados (p. ej., calentado desde un estado sólido hasta un estado líquido, o calentado desde un estado líquido hasta un estado gaseoso), lo que mejora las propiedades de conductividad del material de estado cambiante dispuesto en los miembros de intercambio de calor 475.

El material de estado cambiante de los miembros de intercambio de calor 475 fluirá entonces desde el miembro de intercambio de calor 475 al miembro de intercambio de calor 480. Cuando los miembros de intercambio de calor 480 se extienden bajo un área grande de terreno (p. ej., campo y/o aparcamiento), el calor trasferido por el material de estado cambiante dispuesto y/o que fluye en los miembros de intercambio de calor 480 se disipará al terreno y superficie de suelo adyacentes. También, cuando los miembros de intercambio de calor 480 se disponen en un ligero ángulo hacia arriba desde un plano sustancialmente horizontal, el material de estado cambiante dispuesto y/o que fluye dentro del miembro de intercambio de calor 480 disipa cada vez más calor conforme aumenta la distancia desde el reactor 15.

Cuando se enfría más allá del nivel umbral, se provocará que el material de estado cambiante dispuesto en los miembros de intercambio de calor 480 cambie de estados de nuevo (p. ej., enfriado desde un estado gaseoso hasta un estado líquido, o enfriado desde un estado líquido a un estado sólido). Por ejemplo, si el material de estado cambiante dispuesto en los miembros de intercambio de calor 475 y 480 es H₂O, el vapor de agua (H₂O) se condensa hasta agua (H₂O). Cuando los miembros de intercambio de calor 480 se disponen en un ligero ángulo hacia arriba desde un plano sustancialmente horizontal, el material de estado cambiante, p. ej., agua (H₂O), formará burbujas de vapor de agua en los miembros de intercambio de calor 475 que suben rápidamente a la parte superior de los miembros de intercambio de calor 475 y luego fluyen hacia fuera a lo largo de las partes superiores de los miembros de intercambio de calor 480 hasta que se condensan hasta el agua más fría (H₂O) en los miembros de intercambio de calor 480 y fluyen debido a gravedad nuevamente hacia el reactor 15. Conforme el material de estado cambiante fluye nuevamente a través de los miembros de intercambio de calor 480 debido a gravedad hacia el reactor 15 y los miembros de intercambio de calor 475, el material de estado cambiante de nuevo se calienta cada vez más. Si se calienta más allá de un nivel umbral, se provocará que el material de estado cambiante dispuesto en los miembros de intercambio de calor 475 cambie de estados (p. ej., calentado desde un estado líquido hasta un estado gaseoso, o calentado desde un estado sólido hasta un estado líquido). El material de estado cambiante puede ser calentado y enfriado iterativamente, cambiando de ese modo adelante y atrás entre estados en un ciclo, y transfiriendo continuamente calor lejos del reactor 15 que será disipado sobre el área grande de terreno (p. ej., campo y/o estacionamiento) bajo el que se extienden los miembros de intercambio de calor 480. Se contempla que además de funcionar dentro del sistema de reactor nuclear 5, el subsistema de intercambio de calor auxiliar 415 puede ser usado conjuntamente con cualquier aplicación adecuada de transferencia de calor en la que se trasfiere calor lejos de una fuente central (p. ej., cualquier tipo de central energética, cualquier tipo de estructuras productoras de calor tales como edificios comerciales, aplicaciones militares, estructuras residenciales y complejos y/o complejos deportivos).

Haciendo referencia a la figura 19, ahora se describirá un funcionamiento ejemplar del subsistema de parada de reactor auxiliar 420. Durante el funcionamiento normal del reactor 15, la válvula 487 puede permanecer cerrada. Cuando se desea un flujo entrante de material absorbente de neutrones al reactor 15 (p. ej., cuando se desea una parada del reactor 15), el controlador 540 controla la válvula 487 para que se abra para permitir flujo de material presurizado absorbente de neutrones desde el depósito presurizado 485 a uno o más pasadizos 490. El material absorbente de neutrones fluye a través de uno o más pasadizos 490, fluyendo de ese modo a través del núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b. Conforme el material absorbente de neutrones fluye hacia la parte extrema 505, el vapor de agua (H₂O) previamente dispuesto en el pasadizo 490 se presuriza cada vez más en la parte extrema cerrada 505, que sirve como atenuador y reduce la posibilidad de que el flujo de material absorbente de neutrones reviente desde la parte extrema

- 505 debido a la fuerza del flujo presurizado desde el depósito presurizado 485 al pasadizo 490. Debido a la presencia de material absorbente de neutrones en los pasadizos 490, una mayor cantidad de neutrones son absorbidos desde el reactor 15, lo que disminuye la tasa de fisión del reactor 15. El controlador 540 controla la bomba 500 para que bombee el material absorbente de neutrones desde el pasadizo 490 nuevamente al depósito 485 por medio del pasadizo de drenaje 495 cuando se desea reiniciar el reactor. Cuando sustancialmente no se desea material absorbente de neutrones en el pasadizo 490, el controlador 540 controla la válvula 487 para que se cierre sustancialmente por completo, y controla la bomba 500 para evacuar material absorbente de neutrones desde el pasadizo 490 al depósito presurizado 485. La bomba 500 mantiene el depósito presurizado 485 en un estado presurizado, y el proceso descrito anteriormente puede ser repetido según se desee.
- 10 El sistema de reactor nuclear descrito puede ser usado para hacer más fácil el control de un reactor nuclear. Por ejemplo, el reactor 15 puede ser construido sin piezas móviles dentro de la estructura de contención 85. El método de control descrito tiene un intervalo relativamente grande (p. ej., sobre 250 mk), lo que permite el uso de combustibles que tienen reactividades ampliamente diferentes, mientras se logra una ratio de conversión sustancialmente máxima para cada combustible diferente sustancialmente en todos los puntos en el ciclo de vida de combustible. El sistema de reactor nuclear descrito también aumenta enormemente la ratio de conversión y así aumenta vida de combustible.
- 15 También, debido al intervalo relativamente grande del método de control descrito, el reactor 15 puede usar combustibles de reactividad más alta tales como, por ejemplo, uranio poco enriquecido, combustible MOX, combustible de reactor de agua ligera usada, y combinaciones de combustible que incluyen torio.
- 20 Debido a que las cavidades de control descritas reaccionan independientemente entre sí para controlar el flujo local de neutrones, se pueden suprimir de manera natural ondas de xenón, lo que aumenta la eficiencia del reactor 15. También, el flujo de neutrones en el núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b se aplanan enormemente, permitiendo una salida de potencia total relativamente más alta del sistema de reactor nuclear 5. También, el agotamiento de combustible en el núcleo de reactor 100, 100', 100a y/o 100b puede ser relativamente uniforme.
- 25 El sistema de reactor nuclear descrito puede no tener que usar reabastecimiento continuo o parcial debido a que se puede usar el exceso de neutrones para prolongar la vida de combustible fresco de ratio de conversión más alta, en lugar de ser usado para prolongar menos eficazmente la vida de combustible más antiguo que tiene una ratio de conversión más baja. Como el reactor 15 puede usar uranio natural como combustible, el reactor 15 puede no utilizar capacidad de enriquecimiento de isótopo (p. ej., uranio), disminuyendo así la posibilidad de proliferación nuclear. Debido a la alta ratio de conversión del reactor 15, mucha de la salida de potencia se produce por fisión de isótopos de plutonio (principalmente Pu239) producido a partir de U238 en el reactor 15, aumentando así significativamente los kWh totales de potencia producida por tonelada de uranio extraído y disminuyendo significativamente la cantidad de desperdicios nucleares generados por kWh de potencia producida.
- 30 Las cavidades de control descritas proporcionan al reactor 15 una estructura simple para controlar eficientemente el sistema de reactor nuclear 5. Las cavidades de control descritas pueden permitir una diferencia de temperatura reducida entre el refrigerante de reactor y el moderador, de modo que la pérdida de calor desde el refrigerante caliente al moderador se reduce, permitiendo temperaturas más altas de refrigerante de salida y turbinas de vapor de agua más eficientes. También, las cavidades de control descritas pueden permitir una diferencia de presión reducida en el reactor 15, permitiendo hacer los tubos de presión de refrigerante con menos material estructural, que absorbe menos neutrones y puede aumentar la ratio de conversión del combustible.
- 35 Los conjuntos de combustible descritos pueden proporcionar varillas de combustible interiores en los tubos de combustible descritos que son relativamente menos ensombrecidos por neutrones térmicos por varillas de combustible exteriores de modo que las temperaturas son relativamente uniformes en los tubos de combustible, lo que permite que los tubos de combustible y los conjuntos de combustible contengan más varillas de combustible y/o varillas de combustible de diámetro más grande. Por consiguiente, se puede aumentar la salida de potencia por volumen de reactor.
- 40 El sistema de intercambio de calor auxiliar 415 puede proporcionar un método para transferir eficientemente calor desde el reactor 15, o desde cualquier otra fuente adecuada de calor. El sistema de intercambio de calor auxiliar 415 proporciona un sistema eficiente de transferencia de calor que puede funcionar sin piezas mecánicas móviles.
- 45 El sistema de reactor nuclear descrito también puede proporcionar parada automática y/o intencionada del reactor 15 cuando se desee. El sistema de reactor descrito también puede proporcionar métodos para controlar una cantidad de vapor de agua que es entregada a la turbina 45 por medio de un sistema de baipás, que puede hacer más eficiente el control de producción de potencia.
- 50 Para los expertos en la técnica será evidente que se pueden hacer diversas modificaciones y variaciones al sistema de reactor nuclear descrito. Otras realizaciones serán evidentes para los expertos en la técnica tras consideración de la memoria descriptiva y práctica del método y el aparato descritos. Se pretende que la memoria descriptiva y los ejemplos sean considerados únicamente ejemplares, con un verdadero alcance indicado por las siguientes reivindicaciones.
- 55

REIVINDICACIONES

1. Un método para controlar la salida de potencia total de un reactor nuclear (15), que comprende:
 - proporcionar un núcleo de reactor (100) que incluye un conjunto de combustible, el conjunto de combustible incluye una pluralidad de tubos de combustible (135);
- 5 proporcionar una zona de reflector (95) que rodea el núcleo de reactor (100);
 - proporcionar un alojamiento que tiene una cavidad (140), adyacente a los tubos de combustible (135);
 - permitir movimiento de un moderador adentro y afuera de la cavidad (140) del alojamiento en una parte más baja del alojamiento;
 - caracterizado por que
- 10 se proporciona una pluralidad de alojamientos, cada uno tiene una cavidad (140), adyacente a los tubos de combustible (135), en donde se permite el movimiento de un moderador adentro y afuera de cada cavidad (140) de la pluralidad de alojamientos en una parte más baja de la pluralidad de alojamientos;
 - moderador en un estado gaseoso es confinado en cada cavidad (140) de la pluralidad de alojamientos en una parte superior de la pluralidad de alojamientos;
- 15 en donde el moderador se mueve desde al menos uno de la pluralidad de alojamientos a la zona de reflector a través de la parte más baja del al menos uno de la pluralidad de alojamientos, y el moderador se mueve desde la zona de reflector a al menos uno de la pluralidad de alojamientos a través de la parte más baja del al menos uno de la pluralidad de alojamientos
 - y además caracterizado por
- 20 retirar una cantidad del calor del moderador en la cavidad (140) del al menos un alojamiento que es sustancialmente igual a una cantidad de calor impartido por conducción de calor, neutrones o radiación gamma desde el conjunto de combustible adentro del moderador en la cavidad (140) por medio de un tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador (335a) que incluye uno o más orificios (337a) ubicados en los lados del tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador (335a) configurados para permitir que moderador de fluido relativamente más frío fluya adentro de la
 - 25 cavidad (140) del alojamiento para que se mezcle con moderador fluido ya dispuesto en la cavidad (140).
2. El método según la reivindicación 1, en donde la cantidad del moderador en el estado gaseoso en cada cavidad (140) en una parte superior del alojamiento puede variar ligeramente en periodos de tiempo cortos, es decir un periodo de días, basándose en la carga de xenón o samario del combustible, y puede variar significativamente en periodos de tiempo largos, es decir un periodo de años, basándose en un agotamiento del combustible.
- 30 3. El método para controlar un reactor nuclear según la reivindicación 1, que comprende además:
 - controlar una cantidad de moderador que es mantenido en el estado gaseoso en la cavidad (140) en la parte superior del al menos un alojamiento al variar la cantidad de calor retirado del moderador en la cavidad (140).
4. El método de una de las reivindicaciones anteriores, en donde el moderador es D₂O.
5. El método de la reivindicación 1, en donde cuando la tasa de reacción es mayor que un valor deseado, la
 - 35 tasa de reacción más alta aumenta el flujo de neutrones en cada cavidad (140), aumenta la deposición de calor adentro del moderador en cada cavidad (140), aumenta la cantidad de moderador en cada cavidad (140) en el estado gaseoso, y desplaza algo del moderador en el estado líquido en cada cavidad (140) hacia abajo fuera de cada cavidad respectiva (140), lo que disminuye la masa de moderador en cada cavidad (140), aumenta una cantidad de neutrones capturados con captura de resonancia, y disminuye la cantidad de neutrones que alcanzan energía térmica y que provocan fisión.
- 40 6. El método de la reivindicación 1, en donde cuando la tasa de reacción es más baja que un valor deseado, la tasa de reacción más baja disminuye el flujo de neutrones en cada cavidad (140), disminuye la deposición de calor adentro del moderador en cada cavidad, aumenta la tasa de condensación de moderador gaseoso en cada cavidad al estado líquido, disminuye la cantidad de moderador en cada cavidad en el estado gaseoso, y permite desplazamiento de algo del moderador líquido en la zona de reflector hacia arriba a cada cavidad respectiva, lo que
 - 45 aumenta la masa de moderador en cada cavidad, disminuye una cantidad de neutrones capturados con captura de resonancia, y aumenta la cantidad de neutrones que alcanzan energía térmica y que provocan fisión.
7. Un aparato para un reactor nuclear, que comprende:
 - una estructura de contención (85), estando lo siguiente dispuesto en la estructura de contención (85):
 - un núcleo de reactor (100) que incluye un conjunto de combustible, el conjunto de combustible incluye una pluralidad

de tubos de combustible (135);

una zona de reflector (95) que rodea el núcleo de reactor (100);

moderador de neutrones, en donde al menos algo del moderador de neutrones es un fluido y el moderador de neutrones fluido se dispone tanto en el núcleo de reactor (100) como en la zona de reflector (95); y

- 5 un alojamiento dispuesto adyacente a los tubos de combustible (135), dicho alojamiento tiene una cavidad (140) en donde una parte más baja del alojamiento está abierta para movimiento de moderador de neutrones fluido adentro y afuera de la cavidad y en donde una parte superior del alojamiento está cerrada para movimiento de moderador de neutrones fluido adentro o afuera de la parte superior de la cavidad (140);

caracterizado por que

- 10 el alojamiento es una parte de una pluralidad de alojamientos dispuestos adyacentes a los tubos de combustible con cada alojamiento que tiene una cavidad y en donde una parte más baja de cada alojamiento está abierta para movimiento de moderador de neutrones fluido adentro y afuera de la cavidad y en donde una parte superior de cada alojamiento está cerrada para movimiento de moderador de neutrones fluido adentro o afuera de la parte superior de la cavidad (140);

- 15 de manera que el moderador fluido de neutrones se mueve desde al menos uno de la pluralidad de alojamientos a la zona de reflector a través de la parte más baja del al menos uno de la pluralidad de alojamientos, y el moderador de neutrones fluido se mueve desde la zona de reflector a al menos uno de la pluralidad de alojamientos a través de la parte más baja del al menos uno de la pluralidad de alojamientos

y por que

- 20 se proporciona un tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador (335a), el tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador (335a) incluye uno o más orificios (337a) ubicados en los lados del tubo de flujo entrante de refrigerante de moderador (335a) configurados para permitir que moderador de neutrones fluido relativamente más frío fluya adentro de la cavidad (140) del alojamiento para mezclarse con moderador de neutrones fluido ya dispuesto en la cavidad (140).

- 25 8. El aparato de la reivindicación 7, en donde al menos algo del moderador de neutrones está en un estado líquido y al menos algo del moderador de neutrones está en un estado gaseoso tanto en la zona de reflector como en al menos algunas de las cavidades (140).

9. El aparato de la reivindicación 7, en donde el moderador de neutrones fluido dispuesto en las cavidades (140) es agua pesada (D₂O) o agua ligera (H₂O).

- 30 10. El aparato de la reivindicación 7, en donde hay una distribución de tubos de combustible verticales (135) y cada conjunto de cavidades puede ser una pila anular de cavidades (140) que rodea un único tubo vertical de combustible (135).

11. El aparato de la reivindicación 7, en donde la pluralidad de alojamientos se apilan sustancialmente verticales y rodean algunos o todos de al menos un tubo de combustible sustancialmente vertical (135).

- 35 12. El aparato de la reivindicación 7, en donde el moderador fluido de neutrones se mueve desde el al menos uno de la pluralidad de alojamientos a la zona de reflector a través de la parte más baja del al menos uno de la pluralidad de alojamientos es un líquido, y el moderador de neutrones fluido se mueve desde la zona de reflector a al menos uno de la pluralidad de alojamientos a través de la parte más baja del al menos uno de la pluralidad de alojamientos es un líquido.

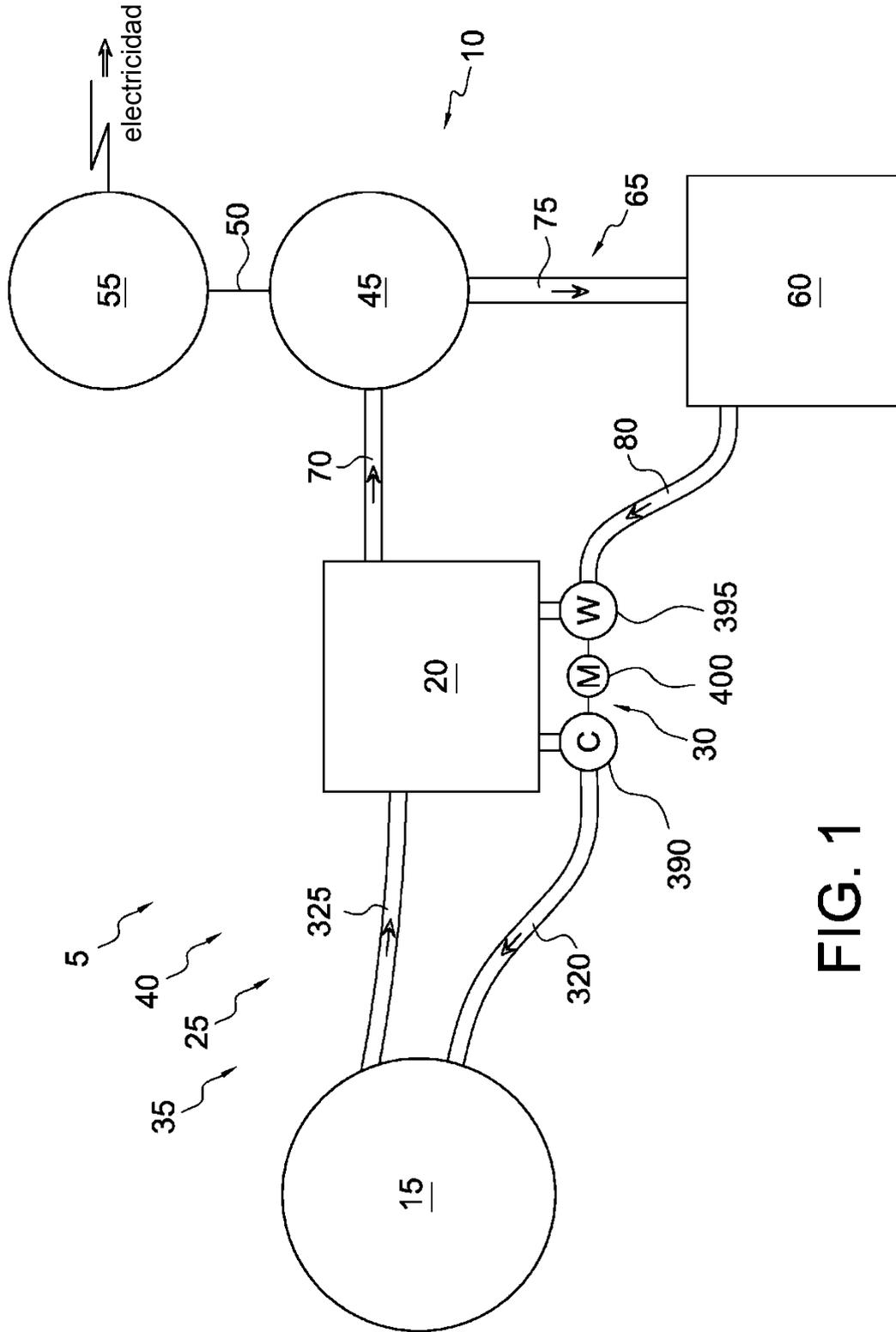


FIG. 1

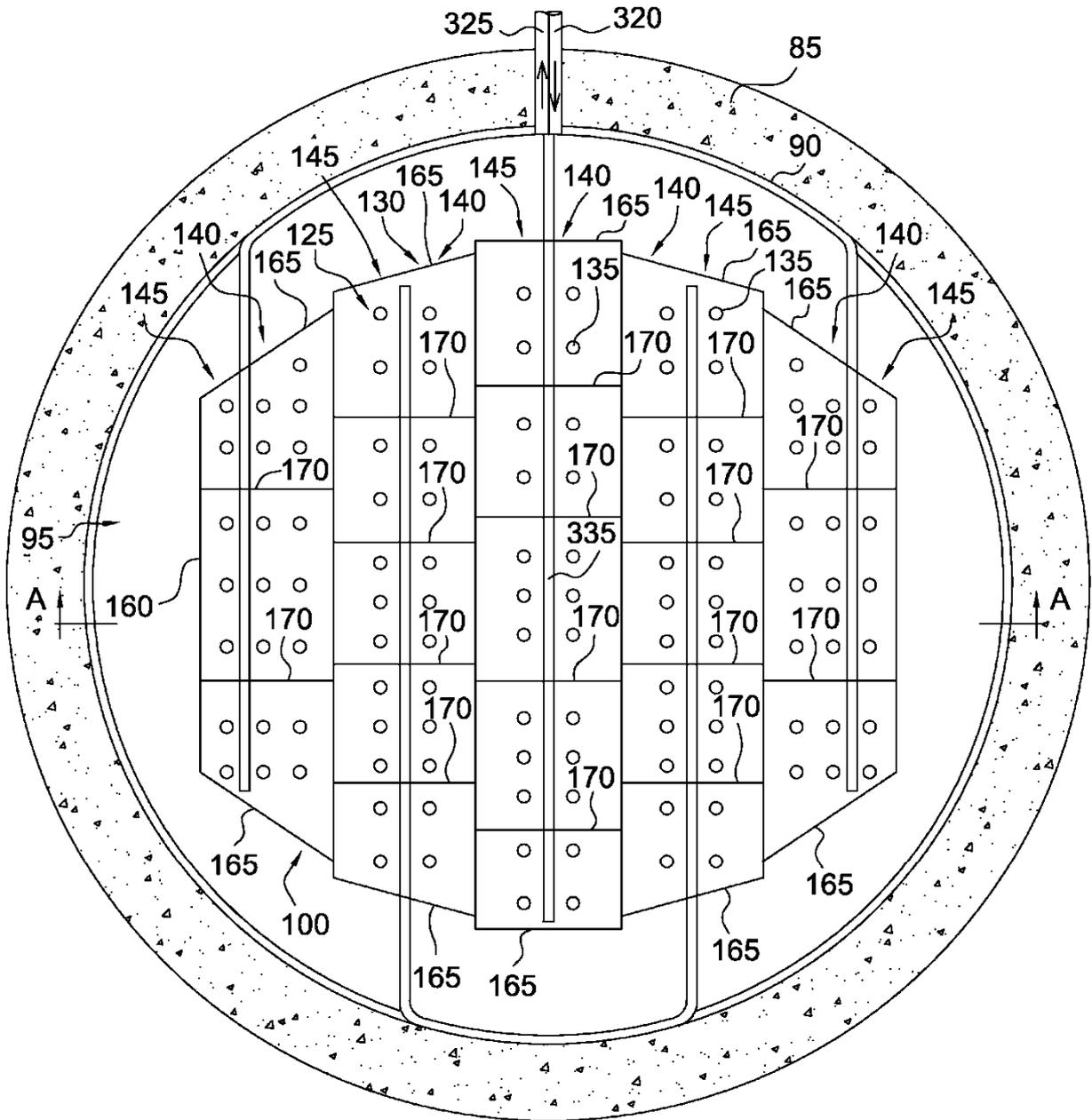


FIG. 2

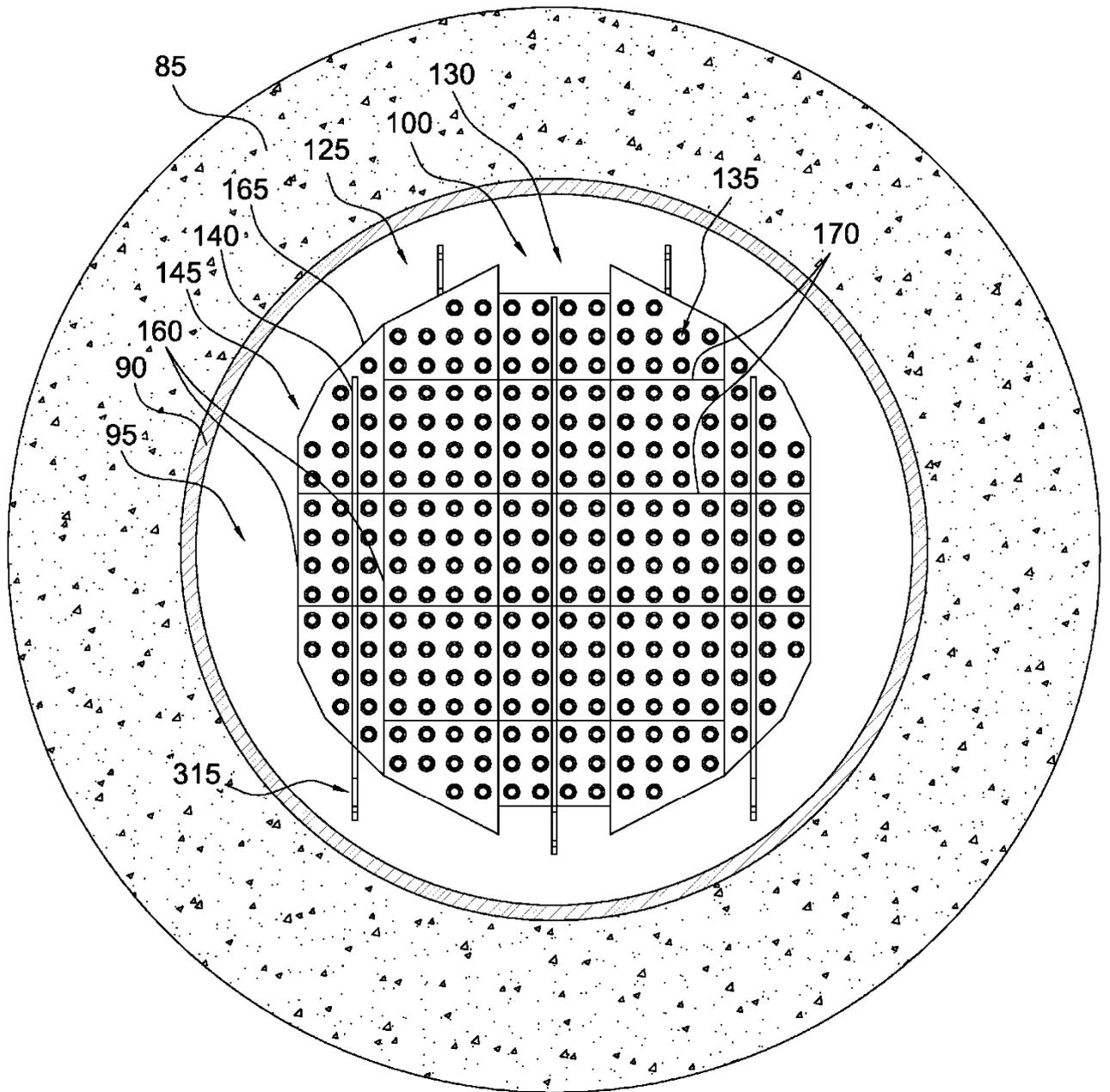


FIG. 2A

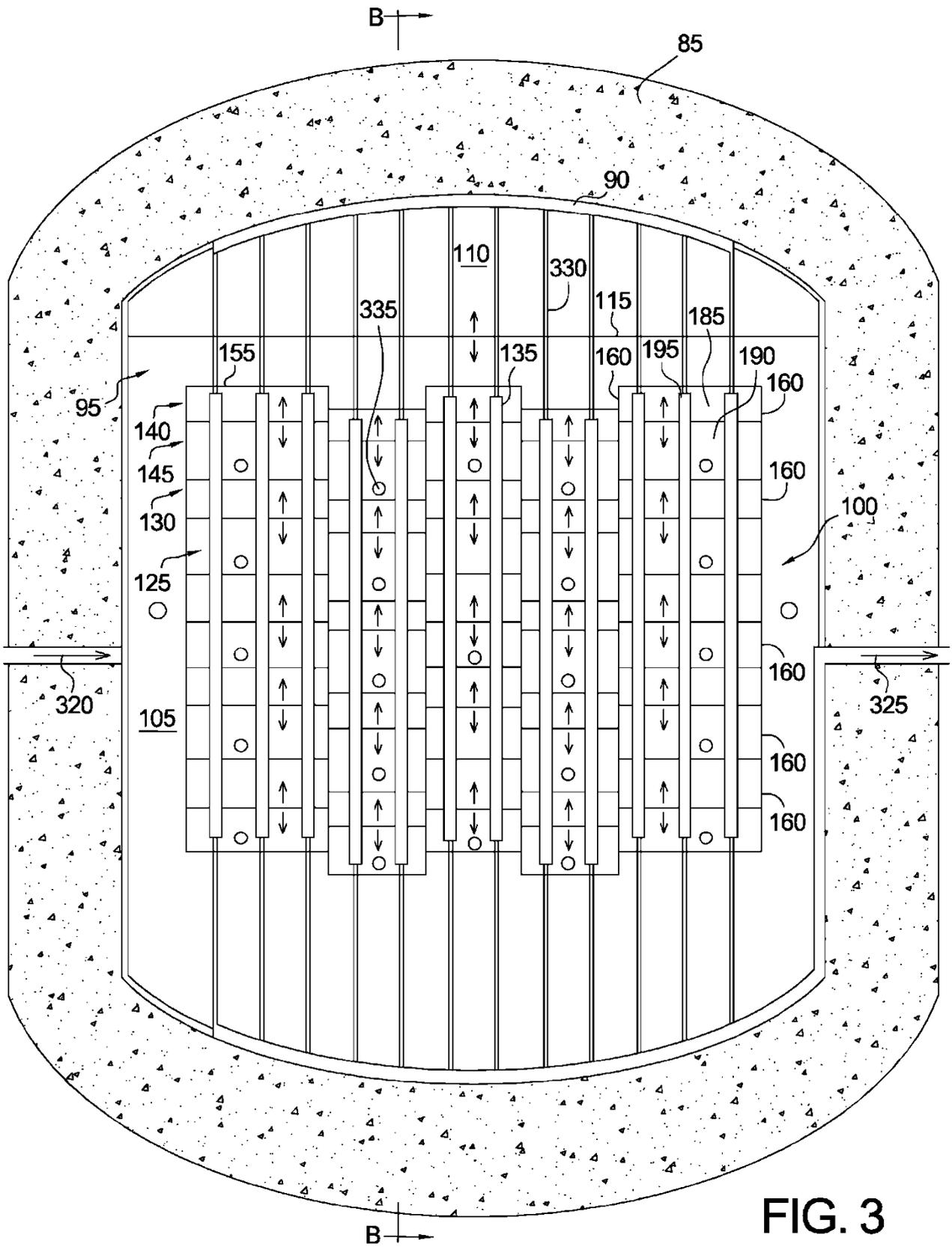


FIG. 3

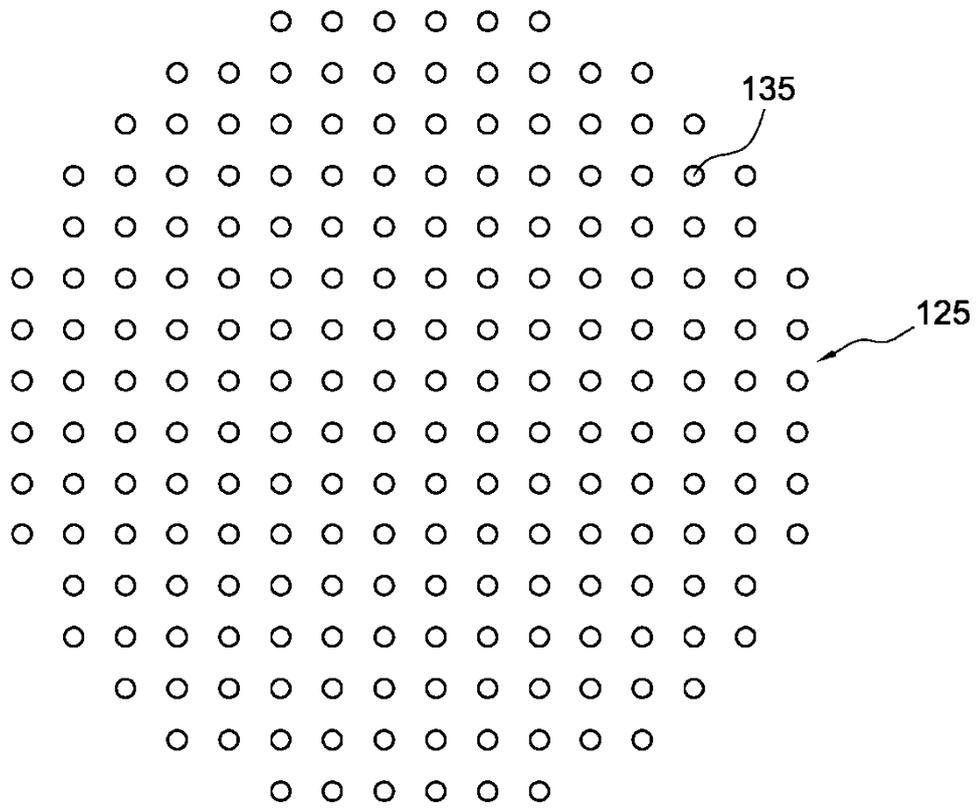


FIG. 4

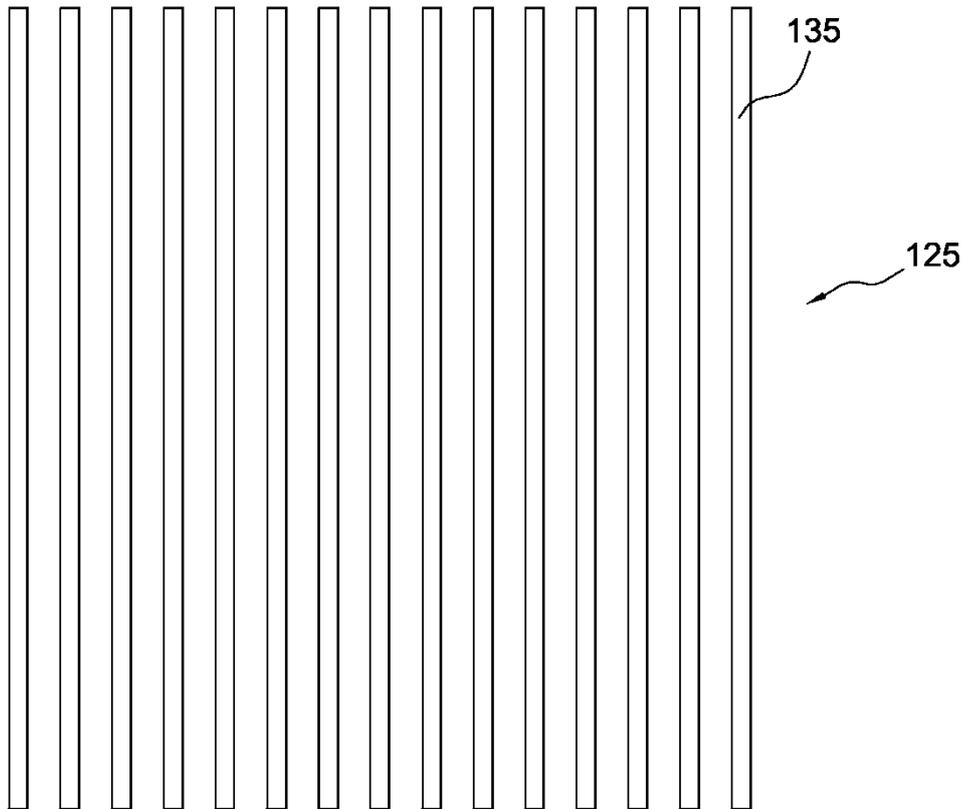


FIG. 5

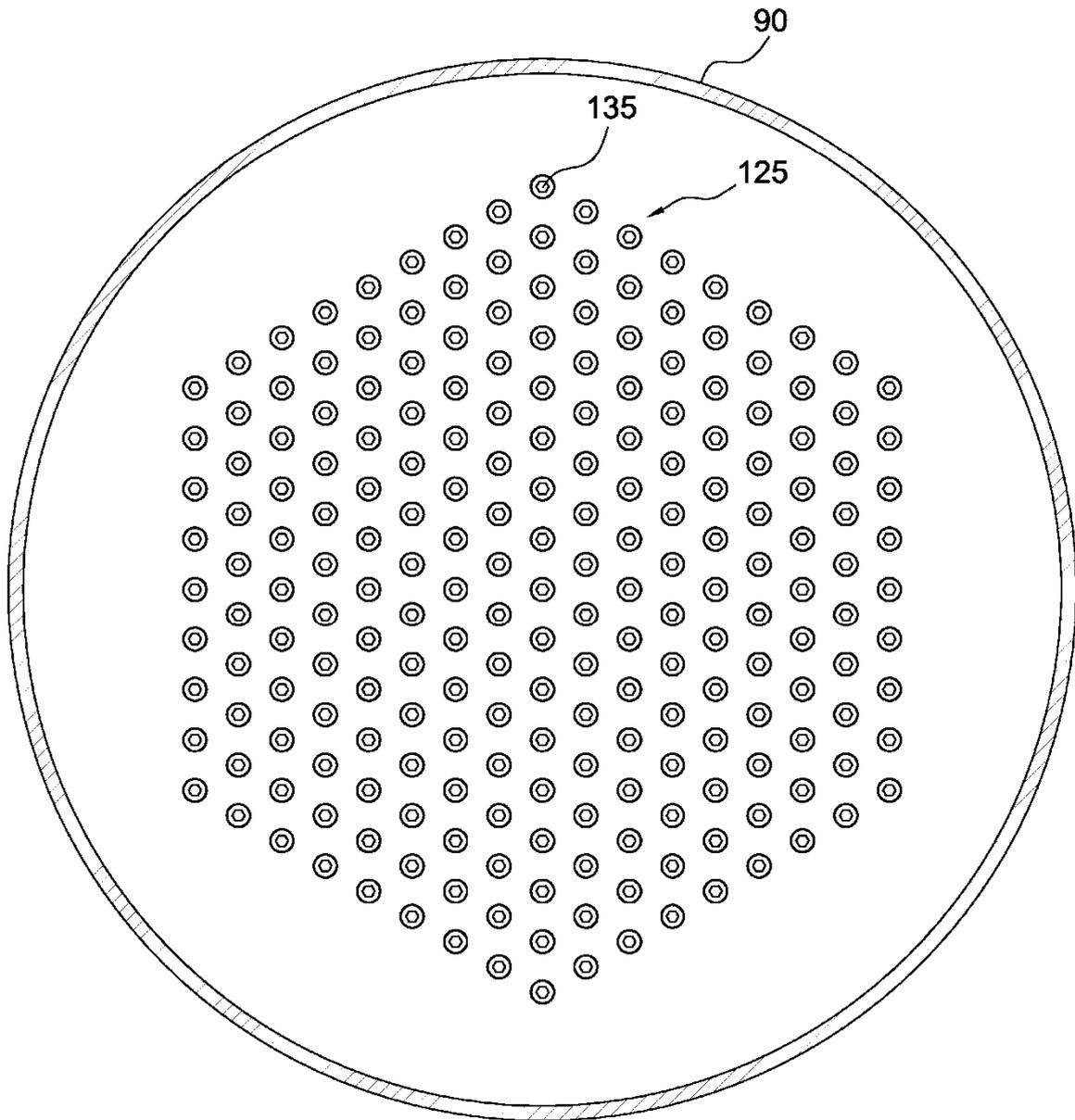


FIG. 6

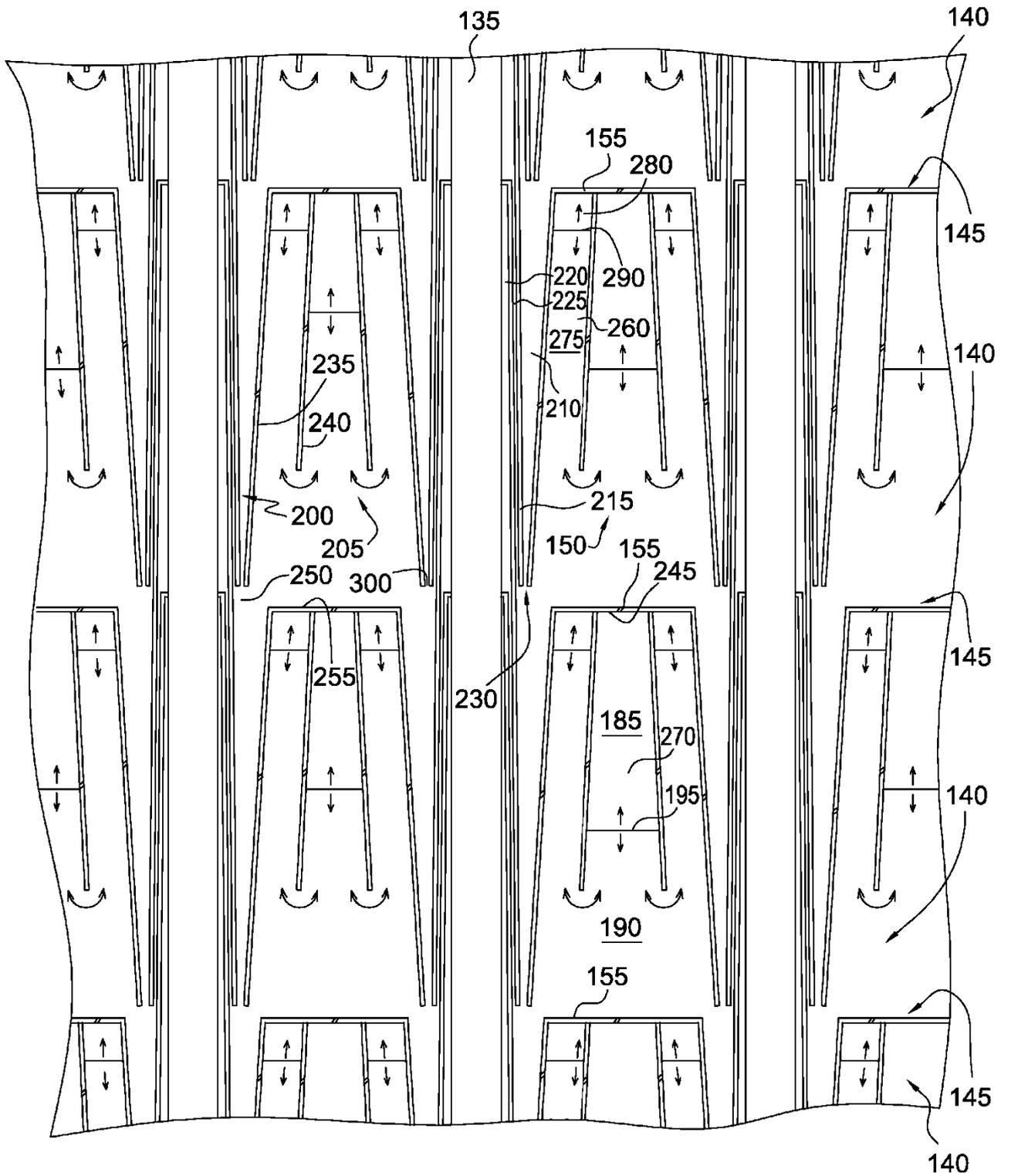


FIG. 8

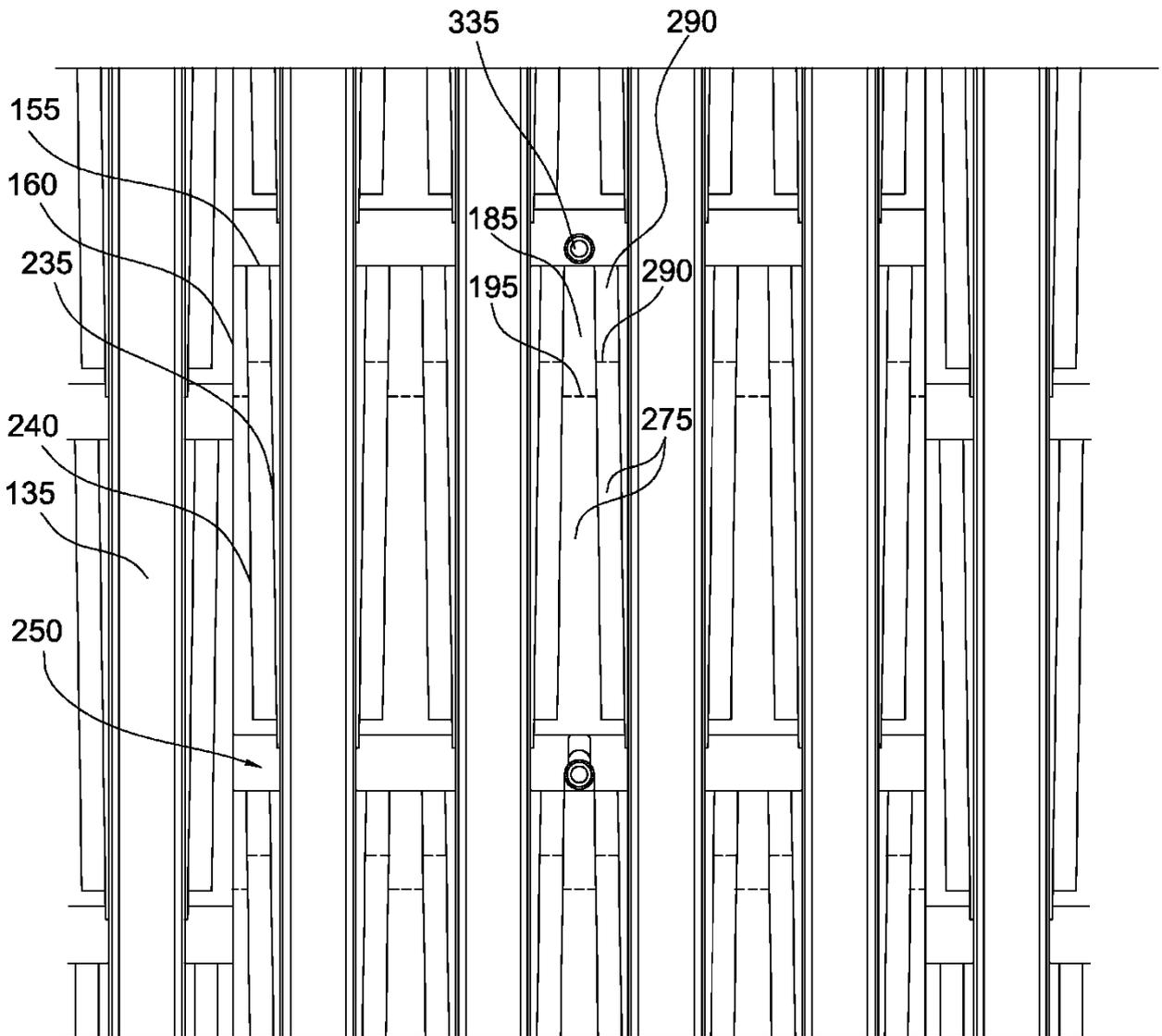


FIG. 8A

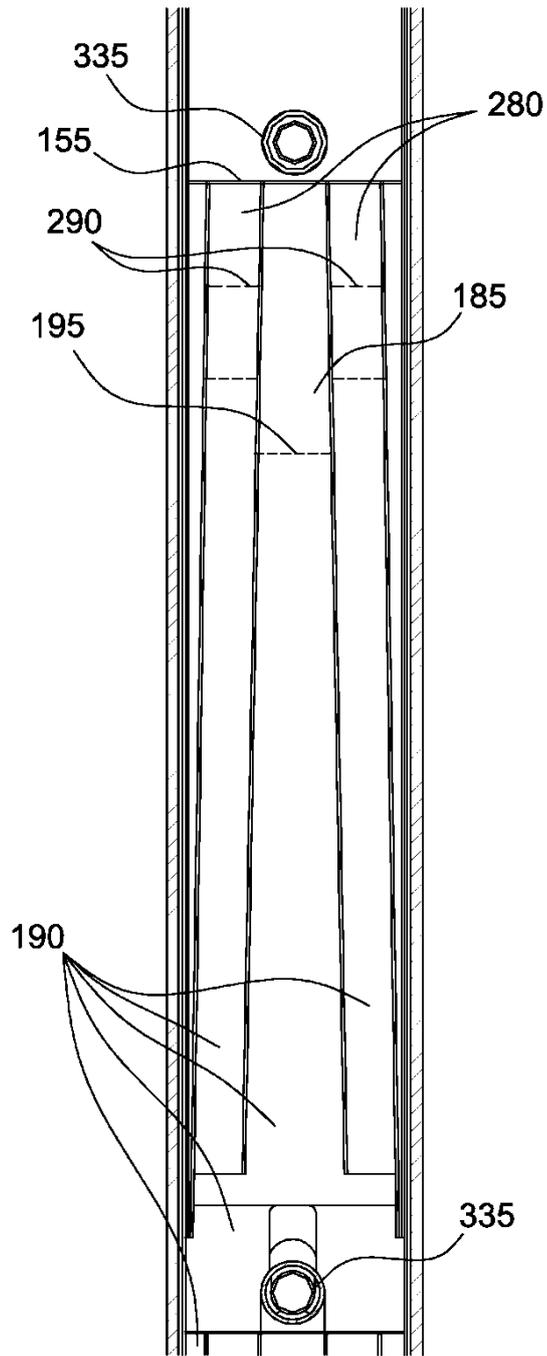


FIG. 8B

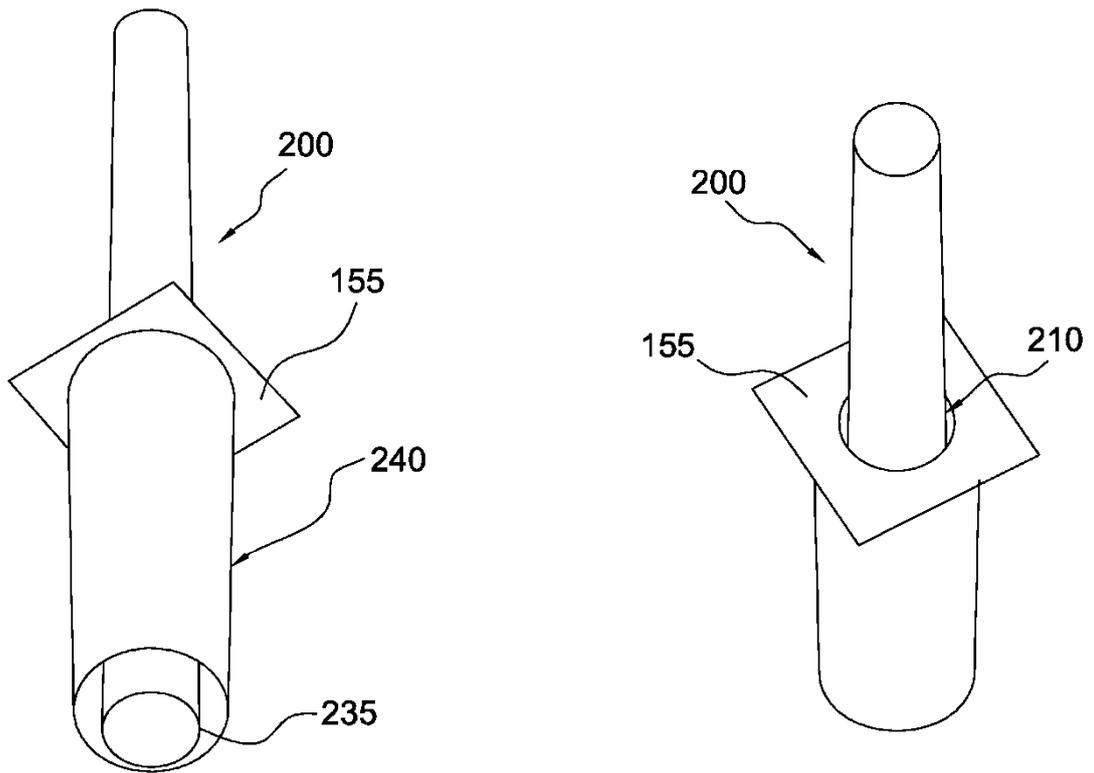


FIG. 8C

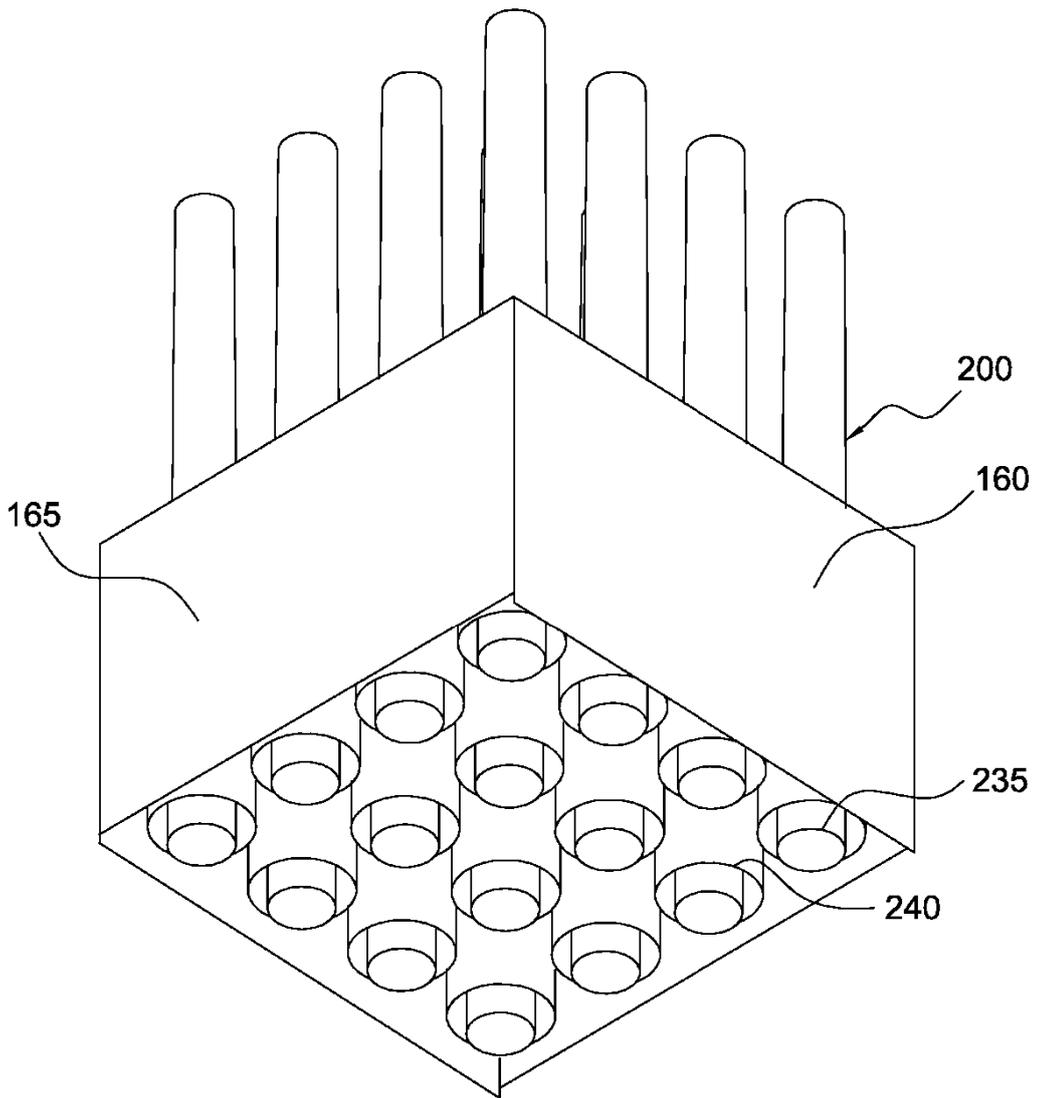


FIG. 8D

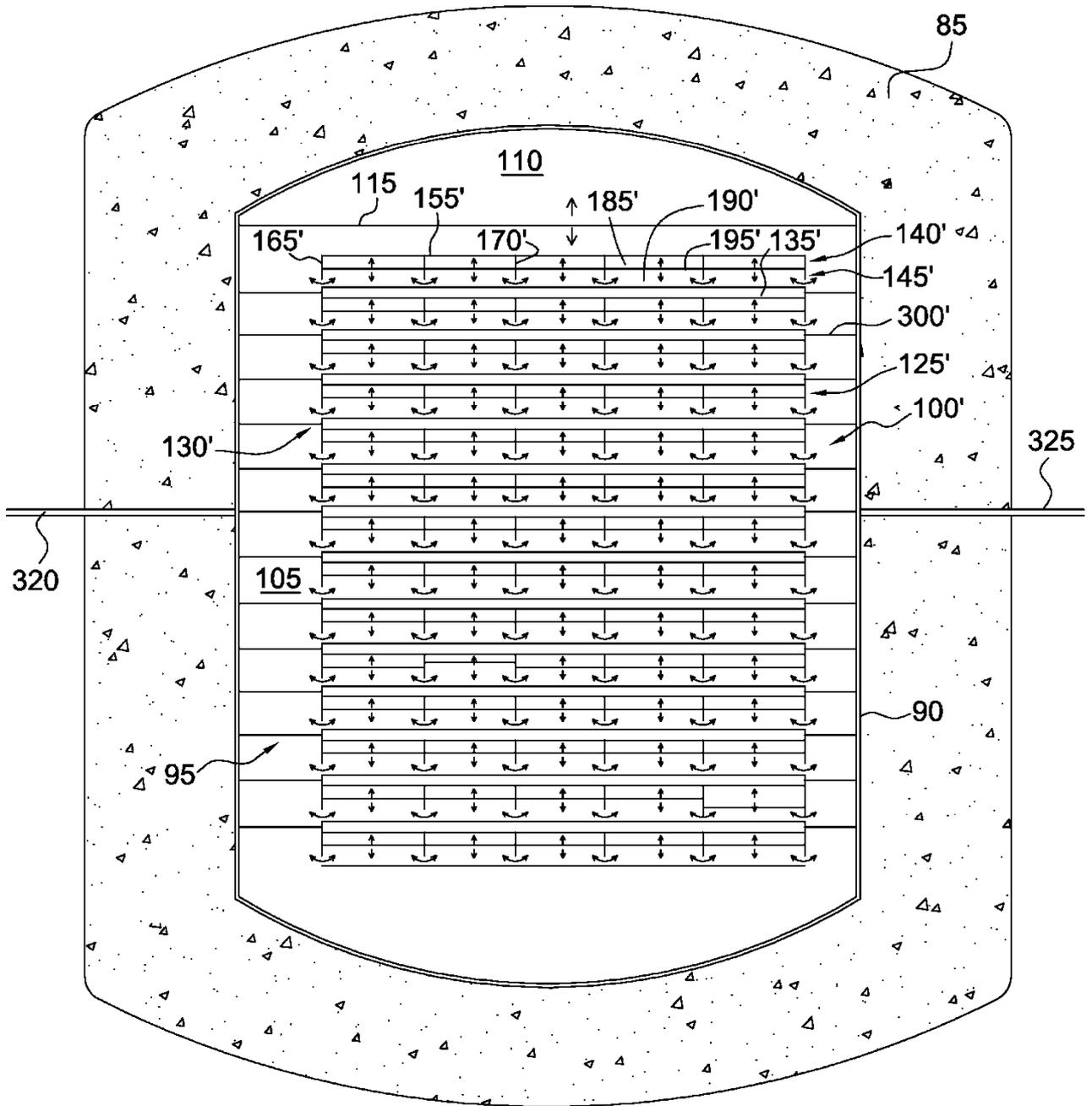


FIG. 9

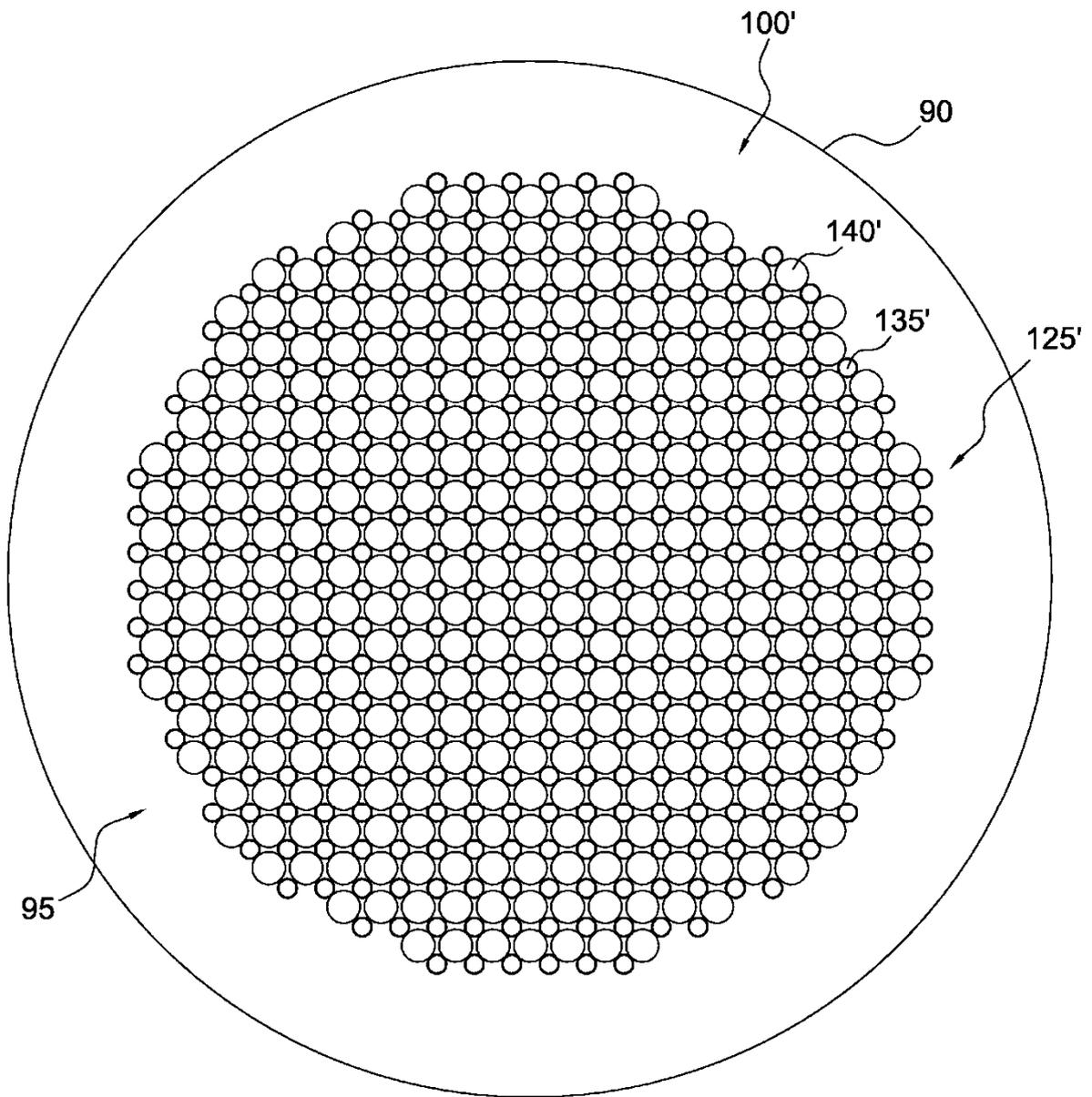


FIG. 10

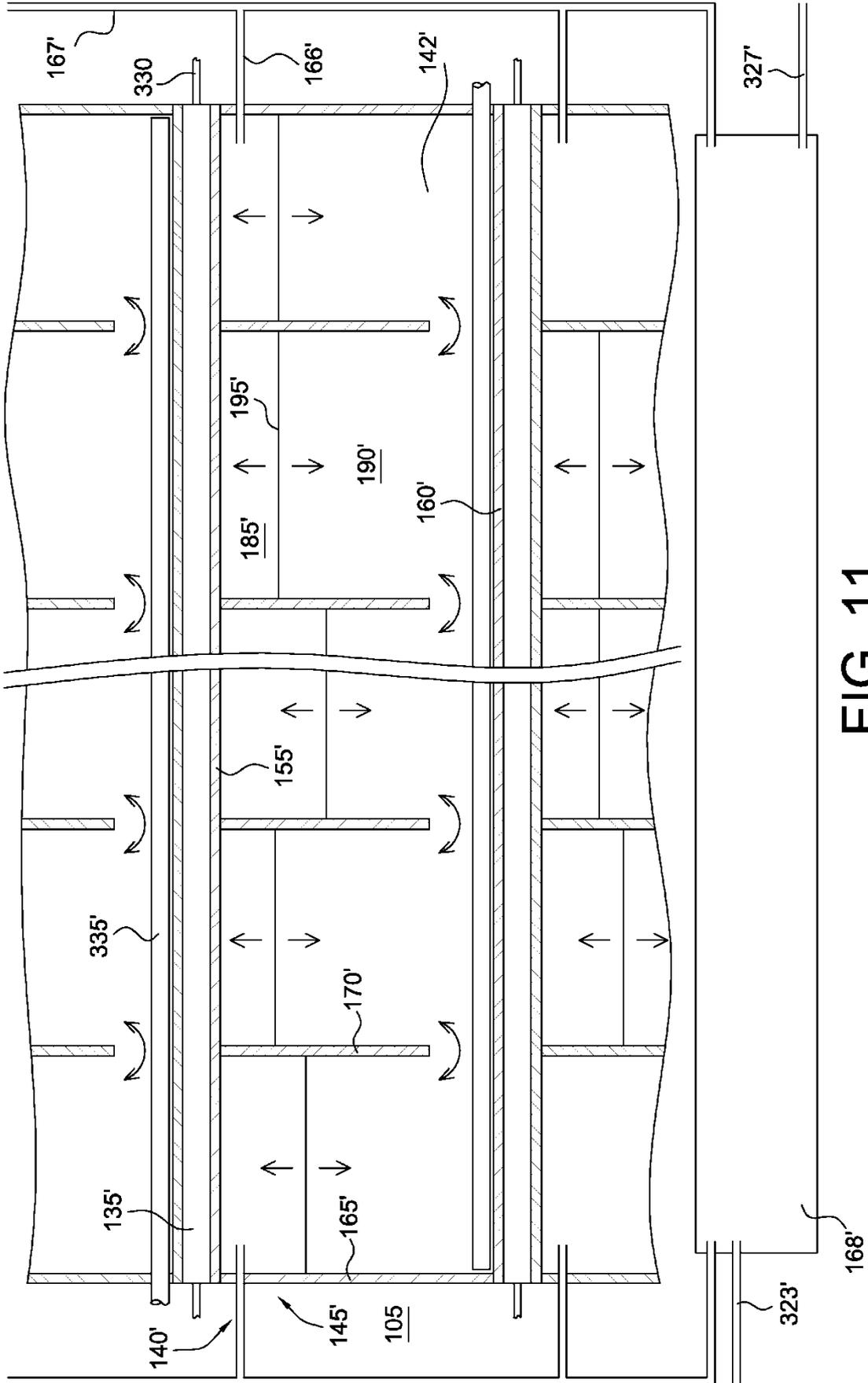


FIG. 11

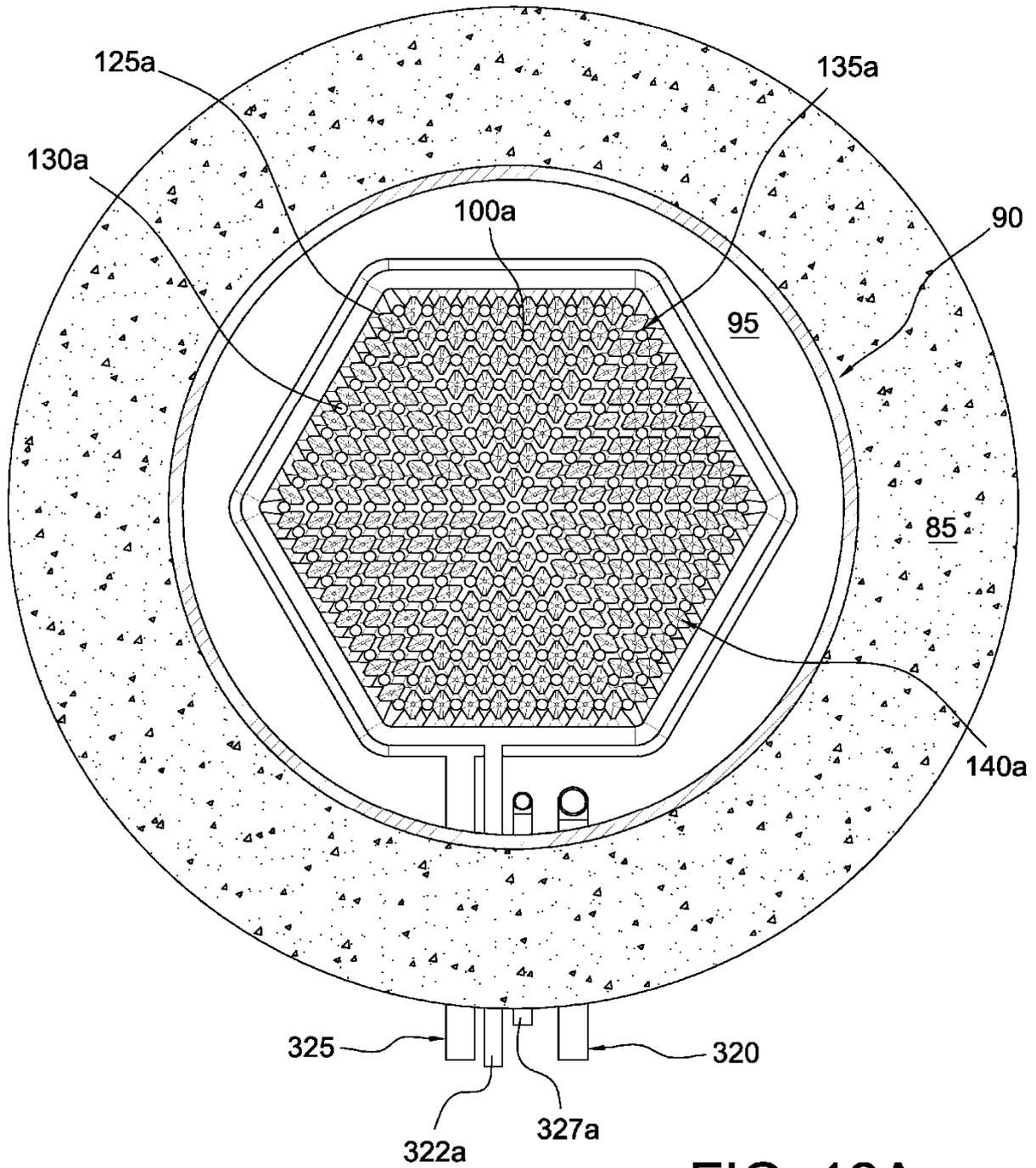


FIG. 12A

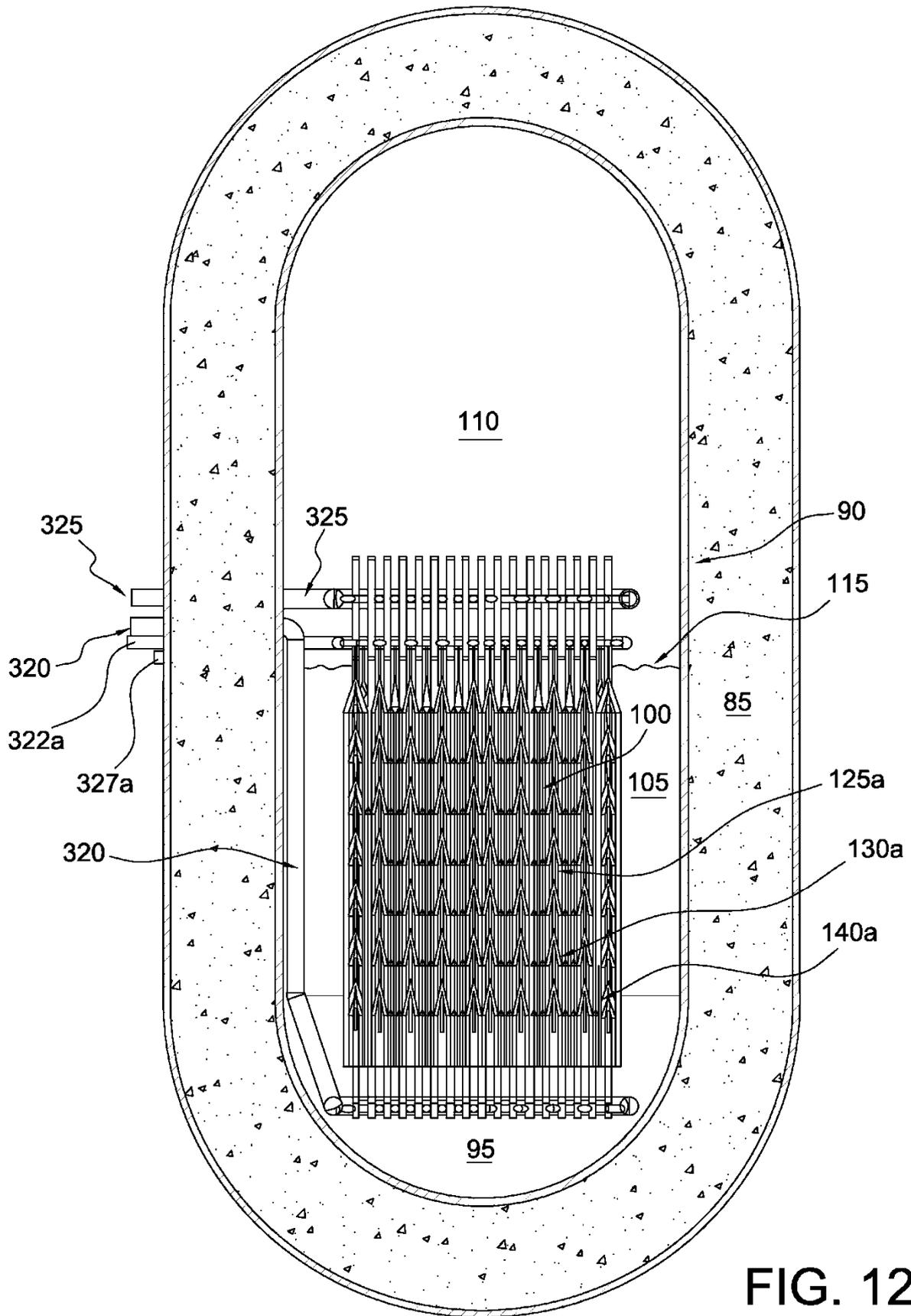


FIG. 12B

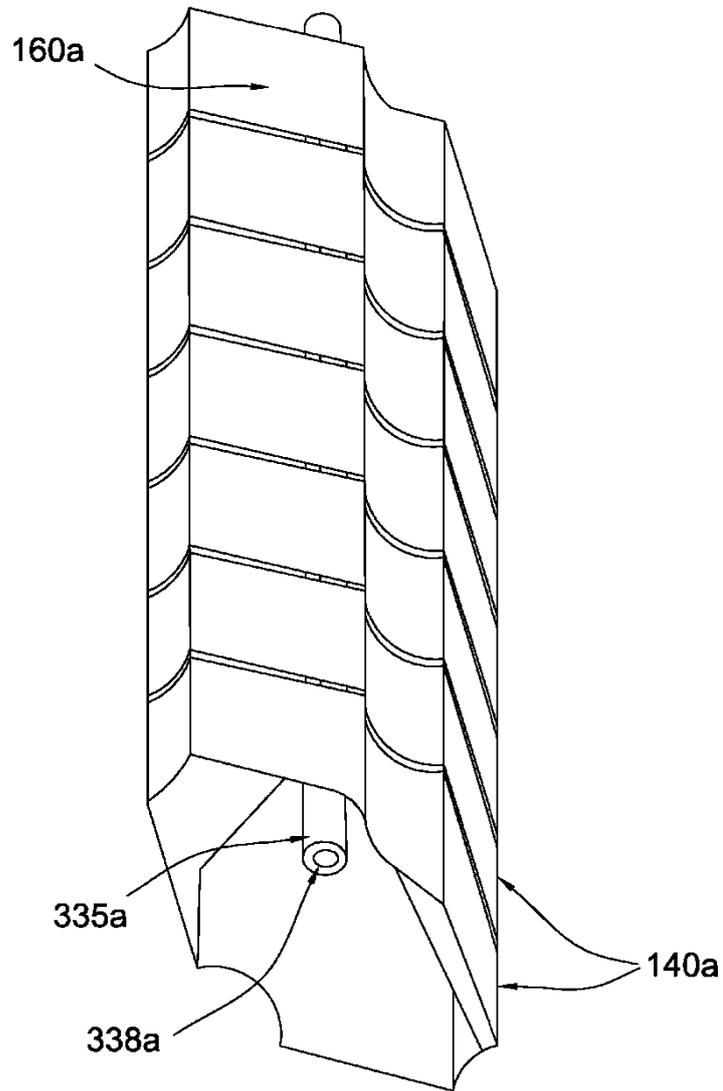


FIG. 12C

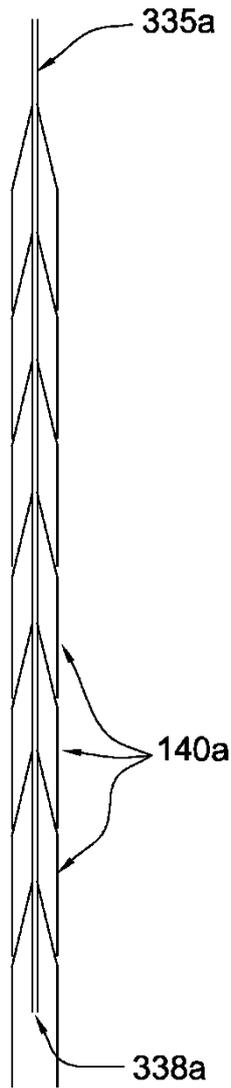


FIG. 12D

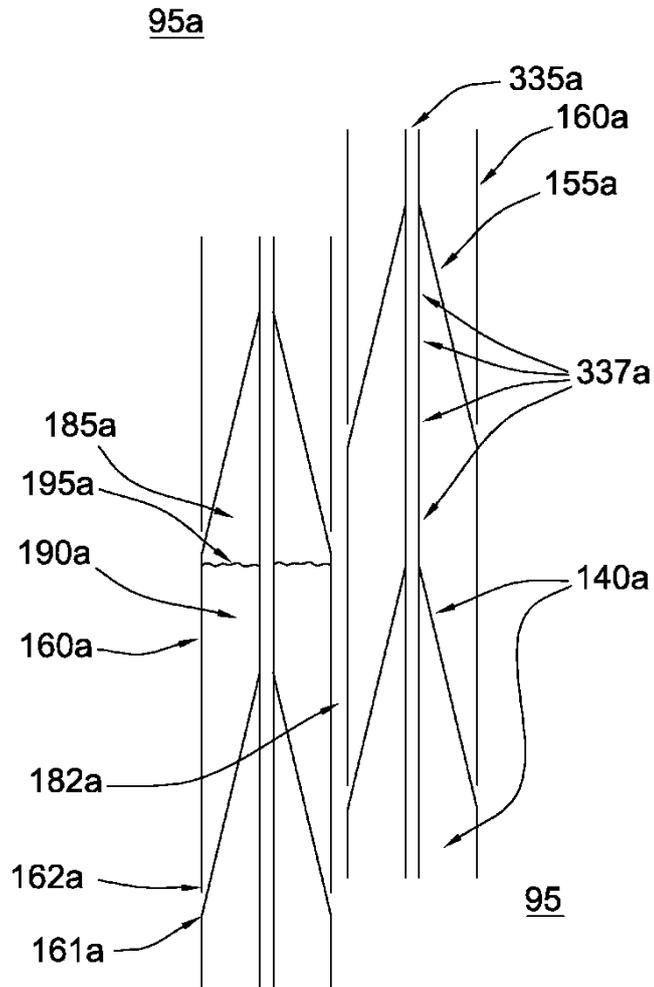


FIG. 12E

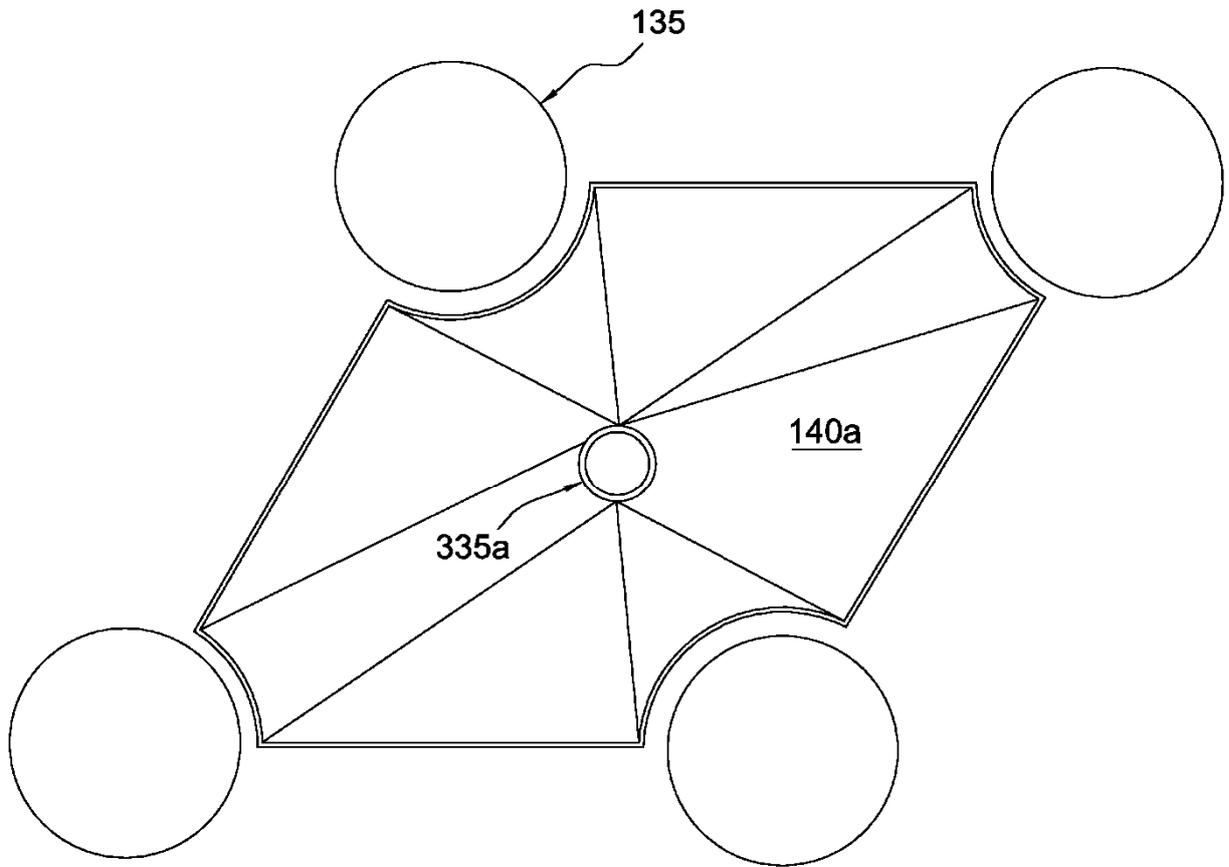


FIG. 12F

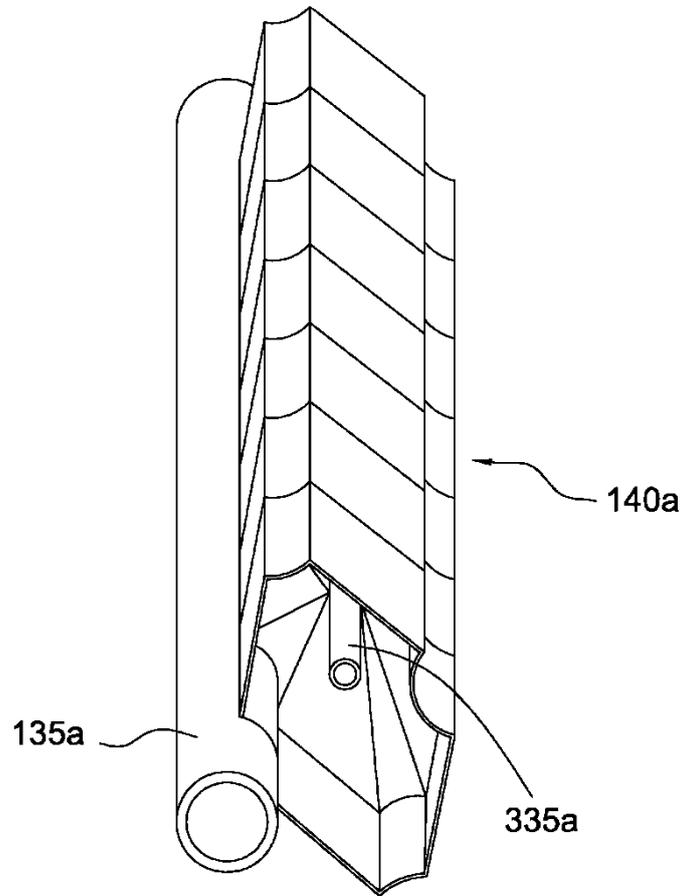


FIG. 12G

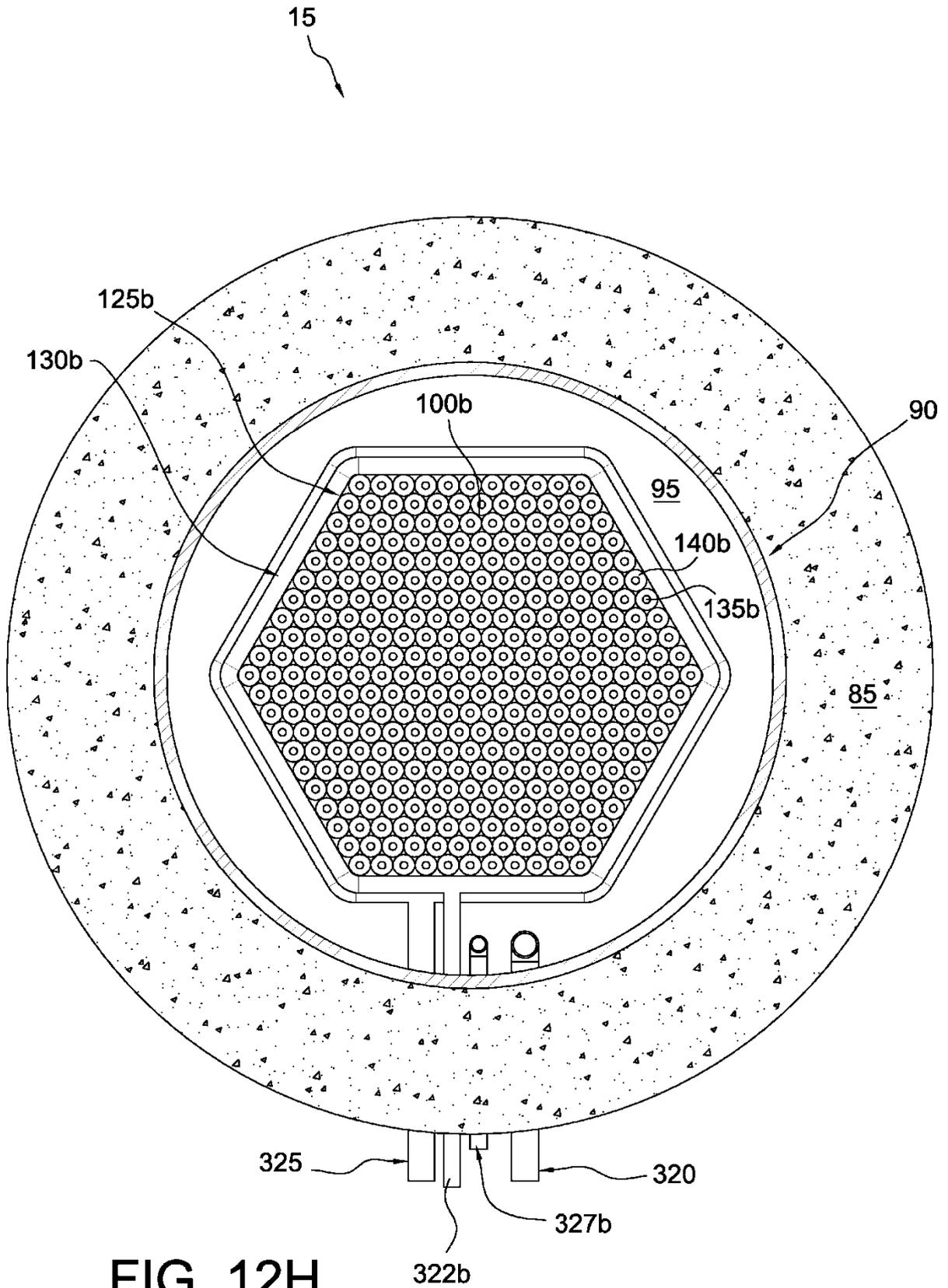


FIG. 12H

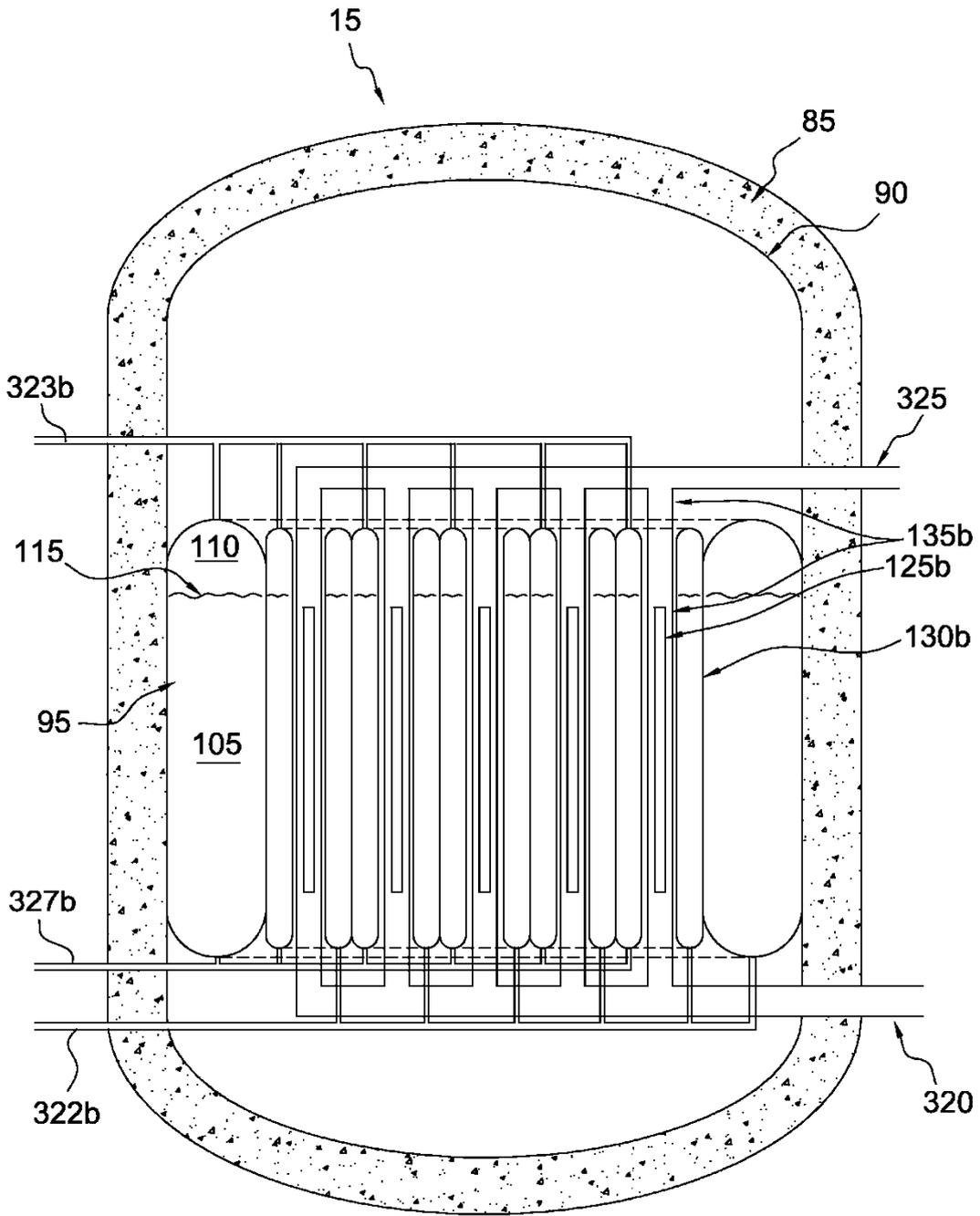


FIG. 12I

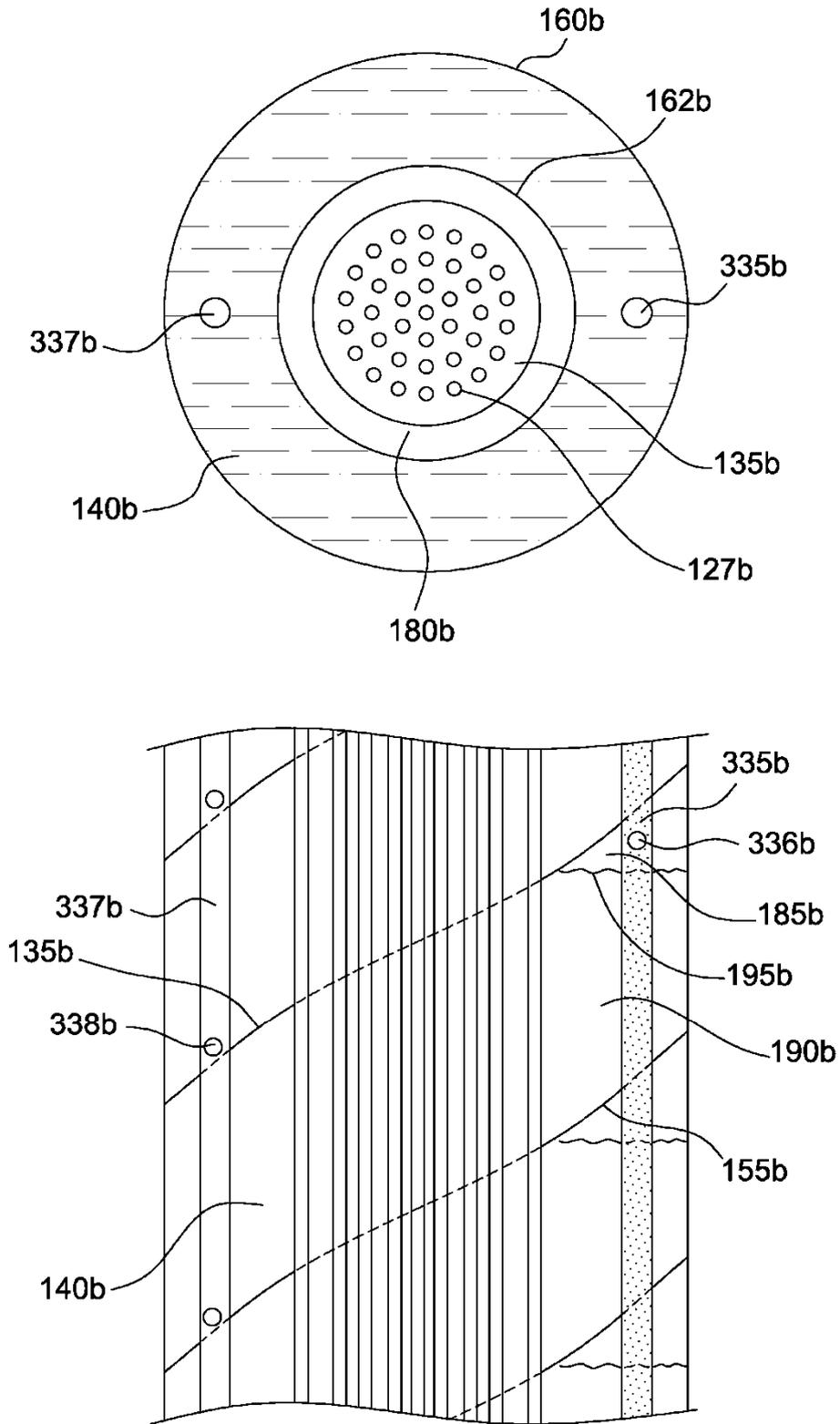


FIG. 12J

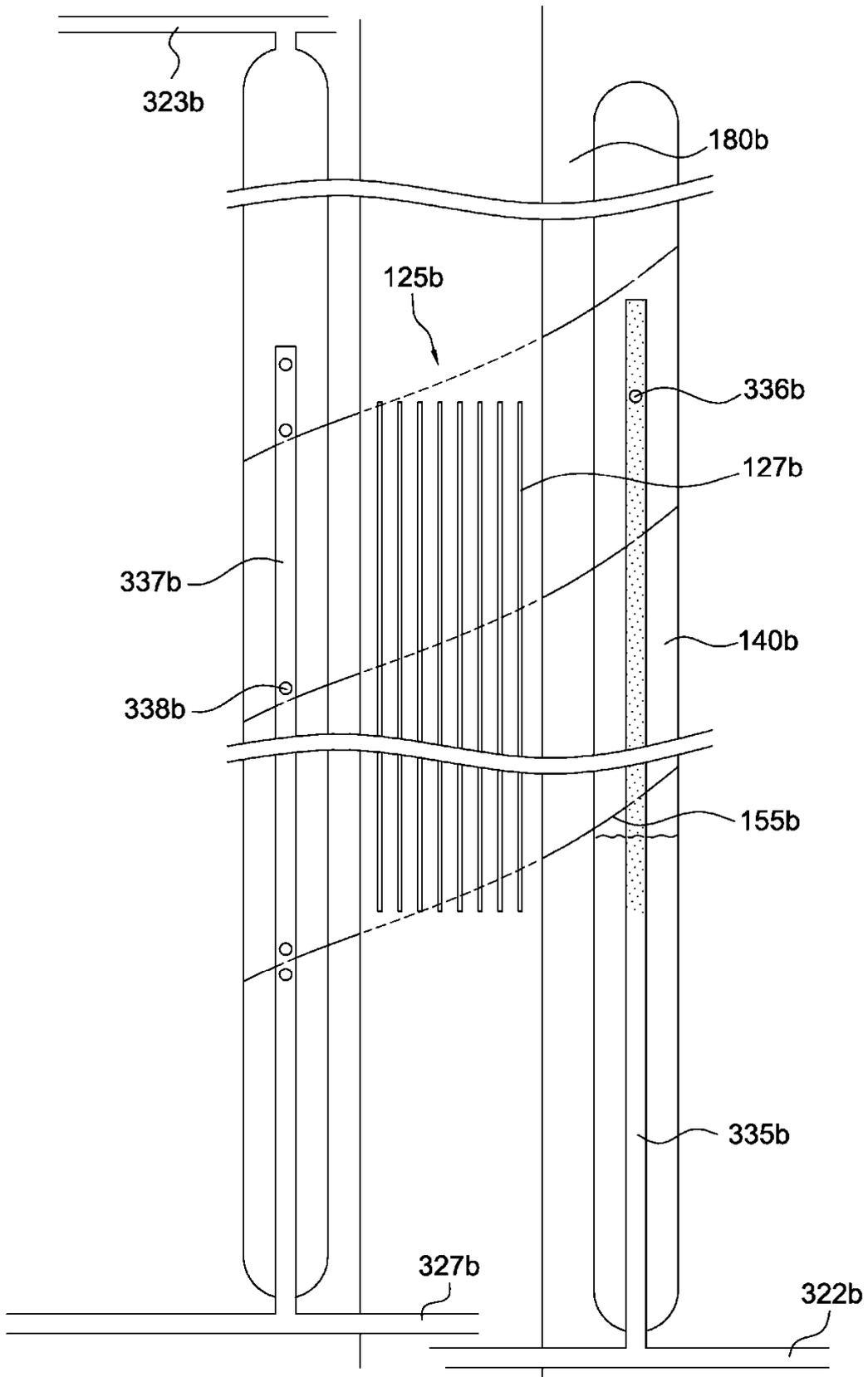


FIG. 12K

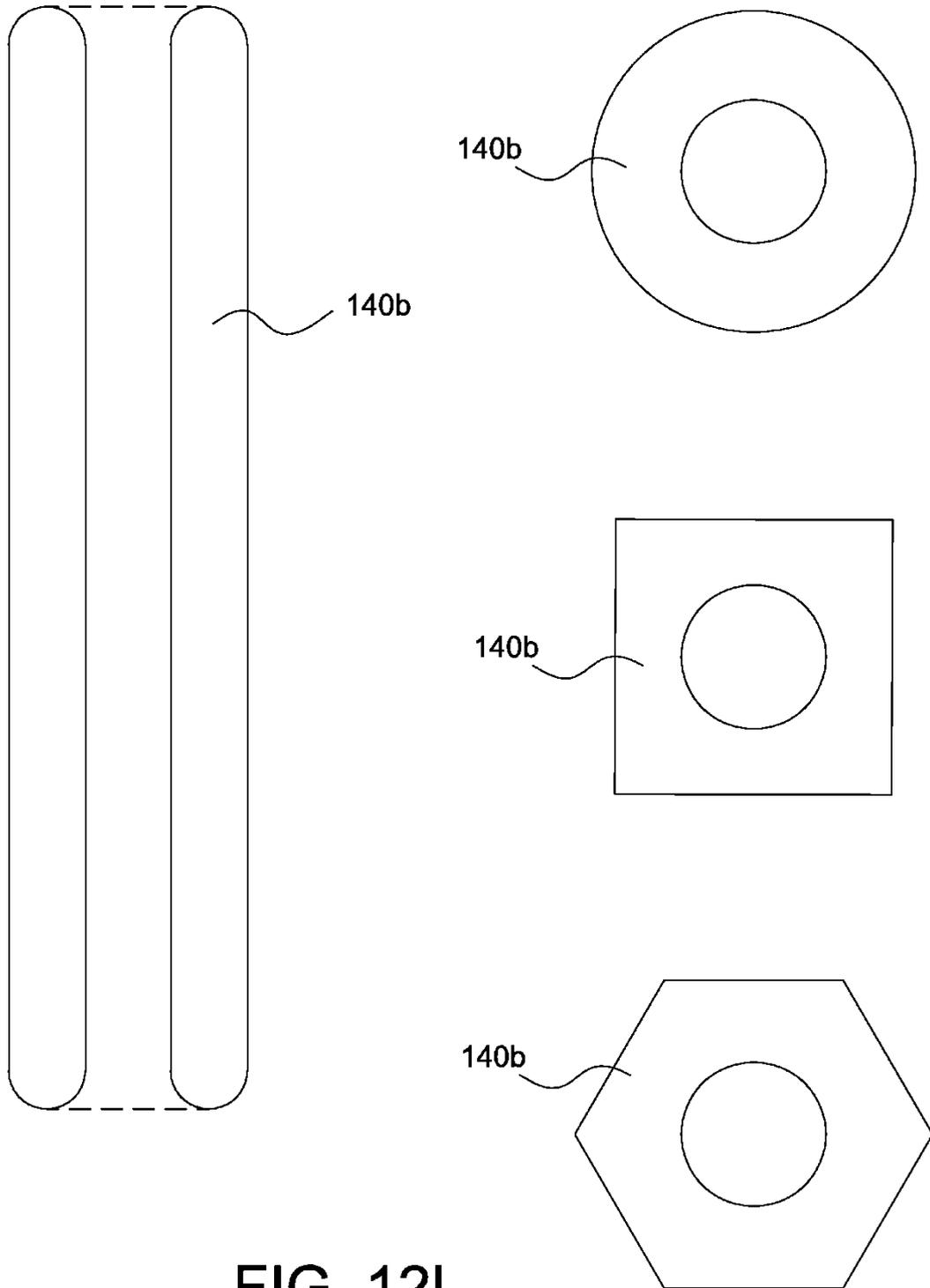


FIG. 12L

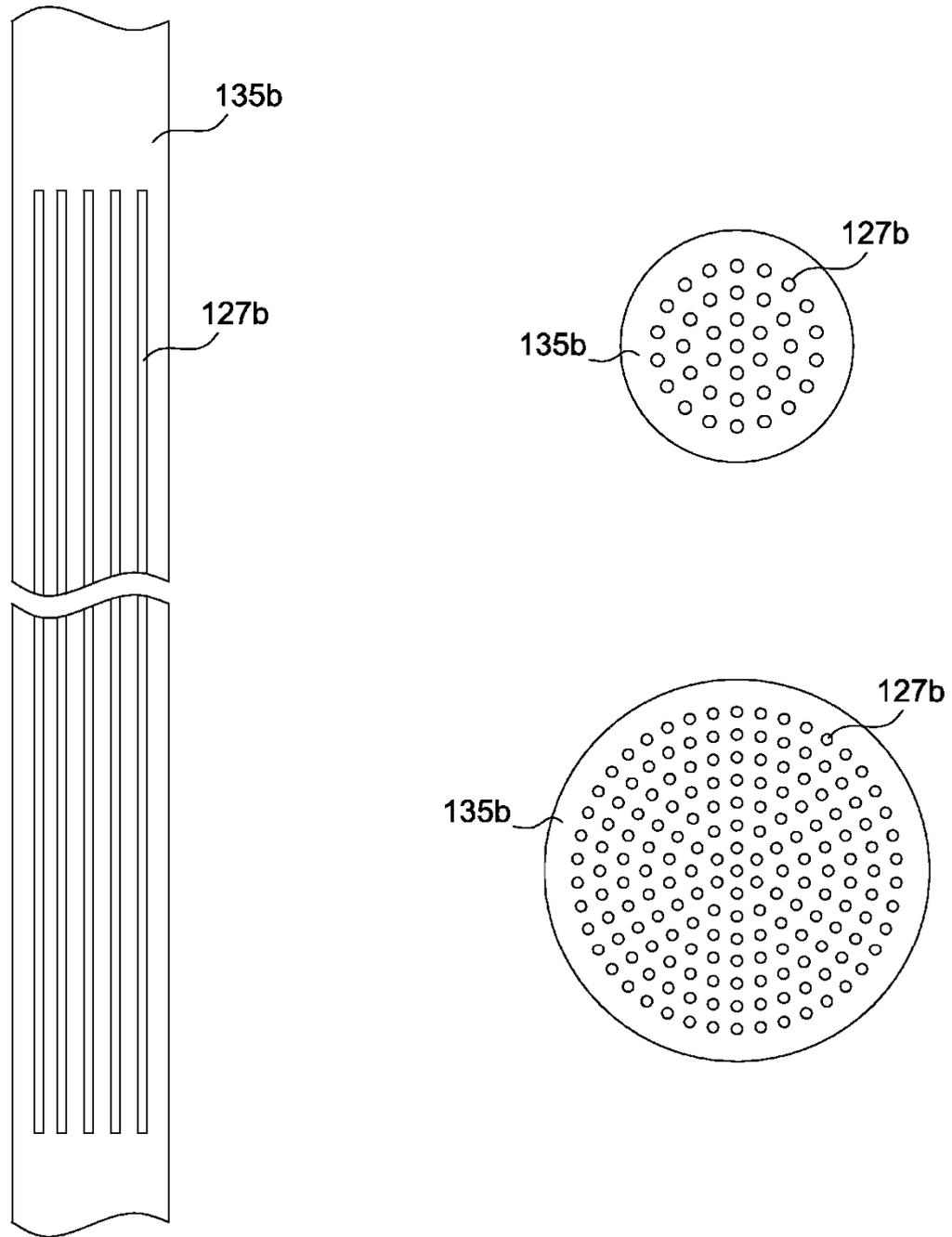


FIG. 12M

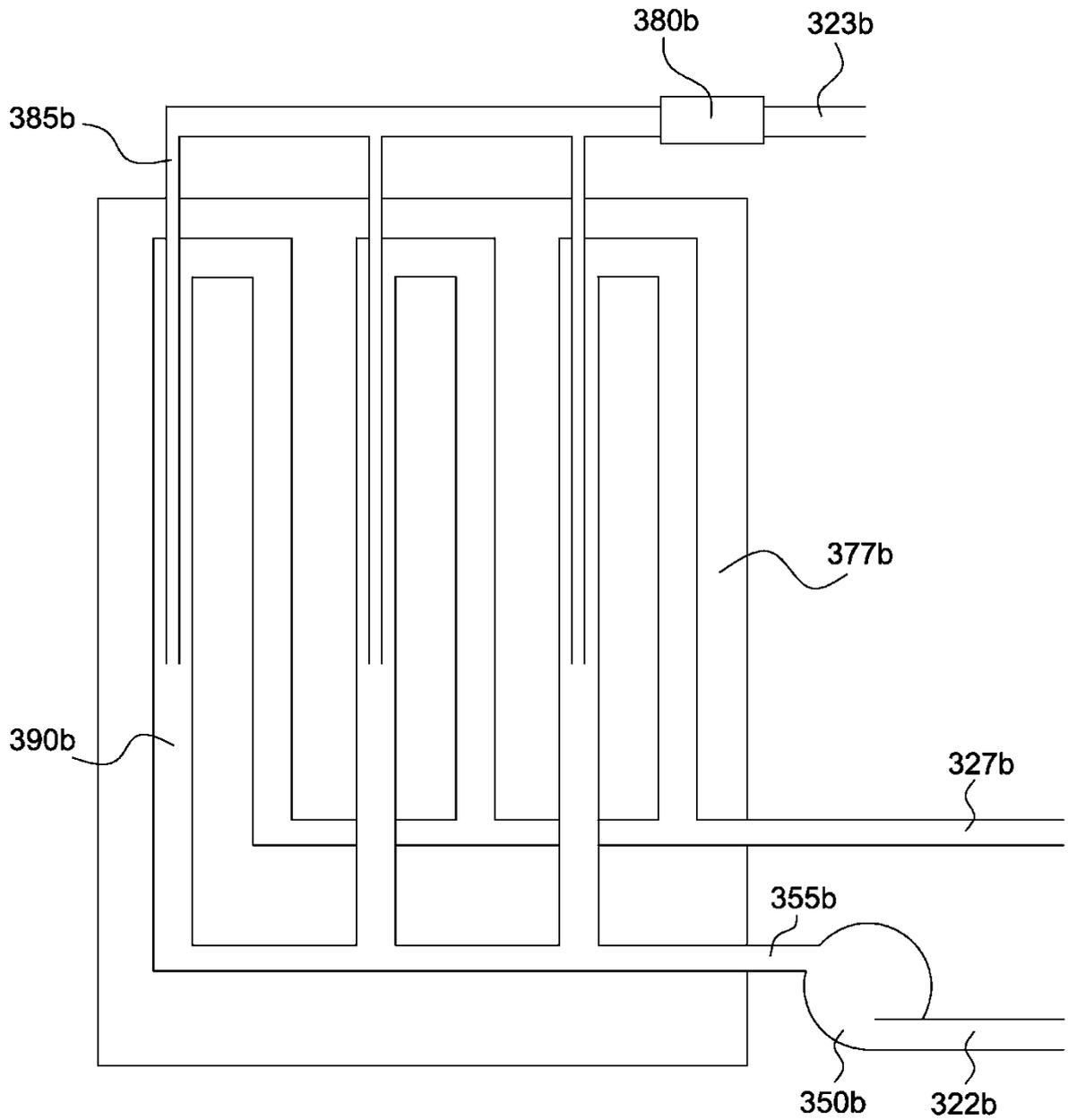


FIG. 12N

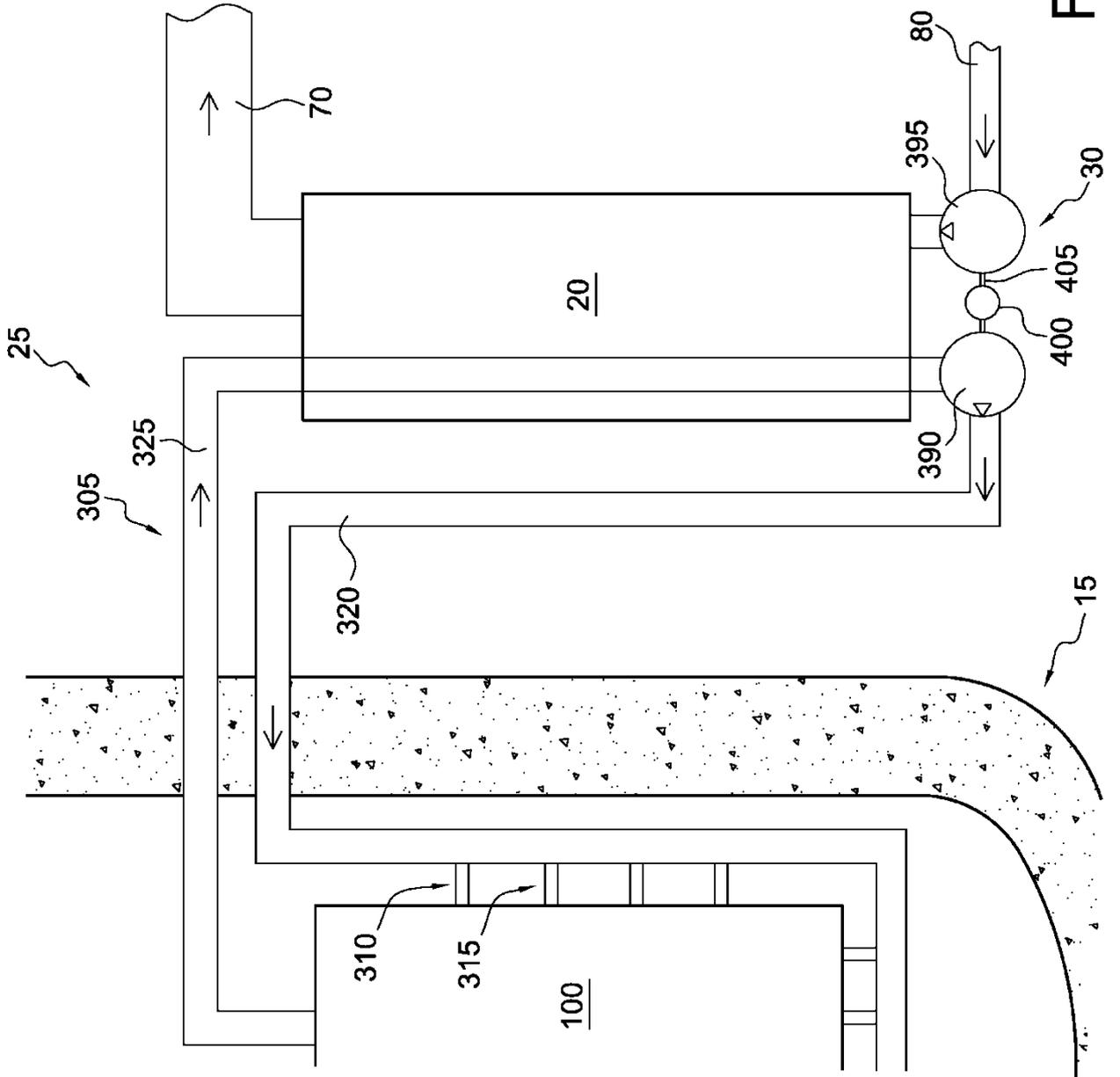


FIG. 13

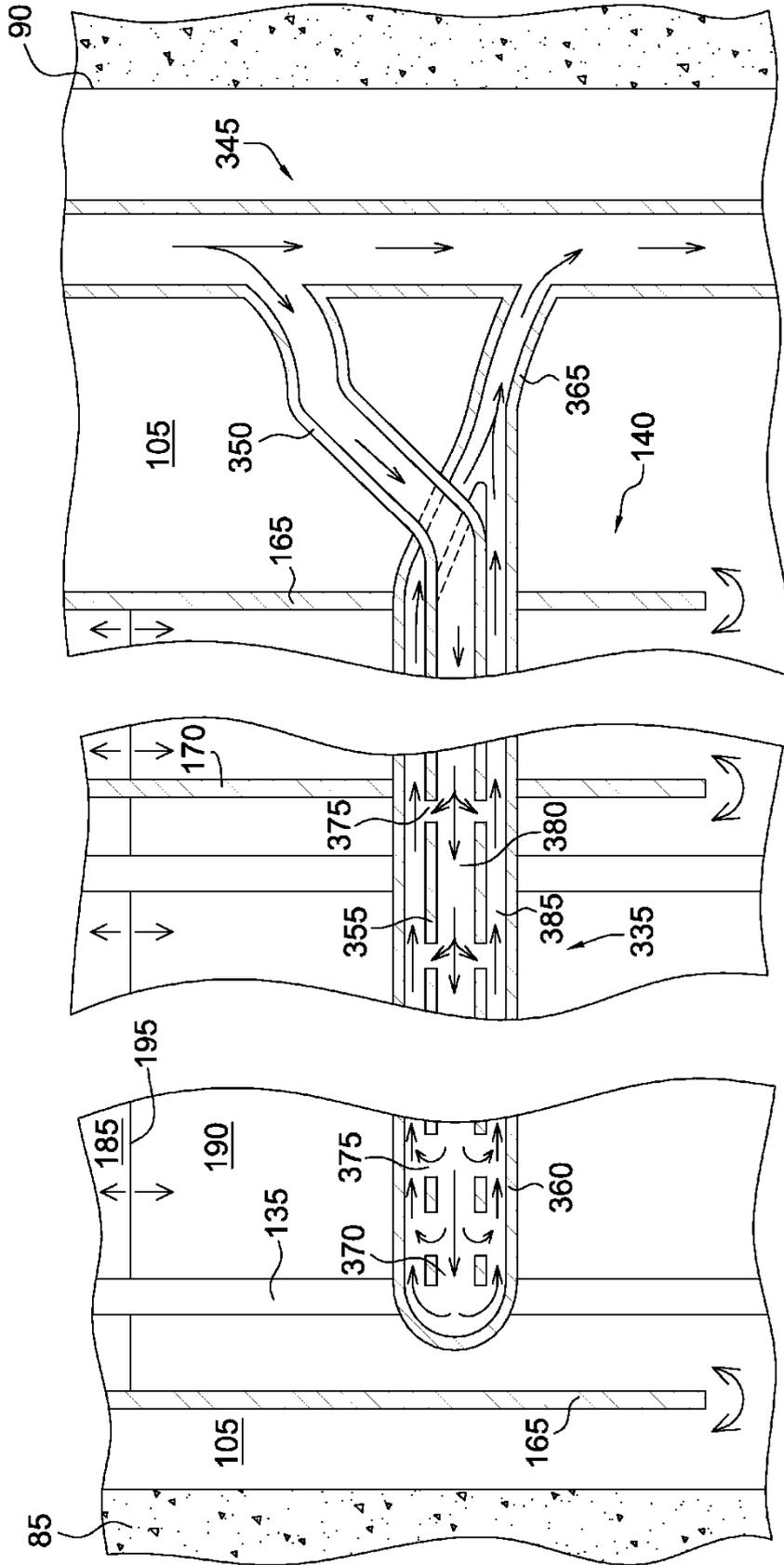


FIG. 14

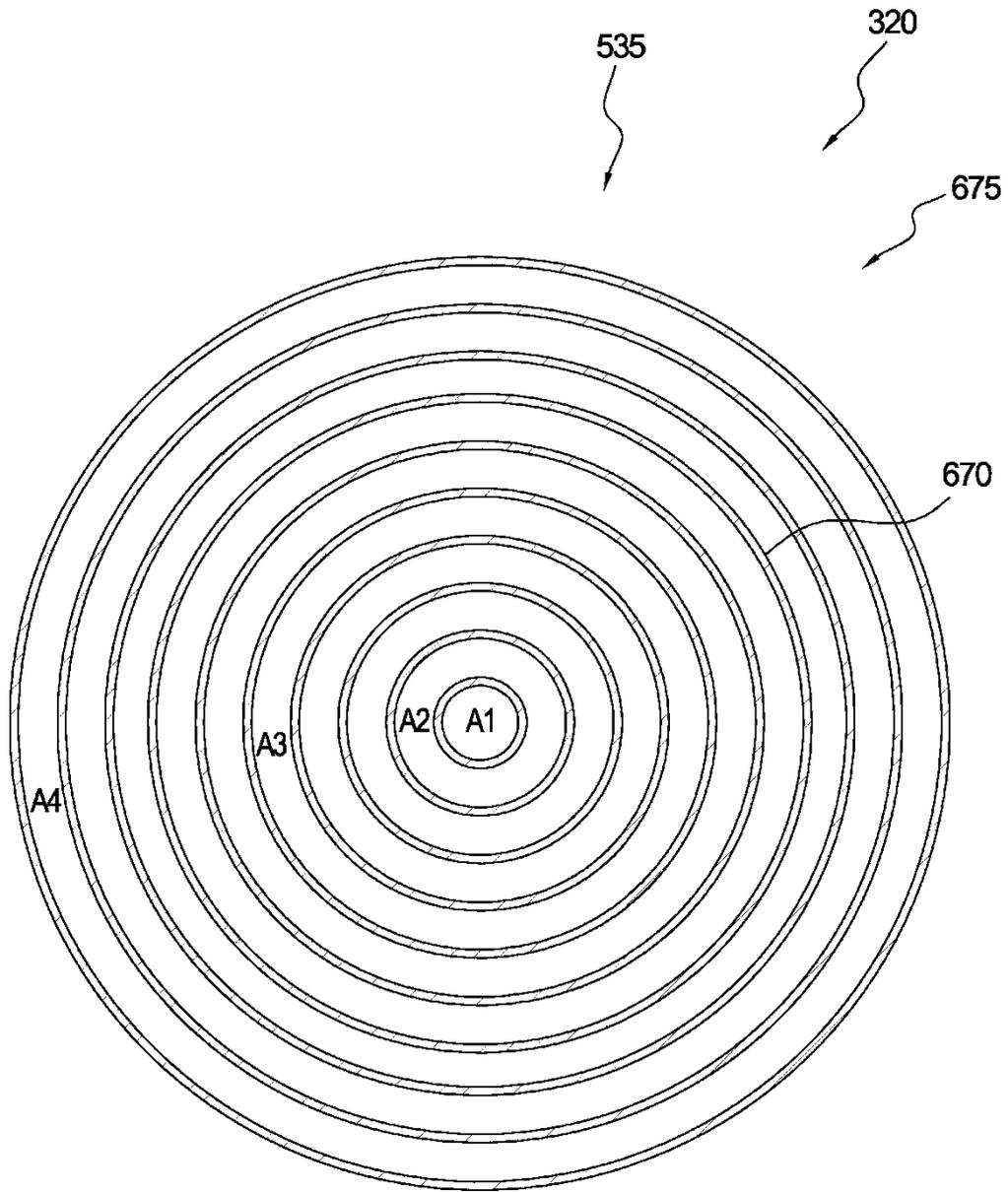


FIG. 15

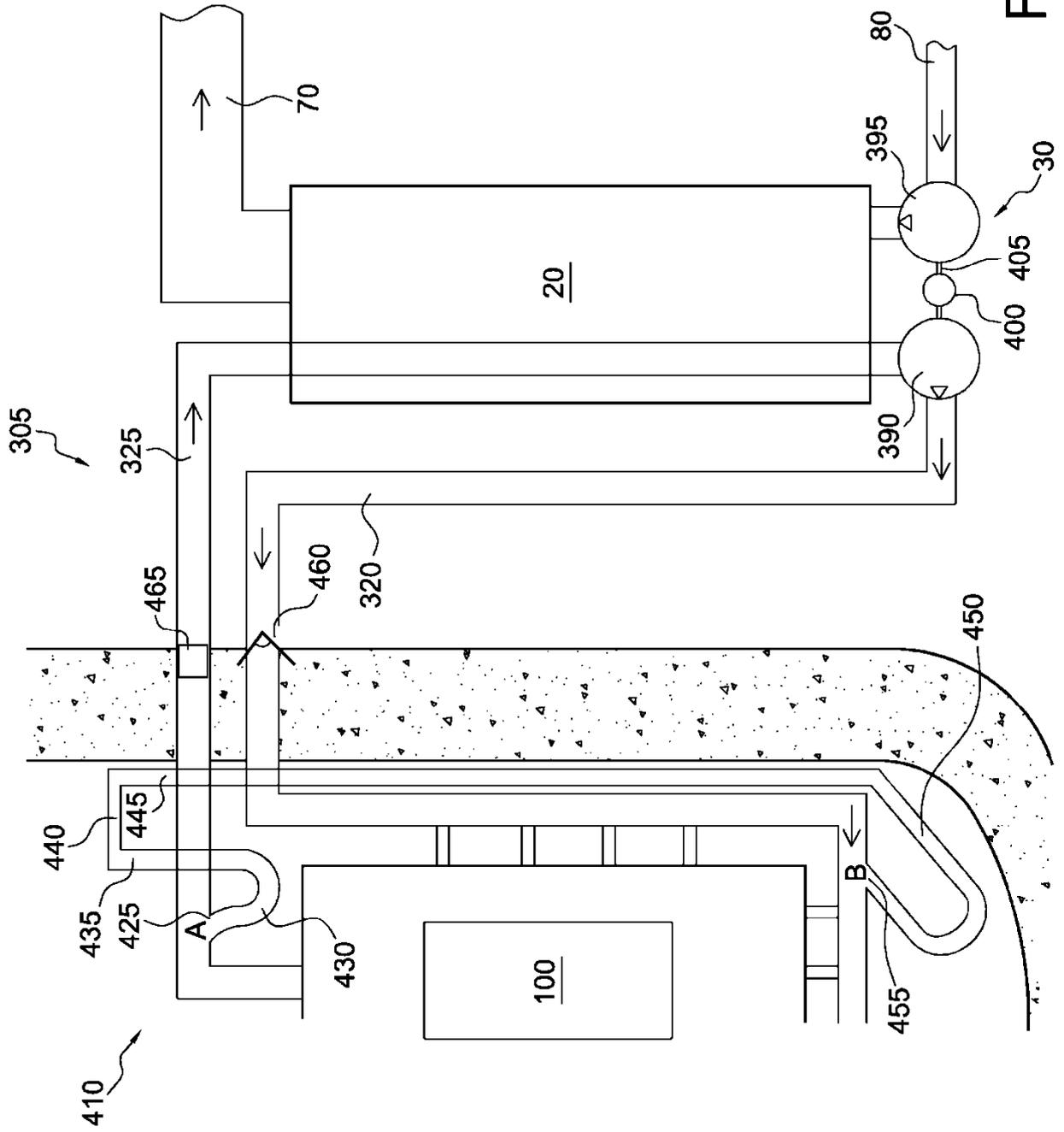


FIG. 16

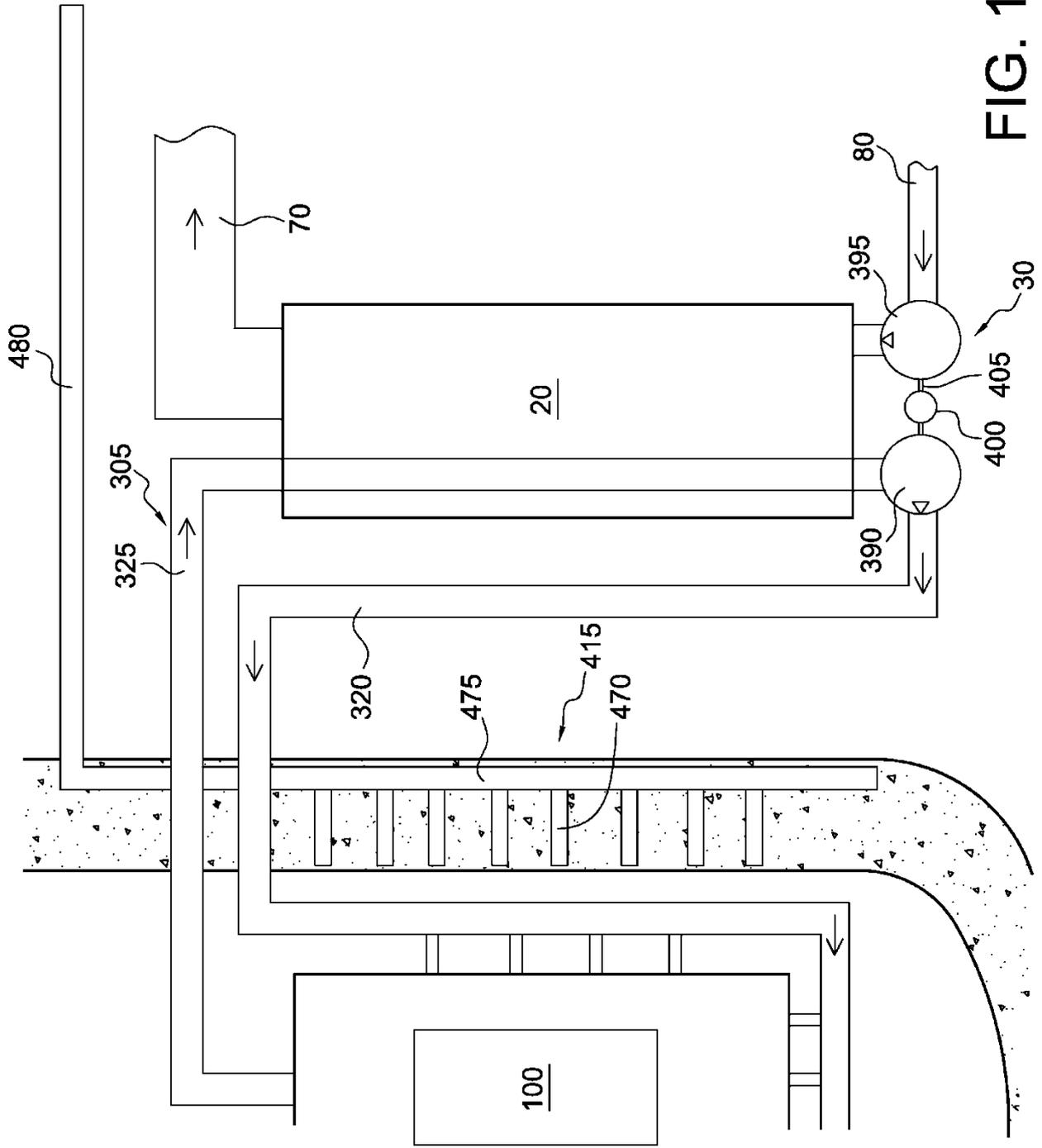


FIG. 17

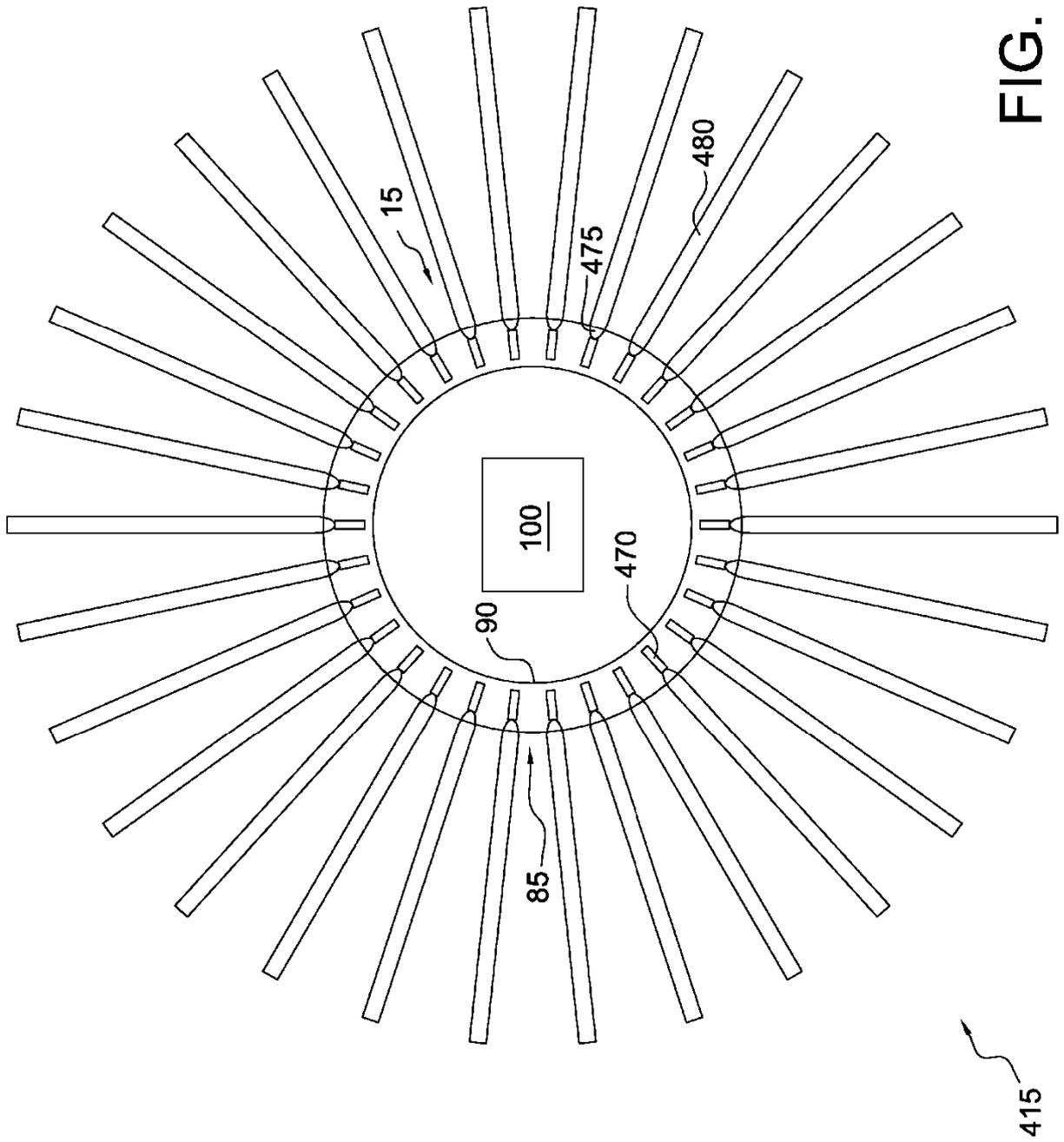


FIG. 18

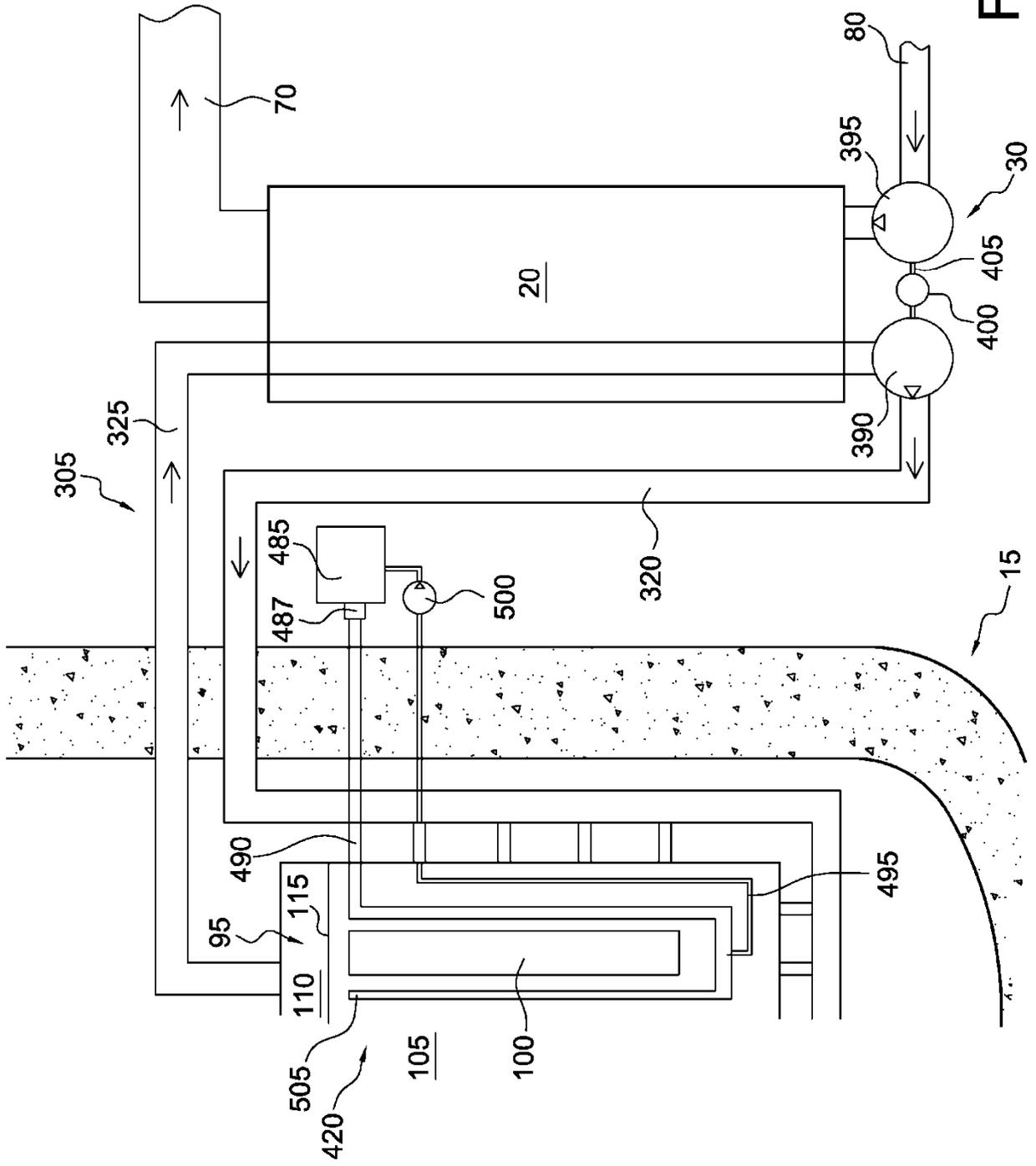


FIG. 19

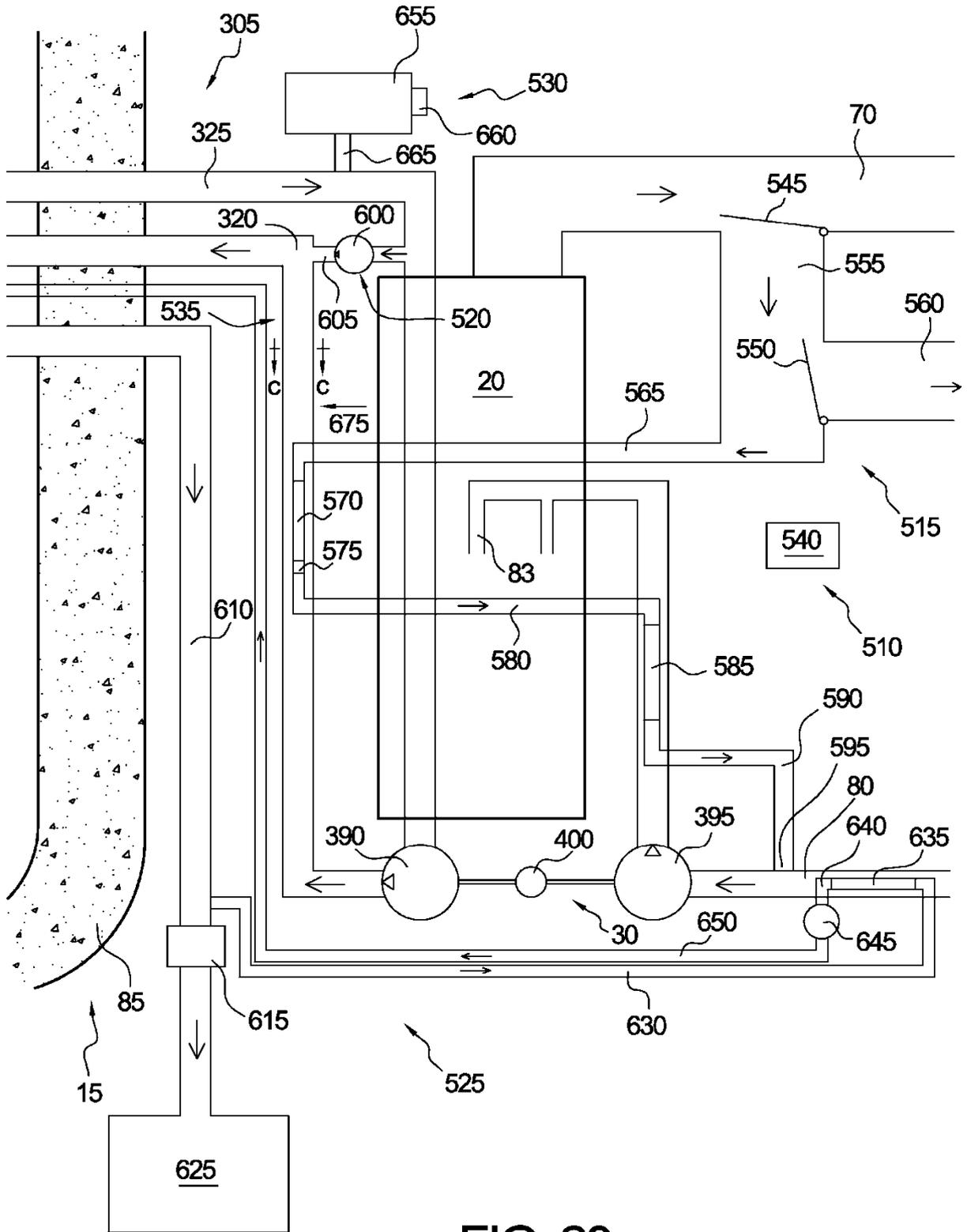


FIG. 20