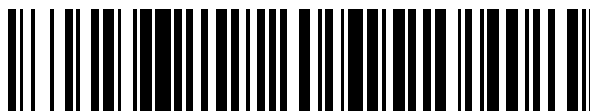


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 730 250**

51 Int. Cl.:

G21C 19/07 (2006.01)

G21C 19/08 (2006.01)

G21C 19/40 (2006.01)

G21F 5/012 (2006.01)

G21F 5/10 (2006.01)

G21C 19/32 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.02.2014 PCT/US2014/019072**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.11.2014 WO14189582**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.02.2014 E 14801059 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.04.2019 EP 2965323**

54 Título: **Gestión de barras de combustible gastadas de un reactor nuclear**

30 Prioridad:

06.03.2013 US 201313786643

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

11.11.2019

73 Titular/es:

**NUSCALE POWER, LLC (100.0%)
1100 NE. Circle Blvd., Suite 350
Corvallis, OR 97330, US**

72 Inventor/es:

**REYES JR., JOSE N. y
COLBERT, CHRISTOPHER**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 730 250 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

Gestión de barras de combustible gastadas de un reactor nuclear

5 Campo técnico

Esta divulgación se refiere por lo general a sistemas y métodos para almacenar y administrar el combustible nuclear gastado.

10 Antecedentes

Las piscinas de combustible gastado proporcionan una eliminación del calor de desintegración a largo plazo del combustible que se ha descargado recientemente de un reactor nuclear. Un núcleo nuclear recientemente descargado representa por lo general la mayor fuente de generación de calor en una piscina de combustible gastado. En el caso de una pérdida total de energía en la planta de energía nuclear, los sistemas de refrigeración de la piscina de combustible gastado pueden no estar disponibles para eliminar el calor de desintegración del combustible. Para condiciones de apagones en puestos de la planta nuclear prolongadas con combustible recientemente descargado, existe el potencial de evaporar toda el agua en la piscina de combustible gastado, sobrecalentándola y dañando así posteriormente los paquetes de combustible gastado. Esto puede dar como resultado una liberación radioactiva al medio ambiente. El documento US2009/0161812 desvela un recipiente de contención evacuado para un reactor nuclear. El documento US2008/0069291 desvela un aparato de envase y una cesta para transportar, almacenar y/o soportar el combustible nuclear gastado. El documento GB909692 desvela un barril de almacenamiento y envío para una fuente de radiación que genera calor. El documento US6785355 desvela un método y sistema para fabricar un contenedor de almacenamiento para almacenar combustible nuclear.

25 Sumario

Esta divulgación describe tecnologías relacionadas con sistemas, aparatos y métodos para manipular, almacenar y, de otra manera, gestionar barras de combustible gastado de un reactor nuclear. De acuerdo con la invención, se proporciona un envase de barras de combustible nuclear gastado de acuerdo con la reivindicación 1.

Los detalles de una o más implementaciones del tema descrito en esta memoria descriptiva se exponen en los dibujos adjuntos y en la siguiente descripción. Otras características, aspectos y ventajas del tema se harán evidentes a partir de la descripción, los dibujos y las reivindicaciones.

35 Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es un diagrama de bloques que ilustra un sistema de gestión de combustible gastado para sistemas de reactores nucleares.

Las Figuras 2A-2C ilustran vistas esquemáticas de una implementación ejemplar de un envase de combustible gastado que opera en condiciones normales y tiene una pila o dos pilas de barras de combustible gastado.

Las Figuras 3A-3B ilustran vistas esquemáticas de bastidores ejemplares para sostener las barras de combustible gastado.

La Figura 4 ilustra una vista esquemática de una implementación ejemplar de un envase de combustible gastado que opera en condiciones anormales.

Las Figuras 5A-5B ilustran vistas esquemáticas de una implementación ejemplar de un envase de combustible gastado que incluye un intercambiador de calor externo y que está operando en condiciones normales.

La Figura 5C ilustra una vista esquemática de una implementación ejemplar de un envase de combustible gastado que incluye un intercambiador de calor externo y que está operando en condiciones anormales.

Las Figuras 6A-6B ilustran vistas esquemáticas de otra implementación ejemplar de un envase de combustible gastado que incluye un intercambiador de calor externo y que está operando en condiciones normales.

La Figura 6C ilustra una vista esquemática de otra implementación ejemplar de un envase de combustible gastado que incluye un intercambiador de calor externo y que está operando en condiciones anormales.

La Figura 7 es un diagrama de flujo que ilustra un método ejemplar para disipar el calor de desintegración generado por una barra de combustible gastado.

La Figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra un método ejemplar para administrar barras de combustible gastado de un sistema de reactor nuclear.

60 Descripción detallada

La Figura 1 es un diagrama de bloques que ilustra una técnica para administrar el combustible gastado 104 de uno o más reactores nucleares 152 en un sistema de energía de reactores nucleares 150. La técnica consiste en retirar las barras de combustible nuclear gastado 104 de los reactores nucleares 152 y transferir las barras de combustible gastado 104 a un sistema de gestión de combustible gastado 154 que facilita la eliminación del calor residual de desintegración producido por las barras de combustible gastado 104. El sistema de gestión de combustible gastado 154 incluye múltiples envases de combustible gastado 100 sumergidos en una piscina de combustible gastado 156

llena de fluido 158. El fluido 158 proporciona un disipador de calor para recibir y disipar el calor de desintegración de las barras de combustible gastado 104. Como se describe en detalle a continuación, los envases 100 pueden configurarse para operar de manera pasiva, por ejemplo, sin la intervención o supervisión del operario, tanto en condiciones de emergencia normales como anormales. En algunos ejemplos, los envases 100 proporcionan una solución de eliminación del calor de desintegración a largo plazo para las barras de combustible gastado 104. Por ejemplo, los envases 100 pueden ser capaces de lograr una tasa de eliminación de calor sustancialmente constante (por ejemplo, una tasa de eliminación de calor de aproximadamente 0,3 MW, 0,4 MW o 0,8 MW) en diversas condiciones de operación normales y anormales. El número de reactores nucleares 152 y envases 100 en la Figura 1 no son indicativos de ninguna implementación particular, y se representan solo con fines ilustrativos.

Con respecto a los reactores nucleares 152, un núcleo de reactor 20 se encuentra en una porción inferior de un recipiente de reactor 70 con forma de cilindro o forma de cápsula. El núcleo 20 del reactor incluye una cantidad de barras de combustible nuclear (por ejemplo, material fisionable que produce una reacción nuclear controlada) y opcionalmente una o más barras de control (no mostradas). En algunas implementaciones, los reactores nucleares 152 están diseñados con sistemas operativos pasivos que emplean las leyes de la física para garantizar que la operación segura del reactor nuclear 152 se mantenga durante la operación normal o incluso en una condición de emergencia sin la intervención o supervisión del operario, al menos durante algún período de tiempo predefinido. Un recipiente de contención en forma de cilindro o en forma de cápsula 10 rodea al recipiente 70 del reactor y se sumerge parcial o completamente en un conjunto de reactores, tal como debajo de la línea de flotación 90, dentro del compartimento 5 del reactor. El volumen entre el recipiente 70 del reactor y el recipiente de contención 10 se puede evacuar parcial o completamente para reducir la transferencia de calor desde el recipiente 70 del reactor hacia el conjunto del reactor. Sin embargo, en otras implementaciones, el volumen entre el recipiente 70 del reactor y el recipiente de contención 10 se puede llenar al menos parcialmente con un gas y/o un líquido aumentando la transferencia de calor entre el reactor y los recipientes de contención.

En una implementación particular, el núcleo 20 del reactor se sumerge dentro de un líquido, como el agua, que puede incluir boro u otros aditivos, que se eleva hacia el canal 30 después de haberse puesto en contacto con una superficie del núcleo del reactor. El movimiento ascendente del refrigerante caliente se representa mediante flechas 40 dentro del canal 30. El refrigerante se desplaza sobre la parte superior de los intercambiadores de calor 50 y 60 y se empuja hacia abajo por la diferencia de densidad a lo largo de las paredes internas del recipiente 70 del reactor, permitiendo así que el refrigerante imparta calor a los intercambiadores de calor 50 y 60. Después de alcanzar una porción inferior del recipiente del reactor, el contacto con el núcleo 20 del reactor da como resultado el calentamiento del refrigerante, que nuevamente se eleva a través del canal 30.

Aunque los intercambiadores de calor 50 y 60 se muestran como dos elementos distintos en la Figura 1, los intercambiadores de calor 50 y 60 pueden representar cualquier número de bobinas helicoidales que se enrollan alrededor de al menos una porción del canal 30.

La operación normal del módulo del reactor nuclear procede de tal manera que el refrigerante caliente asciende a través del canal 30 y entra en contacto con los intercambiadores de calor 50 y 60. Después de entrar en contacto con los intercambiadores de calor 50 y 60, el refrigerante se hunde hacia el fondo del recipiente del reactor 110 de manera que induce un proceso de sifón térmico. En el ejemplo de la Figura 1, el refrigerante dentro del recipiente 70 del reactor permanece a una presión por encima de la presión atmosférica, permitiendo así que el refrigerante mantenga una temperatura alta sin vaporizarse (por ejemplo, hierva).

A medida que aumenta la temperatura del refrigerante dentro de los intercambiadores de calor 50 y 60, el refrigerante puede comenzar a hervir. A medida que el refrigerante dentro de los intercambiadores de calor 50 y 60 comienza a hervir, se puede usar refrigerante vaporizado, como el vapor, para impulsar una o más turbinas que convierten la energía potencial térmica del vapor en energía eléctrica. Después de la condensación, el refrigerante regresa a lugares cercanos a la base de los intercambiadores de calor 50 y 60.

Las Figuras 2A-2C ilustran vistas esquemáticas de una implementación ejemplar de un envase de combustible gastado 200 que opera en condiciones normales y tiene una pila o dos pilas de barras de combustible gastado. El envase 200 incluye un recipiente sumergible 202 que contiene barras de combustible gastado 204 y refrigerante 206 que rodea las barras de combustible gastado 204. Como se muestra esquemáticamente en la Figura 2A, el envase 200 (llenado hasta un nivel de refrigerante 201) se soporta en una piscina de combustible gastado 256 llena de fluido 258 (por ejemplo, agua o algún otro refrigerante adecuado). En algunas implementaciones, el fluido 258 en la piscina de combustible gastado 256 (llena hasta el nivel de fluido 203) circula de manera continua o intermitente mediante bombas u otro hardware para mejorar la transferencia de calor entre el recipiente 202 y el fluido 258. La circulación del fluido 258, en algunos aspectos, puede aumentar la efectividad de la transferencia de calor por convección entre el envase 200 y el fluido 258.

El recipiente 202, en la implementación ejemplar, facilita la disipación del calor de desintegración de las múltiples barras de combustible gastado 204. En este ejemplo, el recipiente 202 es un contenedor alargado en forma de cápsula, que tiene un cuerpo principal cilíndrico con dos colectores elípticos o hemisféricos en cada extremo (por ejemplo, el cabezal superior 205 y el cabezal inferior 207). La forma del recipiente 202 proporciona, en este ejemplo, una cantidad

relativamente grande de área superficial disponible (por ejemplo, relativa al volumen disponible) para facilitar la transferencia de calor por convección con el refrigerante 206 contenido dentro del recipiente 202 y el fluido 258 que rodea el recipiente 256 en la piscina de combustible gastado 256. La forma del recipiente 202 puede facilitar también la circulación natural impulsada por gravedad del refrigerante 206 contenido. En algunos ejemplos, el recipiente 202 define un diámetro exterior de entre aproximadamente 2,13 m (7 pies) y 3,66 m (12 pies) y una longitud de aproximadamente 21,95 m (72 pies). En algunos ejemplos, el recipiente 202 define un área superficial de aproximadamente 148,64 m² (1600 pies²). El recipiente 202 puede dimensionarse a longitudes y diámetros que se puedan alojar en piscinas de combustible gastado nuclear comerciales convencionales (por ejemplo, 9,14 m (30 pies) a 15,24 m (50 pies) de longitud).

El recipiente 202, en este ejemplo, está herméticamente sellado y puede presurizarse hasta un límite de diseño específico (por ejemplo, 2,76x10⁶ - 3,45x10⁶ Pa (400-500 psia)). Como se explica más adelante, la presión límite de diseño del recipiente 202 puede ser particularmente importante para la eliminación del calor del recipiente en condiciones de operación anormales. La carcasa cilíndrica 208 del recipiente 202 tiene, en este ejemplo, una construcción de pared fina formada por un material resistente a la corrosión y conductor de calor (por ejemplo, acero). Por lo general, la carcasa cilíndrica 208 conduce el calor y soporta los esfuerzos inducidos por presión, temperatura, radiación y sísmica. La carcasa cilíndrica 208 puede fabricarse utilizando materiales aprobados para su uso en recipientes a presión para reactores nucleares. Por ejemplo, en algunas implementaciones, la carcasa cilíndrica 208 incluye un material basado en acero como SA302 GR B, SA533 GR B, Clase 1, SA 508 Clase 2 o SA 508 Clase 3 que puede revestirse con acero inoxidable austenítico de TIPO 308L, 309L, TIPO 304. Se pueden implementar otros materiales de base, tales como 16MnD5, 20MnMoNi55, 22NiMoCr3 7, 15Kh2MFA (A), 15Kh2NMFA (A) con revestimiento austenítico Sv 07Kh25N13 y/o Sv 08Kh19N10G2B. En algunos ejemplos, la carcasa cilíndrica 208 no proporciona ningún escudo para bloquear o inhibir de otro modo la radiación potencialmente dañina generada por las barras de combustible gastado 204. Sin embargo, en algunos otros ejemplos, la carcasa cilíndrica 208 está provista de escudo contra la radiación. La carcasa cilíndrica 208 se puede fabricar utilizando placas laminadas o anillos forjados. El espesor de pared de la carcasa cilíndrica 208 puede estar entre aproximadamente 3,81 cm (1,5 pulgadas) y 11,43 cm (4,5 pulgadas). En cualquier caso, el material y el espesor de la carcasa cilíndrica 208 proporciona suficiente resistencia para soportar las tensiones asociadas a la presurización de diseño límite.

Las barras de combustible gastado 204 se aseguran en su lugar cerca del fondo del recipiente 202 dentro del canal ascendente 216 y se soportan mediante una placa de soporte inferior 214 (por ejemplo, como también se muestra en la Figura 2B) y la estructura de soporte inferior 211. Como se muestra, la placa de soporte inferior 214 y el canal ascendente 216 forman una "canasta" que sostiene las barras de combustible gastado 204 y facilita la circulación natural del refrigerante 206. En este ejemplo, el soporte/escudo 210 del barril de combustible incluye un barril de combustible y un escudo de radiación que soporta una pluralidad de bastidores individuales 212. Se fija a la placa de soporte inferior 214 y al canal ascendente 216. El canal ascendente 216 se soporta por el anillo de soporte superior 218 y la estructura de soporte superior 213. Los bastidores 212 reciben las respectivas barras de combustible gastado 204 y las mantienen en una condición relativamente estable, por ejemplo, no crítica. Por ejemplo, los bastidores 212 se pueden diseñar a partir de un material que incluye un absorbente de neutrones (por ejemplo, boro) para inhibir los eventos de criticidad. La Figura 2A muestra una pila única de combustible gastado 204 mientras que la Figura 2C muestra una pila doble de combustible gastado 204.

La Figura 3A muestra una primera estructura de soporte/escudo 310a del barril de combustible ejemplar con un número particular (por ejemplo, 37) de bastidores disponibles 312a para alojar las respectivas barras de combustible gastado. La Figura 3B muestra una segunda estructura de soporte/escudo 310a del barril de combustible ejemplar con otro número (por ejemplo, 97) de bastidores de alojamiento de combustible 312b. La estructura de soporte 310b es significativamente más grande que la estructura de soporte 310a, y por lo tanto puede requerir un recipiente más grande. Por ejemplo, la estructura de soporte 310a puede incorporarse en un recipiente que tiene un diámetro exterior de 2,13 m (7 pies), mientras que la estructura de soporte 310b puede incorporarse en un recipiente que tiene un diámetro exterior de 3,66 m (12 pies). Los bastidores pueden organizarse para adaptarse a una amplia variedad de tipos de combustible, como los típicos de reactores de agua en ebullición (por ejemplo, conjuntos de combustible de 8x8, 9x9 o 10x10) o los conjuntos de combustible de reactores de agua a presión más grandes (por ejemplo, paquetes de combustible de 17x17).

En estas ilustraciones, los bastidores 312a y 312b son rectilíneos en sección transversal definiendo un área abierta de aproximadamente 1,02 m² (11 pies²) y 2,60 m² (28 pies²) respectivamente. Por supuesto, también se pueden implementar otras formas adecuadas (por ejemplo, tamaños circulares, hexagonales, triangulares, etc.). Además, como se muestra, los bastidores 312a y 312b se disponen en una configuración de panel de abeja simétrica y estrechamente empaquetada. En algunos ejemplos, esta configuración geométrica se proporciona con el doble propósito de eliminar el calor y mitigar la criticidad. Sin embargo, también se pueden implementar eficazmente otras configuraciones adecuadas. Por ejemplo, los bastidores 312a y 312b pueden estar separados entre sí (en lugar de estar juntos), o dispuestos en alguna otra configuración simétrica (por ejemplo, una configuración cuadrilátera), en oposición a una forma de panel.

Volviendo a la Figura 2A, el anillo de soporte superior 218 y la placa de soporte inferior 214 forman la base de soporte para el canal ascendente 216. Además, la placa de soporte inferior 214 puede tener suficiente resistencia para soportar

el peso de las barras de combustible gastado 204. La placa de soporte inferior 214 permite que el refrigerante 206 fluya hacia arriba por encima de las barras de combustible gastado 204 para la transferencia de calor por convección desde las barras de combustible gastado 204 hacia el refrigerante. Por ejemplo, la placa de soporte inferior 214 puede incluir pequeñas perforaciones o grandes aberturas que permiten que el refrigerante de circulación natural 206 fluya hacia arriba a través de la placa de soporte y pase las barras de combustible gastado 204.

El canal ascendente 216 ilustrado se extiende hacia arriba desde la placa de soporte inferior 214 para rodear el soporte/escudo 210 del barril de combustible y las barras de combustible gastado 204 soportadas en los bastidores 212. Como se muestra, el canal ascendente 216 se extiende desde un punto cerca de la parte superior de la placa de soporte inferior 214 hasta la parte superior del anillo de soporte superior 218, un punto que está aproximadamente a la mitad de la brida 219 del cabezal superior del recipiente. Por ejemplo, el canal ascendente 216 puede tener una altura de aproximadamente 30 pies (9,14 m). En algunos ejemplos, el canal ascendente 216 tiene forma cilíndrica con una salida de forma redondeada, para reducir las pérdidas de forma en el refrigerante 206 que circula naturalmente.

El canal ascendente 216 ejemplar define un orificio hueco 220 que sirve para dirigir el refrigerante 206 hacia arriba a través del interior del recipiente 202, y un anillo estrecho 222 que dirige el refrigerante hacia abajo a lo largo de la pared interior del recipiente 202. El anillo de soporte superior 218 se desplaza radialmente hacia dentro desde la carcasa cilíndrica 208 hasta la parte superior del canal ascendente 216. Similar a la placa de soporte 214, el anillo de soporte superior 218 incluye también perforaciones o grandes aberturas que permiten que el refrigerante de circulación natural 206 pase hacia abajo a través del anillo de soporte superior 218 y a través del anillo 222.

El recipiente 202 se puede llenar inicialmente con una cantidad de refrigerante líquido 206. En particular, el recipiente 202 se llena con al menos suficiente refrigerante 206 para colocar el nivel de líquido 201 por encima de la parte superior del anillo de soporte superior 218. En algunos ejemplos, el recipiente 202 se llena con aproximadamente 35 m³ de refrigerante líquido 206. El refrigerante puede incluir agua y/o algún tipo de refrigerante adicional. Por ejemplo, el refrigerante 206 en condiciones de circulación natural puede generar un coeficiente de transferencia de calor por convección entre aproximadamente 1000-2500 (W/m²K) en la superficie interior de la carcasa cilíndrica 208. El refrigerante 206 puede diseñarse para sufrir un cambio de fase de líquido a gas en ciertas condiciones (por ejemplo, cuando la transferencia de calor por convección al fluido ambiente 258 en la piscina de combustible gastado 256 ha disminuido significativamente) para mantener la tasa de remoción de calor a un nivel sustancialmente constante en condiciones de operación anormales, como se explica en detalle a continuación.

En operación a condiciones normales como se muestra en la Figura 2A (por ejemplo, sin pérdida de energía o pérdida de fluido 258) el recipiente 202 se sumerge en el fluido de la piscina de combustible gastado 258. La circulación natural del refrigerante 206 dentro del recipiente 202 se establece por la fuerza de flotación generada como resultado de las diferencias de densidad y elevación entre el refrigerante caliente 206 en contacto con el combustible gastado 204 y el refrigerante más frío 206 en el anillo 222. Es decir, cuando el refrigerante 206, en contacto con el combustible gastado 204, se calienta por el calor de desintegración que emana de las barras de combustible gastado 204, el refrigerante 206 se vuelve menos denso y comienza a subir. El refrigerante que sube 206 se dirige hacia arriba a través de los bastidores 212 que sostienen las barras de combustible gastado 204. A medida que el refrigerante 206 fluye por las barras de combustible gastado 204, recibe aún más calor, lo que hace que continúe fluyendo hacia arriba. El canal ascendente 216 dirige el refrigerante caliente 206 hacia arriba a través del orificio 220, lejos de las barras de combustible gastado 204 y hacia la salida del canal ascendente 216 cerca de la parte superior del anillo de soporte superior 218. El refrigerante 206 que sale del canal ascendente 216 se enfría a través de la transferencia de calor por convección con la superficie interna del recipiente 202. El calor se conduce a través de la pared del recipiente 202 y luego se transfiere por convección al fluido de la piscina de combustible gastado 258. El refrigerante enfriado 206 se vuelve más denso y, por lo tanto, es atraído hacia abajo por gravedad. El refrigerante que se hunde 206 se dirige a través del anillo de soporte superior perforado 218 de la estructura de soporte 210 y a través del anillo 222, a través de la placa de soporte inferior perforada 214 y finalmente regresa al cabezal inferior 207 del recipiente 202.

La Figura 4 ilustra una vista esquemática de una implementación ejemplar del envase de combustible gastado 200 que opera en condiciones anormales. En algunas implementaciones, el envase de combustible gastado 200 se diseña para operar en condiciones de operación anormales, mientras mantiene una tasa de eliminación de calor de desintegración sustancialmente constante. En algunos aspectos, la condición de operación anormal es una situación de emergencia en la que se ha drenado la piscina de combustible gastado 256 o se ha evaporado el fluido 258 (como se muestra en la Figura 4). Sin embargo, también pueden ocurrir otros tipos de condiciones de operación anormales (por ejemplo, pérdida de circulación de fluido en la piscina de combustible gastado 256). En tales condiciones de operación anormales, la cantidad de transferencia de calor por convección entre el recipiente 202 y el entorno ambiental circundante puede reducirse significativamente. La tasa reducida de transferencia de calor hace en última instancia que el refrigerante líquido 206 en contacto con el combustible gastado 204 sufra un cambio de fase de líquido a gas. Una mezcla de refrigerante de dos fases 206c se eleva a través del combustible gastado 204 y sale por la parte superior del canal ascendente 216. En la parte superior del canal ascendente 216, el refrigerante de fase gaseosa 206a y el refrigerante de fase líquida 206b se separan del refrigerante de dos fases 206c por gravedad. El refrigerante de fase líquida 206b se desplaza hacia abajo a través del anillo de soporte superior perforado 218 hacia el anillo 222. El refrigerante de fase gaseosa 206a continúa desplazándose hacia arriba en el recipiente 202 hacia el cabezal superior 205. Cuando el refrigerante de fase gaseosa 206a entra en contacto con la pared interior del recipiente 202,

intercambia calor con la pared para producir un condensado 206d. El condensado 206d puede estar en forma de una película líquida o gotitas que viajan hacia abajo a lo largo de la pared interior del recipiente 202. El condensado 206d se acumula en la región sobre el anillo de soporte superior 218 y se mezcla con el refrigerante líquido que fluye hacia abajo 206b. El condensado 206d y el refrigerante de fase líquida 206b se desplazan hacia abajo a través del anillo, a través de la placa de soporte inferior perforada 214 y el colector inferior 207 y regresan hacia arriba a través de los bastidores de combustible gastado 212.

En este ejemplo, el envase puede pasar de refrigeración por líquido (por ejemplo, agua) a refrigeración por aire en la piscina de combustible gastado 256 sin la necesidad de acciones por parte del operario o energía externa. Como se ha indicado anteriormente, la tasa de eliminación de calor del envase 200 enfriado por aire puede ser sustancialmente igual a la del envase 200 enfriado por líquido. En particular, el cambio de fase de líquido a gas puede hacer que la cavidad interna del recipiente 202 se presurice. La presurización del recipiente 202 aumenta la temperatura de saturación dentro del recipiente 202 y, por lo tanto, aumenta la temperatura de su superficie exterior. El aumento de la temperatura de la superficie exterior del recipiente 202 aumenta tanto la velocidad de transferencia de calor de radiación térmica al entorno como la velocidad de transferencia de calor de convección libre con el aire ambiente 260 (a diferencia del líquido 258 en la piscina de combustible gastado durante las condiciones normales de operación) a un punto donde la tasa total de eliminación de calor del envase 200 es aceptable. Por ejemplo, la gran área superficial y la alta temperatura superficial del recipiente 202 pueden ser suficientes para eliminar el calor del envase 200 al aire ambiente 260 a una tasa sustancialmente igual a la del fluido de la piscina de combustible 258.

Las Figuras 5A-5B ilustran vistas esquemáticas de una implementación ejemplar de un envase de combustible gastado 400 que incluye un intercambiador de calor externo 424 y que está operando en condiciones normales. Como se muestra, el intercambiador de calor 424 incluye un colector de tubo superior horizontal 223a y un colector de tubo inferior horizontal 223b unidos por una serie de tubos intercambiadores de calor verticales en forma de c 226. Los tubos intercambiadores de calor pueden tener 2 a 4 pulgadas (50,8 a 101,6 mm) de diámetro y 15-20 pies (4,57- 6,10 m) de longitud. El colector 223a del tubo superior se conecta, en este ejemplo, a la carcasa cilíndrica 208 por debajo del nivel de refrigerante 201 y por encima del anillo de soporte superior 218 por el conducto del colector 225a. El colector 223b del tubo inferior se conecta al anillo 222 por los conductos 225b del colector. En algunos ejemplos, los conductos 225a y 225b del colector se inclinan de manera que el líquido que fluye a través de los conductos está siempre en la dirección descendente. El intercambiador de calor 424 está diseñado para soportar presión y temperaturas plenas durante condiciones normales y anormales.

Como se muestra en la Figura 5A, en condiciones normales, el refrigerante líquido caliente 206 se eleva a través del orificio 220 hacia la salida del canal ascendente 216. Aproximadamente la mitad del refrigerante líquido 206 ingresa a los conductos superiores del colector 225a en el intercambiador de calor 424, donde transfiere calor al fluido de la piscina de combustible gastado 258. La mitad restante del refrigerante líquido se desplaza a través del anillo de soporte superior perforado 218 hacia el anillo 222, donde transfiere calor al fluido de la piscina de combustible gastado 258 por transferencia de calor por convección y conducción a través de las paredes del recipiente 202. Las trayectorias de flujo para el refrigerante 206, en este ejemplo, se establecen por la circulación natural creada por la fuerza de flotación establecida por la diferencia de densidad del refrigerante en el orificio 220 y el anillo 222 y la elevación relativa de sus centros térmicos.

La Figura 5C ilustra una vista esquemática de una implementación ejemplar de un envase de combustible gastado 400 que incluye un intercambiador de calor externo 424 y que está operando en condiciones anormales. En este ejemplo, aunque similar al ilustrado en la Figura 4, la adición del intercambiador de calor 424 proporciona un área superficial adicional para la refrigeración por circulación natural. La transferencia de calor por convección dentro de los tubos puede aumentar la capacidad de la tasa de remoción de calor del envase, reduciendo así la altura total del envase. En el presente ejemplo, un intercambiador de calor de sesenta y cinco tubos de 16 pies (4,88 m) de longitud de tubo puede reducir la altura del recipiente en aproximadamente un 30 % (por ejemplo, de 21,95 m (72 pies) a 15,24 m (50 pies)) mientras rechaza la misma cantidad de calor, 0,35 MW al aire ambiente 206. En algunos ejemplos, el intercambiador de calor 424 es un intercambiador de calor de sesenta y cinco tubos o un intercambiador de calor de aproximadamente 150 tubos. El número y la longitud de los tubos del intercambiador de calor 226 se pueden seleccionar para proporcionar una amplia gama de tasas de eliminación de calor deseadas.

Las Figuras 6A-6B ilustran vistas esquemáticas de otra implementación ejemplar de un envase de combustible gastado 500 que incluye un intercambiador de calor externo 525 y que está operando en condiciones normales. Como se muestra, el intercambiador de calor 524 incluye un colector de tubo superior horizontal 223a, un colector de tubo inferior horizontal 223b unidos por una serie de tubos intercambiadores de calor verticales en forma de c 226. Los tubos intercambiadores de calor pueden tener un diámetro de 5,08 cm (2 pulgadas) a 10,16 cm (4 pulgadas) y una longitud de 4,57-6,10 m (15-20 pies). En el ejemplo ilustrado, el intercambiador de calor 525 se conecta a la carcasa cilíndrica 208 entre el nivel 201 y el anillo de soporte superior 218 mediante el conducto del colector 225a. El colector 223b del tubo inferior se conecta al anillo 222 por los conductos 225b del colector. Los conductos 225a y 225b del colector tienen una pendiente tal que el líquido que fluye a través de los conductos está siempre en la dirección descendente. El intercambiador de calor 524 está, en algunos aspectos, diseñado para soportar la presión y temperaturas plenas durante condiciones normales y anormales. En condiciones normales, el mecanismo de transferencia de calor puede ser idéntico o sustancialmente similar al descrito en la Figura 2A.

La Figura 6C muestra el envase 500 operando en condiciones anormales, rechazando el calor al aire ambiente 206. El refrigerante de fase líquida se comporta como se ha descrito anteriormente para la Figura 4. Sin embargo, debido a que el intercambiador de calor 524 se conecta a la región de la fase gaseosa del envase (por ejemplo, a través del canal ascendente 216), una porción del refrigerante de fase gaseosa 206a se condensa dentro de los tubos intercambiadores de calor. Esto crea una región de baja presión dentro de los tubos 526 que atrae el refrigerante de fase gaseosa adicional 206a hacia los tubos. El condensado 206d dentro de los tubos 526 cae por gravedad a través de los tubos 526 en la carcasa cilíndrica. El condensado se mezcla con el refrigerante de dos fases 206c en la región sobre el anillo de soporte superior 218. El refrigerante de fase líquida 206b se desplaza hacia abajo por gravedad a través del anillo de soporte superior perforado 218 en el anillo 222, a través de la placa de soporte inferior perforada 214, a través del pleno formado por el cabezal inferior 207. Fluye hacia arriba a través de los bastidores de combustible gastado 212, enfriando así el combustible gastado 204.

Otra implementación de la presente divulgación presenta varios métodos para disipar el calor de desintegración generado por una barra de combustible gastado. La Figura 7 ilustra un método 700 ejemplar para disipar el calor de desintegración. El método incluye, en la etapa 702, sumergir un envase de combustible gastado en un fluido de transferencia de calor contenido en una piscina de combustible gastado. Como se ha descrito anteriormente, el envase de combustible gastado puede incluir una carcasa cilíndrica que define una cavidad interior que contiene la barra de combustible gastado. En la etapa 704, el calor de desintegración se transfiere de la barra de combustible gastado al refrigerante líquido contenido dentro del envase. En algunas implementaciones, el refrigerante circula dentro del envase a través de la circulación natural para facilitar la transferencia de calor. En la etapa 706, el calor de desintegración se transfiere desde el refrigerante, a través de una pared del envase, al fluido de transferencia de calor de la piscina de combustible gastado. Una tasa a la que se transfiere el calor de la barra de combustible gastado es al menos tan alta como la tasa a la que la barra de combustible gastado produce calor de desintegración.

El método 700 puede incluir también opcionalmente, en la etapa 708, exponer el envase al aire ambiente debido a una pérdida de fluido de la piscina de combustible gastado. En la etapa 710, basándose en la exposición al aire ambiente, una porción del refrigerante dentro del envase se cambia de fase de un líquido a un gas. En la etapa 712, el calor se transfiere, a través de una pared del envase, del refrigerante de fase gaseosa al aire ambiente. En la etapa 714, el refrigerante de fase gaseosa se condensa de nuevo a un líquido y circula (por ejemplo, a través de circulación natural) dentro del envase.

Otra implementación adicional de la presente divulgación presenta varios métodos para gestionar las barras de combustible gastado, pasándolas por ciclos a través de envases de combustible gastado. La Figura 8 ilustra un método 800 ejemplar para gestionar barras de combustible gastado. El método incluye, en la etapa 802, retirar un primer lote de barras de combustible gastado de un reactor nuclear. En la etapa 804, el primer lote de barras de combustible gastado se instala en un envase de combustible gastado (por ejemplo, el envase de combustible gastado 100) por primera vez (T1). En la etapa 806, el envase de combustible gastado se sumerge en un fluido de transferencia de calor (como el contenido en la piscina de combustible gastado 156). En la etapa 808, el envase se utiliza para eliminar el calor de desintegración del primer lote de barras de combustible gastado durante un período de tiempo (T). En la etapa 810, un segundo lote de barras de combustible gastado se instala dentro del envase de combustible gastado por segunda vez (T2). La tasa de eliminación de calor del envase de combustible gastado es al menos tan alta como la tasa de calor de desintegración combinada del primer y segundo lotes de barras de combustible gastado en T2. Como se ha descrito en el contexto del primer y segundo ejemplos a continuación, el método ejemplar de la Figura 8 se puede utilizar para gestionar continuamente el combustible gastado de un reactor nuclear.

En algunos aspectos, un ejemplo de sistema de gestión de combustible gastado (por ejemplo, sistema de gestión de combustible gastado 154) que incluye una piscina de combustible gastado y múltiples envases de combustible gastado de acuerdo con la presente divulgación (por ejemplo, el envase de combustible gastado 100, 200, 400 y/o 500) gestiona el combustible gastado de los reactores nucleares (por ejemplo, 1-12 reactores nucleares 152), cada uno de ellos reabasteciéndose de manera efectiva una vez cada veinticuatro meses, con un lote de combustible gastado de medio núcleo, y retirándose aproximadamente 18 conjuntos de combustible cada dos meses. Cada lote de combustible gastado produce aproximadamente 0,2 MW de potencia de desintegración después de veinte días y 0,1 MW de potencia de desintegración después de seis meses. El combustible gastado que se ha desintegrado durante seis meses se puede descargar de los envases de combustible gastado en, por ejemplo, una piscina de combustible gastado, no presurizada, con refrigerante líquido convencional. Después de un período adicional de refrigeración, por ejemplo, de 5 a 10 años, el combustible gastado se puede descargar en un barril seco. En este ejemplo, hay suficiente refrigerante líquido 158 en la piscina de combustible gastado 156 para proporcionar 20 días de refrigeración antes de pasar a la refrigeración por aire ambiente. El sistema incluye dos envases de combustible gastado, cada uno capaz de lograr al menos 0,5 MW de eliminación de calor de desintegración cuando se sumerge completamente en el refrigerante 158 de la piscina de combustible gastado y 0,35 MW de eliminación de calor de desintegración después del período de refrigeración de transición de 20 días. La Tabla 1 a continuación ilustra un ejemplo de la secuencia lineal para la carga y descarga de envases para alojar el combustible gastado del reactor nuclear. En la Tabla 1, "T" está en meses y "B #" representa un lote particular de combustible gastado. Un "+" indica que el lote está cargado en el envase y a indica que el lote se ha retirado.

Tabla 1

Envase #	T = 0	T = 2	T = 4	T = 6	T = 8	T = 10
Envase 1	+B1 0,35 MW		+B3 0,5 MW		-B1 +B5 0,5 MW	
Envase 2		+B2 0,35 MW		+B4 0,5 MW		-B2 +B6 0,5 MW
T = 12	T = 14	T = 16	T = 18	T = 20	T = 22	T = 24
-B3 +B7 0,5 MW		-B5 +B9 0,5 MW		-B7 +B11 0,5 MW		-B9 +B13 0,5 MW
	-B4 +B8 0,5 MW		-B6 +B10 0,5 MW		-B8 +B12 0,5 MW	

- En la secuencia ejemplar presentada en la Tabla 1, todos los lotes de combustible gastado se habrían deteriorado durante ocho meses antes de la descarga. Este enfoque, en algunos aspectos, elimina los riesgos potenciales asociados a tener un combustible gastado de mayor densidad de potencia colocado directamente al lado de un combustible gastado de menor densidad de potencia. El combustible gastado de mayor densidad de potencia presenta el mayor riesgo de ignición del revestimiento de circonio en el aire en caso de una pérdida de agua de la piscina de combustible gastado 158 que podría potencialmente encender el combustible gastado de menor densidad de potencia.
- 10 En otro sistema de gestión de combustible gastado ejemplar, el sistema puede administrar el combustible gastado de los reactores nucleares (por ejemplo, 1-12 reactores nucleares 152), cada uno reabastecido eficazmente una vez cada veinticuatro meses, con un lote de combustible gastado de medio núcleo extraído cada dos meses. Cada lote de combustible gastado proporciona 0,2 MW de potencia de desintegración después de veinte días y 0,1 MW de potencia de desintegración después de seis meses. El combustible gastado que se ha desintegrado durante seis meses se puede descargar de los envases de combustible gastado en, por ejemplo, una piscina de combustible gastado, no presurizada, con refrigerante líquido convencional. Después de un período adicional de refrigeración, por ejemplo, de 5 a 10 años, el combustible gastado se puede descargar en un barril seco. El sistema incluye un solo envase de combustible gastado capaz de lograr al menos 0,65 MW de remoción del calor de desintegración cuando se sumerge completamente en el refrigerante 158 de la piscina de combustible gastado y 0,45 MW de remoción del calor de desintegración después del período de refrigeración de transición de 20 días. La Tabla 2 a continuación ilustra una secuencia lineal para la carga y descarga del envase para alojar el combustible gastado del reactor nuclear utilizando el envase de combustible gastado más grande.

Tabla 2

Envase #	T = 0	T = 2	T = 4	T = 6	T = 8	T = 10
Envase 1	+B1 0,35 MW	+B2 0,5 MW	+B3 0,65 MW	-B1 +B4 0,65 MW	-B2 +B5 0,65 MW	-B3 +B6 0,65 MW
T = 12	T = 14	T = 16	T = 18	T = 20	T = 22	T = 24
-B4 +B7 0,65 MW	-B5 +B8 0,65 MW	-B6 +B9 0,65 MW	-B7 +B10 0,65 MW	-B8 +B11 0,65 MW	-B9 +B12 0,65 MW	-B10 +B13 0,65 MW

- 25 Tenga en cuenta que este envase de combustible gastado más grande, en algunos aspectos, proporciona espacio suficiente para alojar una descarga de seis meses de los lotes de combustible gastado.
- 30 En otro sistema de gestión de combustible gastado ejemplar, el sistema puede administrar el combustible gastado de un solo reactor nuclear efectivamente reabastecido una vez cada cuarenta y ocho meses, con un lote de combustible gastado de un núcleo completo (por ejemplo, 37 conjuntos) que se retira y reemplaza. Cada lote de combustible gastado produce 0,4 MW de potencia de desintegración después de veinte días y 0,2 MW de potencia de desintegración después de seis meses. El combustible gastado que se ha desintegrado durante seis meses se puede descargar de los envases de combustible gastado en, por ejemplo, una piscina de combustible gastado, no presurizada, con refrigerante líquido convencional. Después de un período adicional de refrigeración, por ejemplo, de 5 a 10 años, el combustible gastado se puede descargar en un barril seco. El sistema incluye un solo envase de combustible gastado capaz de lograr al menos 0,85 MW de remoción del calor de desintegración cuando se sumerge completamente en el refrigerante 158 de la piscina de combustible gastado y 0,6 MW de remoción del calor de desintegración después del período de refrigeración de transición de 20 días. La Tabla 3 a continuación ilustra una secuencia lineal para la carga y descarga de envases para alojar el combustible gastado del reactor nuclear utilizando el envase de combustible gastado más grande.

Tabla 3

Envase #	T = 0	T = 4 años	T = 8 años	T = 12 años	T = 16 años	T = 18 años	T = 24 años
Envase 1	+B1 0,7 MW	+B2 0,85 MW	-B1 +B3 0,85 MW	-B2 +B4 0,85 MW	-B3 +B5 0,85 MW	-B4 +B6 0,85 MW	-B5 +B7 0,85 MW

5 El uso de la terminología como "delantero", "trasero", "superior", "inferior", "sobre", "arriba" y "abajo" a lo largo de la memoria descriptiva y de las reivindicaciones es para describir las posiciones relativas de los diversos componentes del sistema y otros elementos descritos en la presente memoria. De manera similar, el uso de cualquier término horizontal o vertical para describir elementos es para describir las orientaciones relativas de los diversos componentes del sistema y otros elementos descritos aquí. A menos que se indique explícitamente lo contrario, el uso de dicha terminología no implica una posición u orientación particular del sistema o cualquier otro componente relativo a la dirección de la fuerza gravitacional de la tierra, la superficie terrestre, u otra posición u orientación particular que el sistema y otros elementos puedan tomar durante la operación, fabricación y transporte.

10 Se han descrito diversas implementaciones. Sin embargo, se entenderá que se pueden hacerse varias modificaciones. Por ejemplo, se pueden lograr resultados ventajosos si las etapas de las técnicas divulgadas se realizasen en una secuencia diferente, si los componentes en los sistemas divulgados se combinasen de forma diferente, o si los componentes fueran reemplazados o complementados por otros componentes. Por consiguiente, otras implementaciones se encuentran dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Un envase de barras de combustible nuclear gastado (200), que comprende:

5 un recipiente de presión sumergible (202), que comprende una cubierta sellada, que define una cavidad interior, comprendiendo la cubierta un material conductor de calor y resistente a la corrosión con una conductividad térmica de más de aproximadamente 7,0 vatios por metro por grado kelvin, teniendo además el recipiente de presión sumergible una placa de soporte inferior perforada (214); y
 10 un bastidor (212), encerrado dentro de la cavidad interior y situado de manera adyacente a la placa de soporte inferior perforada (214), estando el bastidor configurado para soportar una o más barras de combustible nuclear gastado (204);
 un canal ascendente (216), soportado dentro del recipiente de presión sumergible por la placa de soporte inferior perforada y por un anillo de soporte superior (218), que se extiende desde la cubierta hasta el canal ascendente (216), teniendo el anillo de soporte superior perforaciones o grandes aberturas, definiendo el canal ascendente (216) una primera trayectoria de fluido a través del canal ascendente entre una porción superior de la cavidad interior y una porción inferior de la cavidad interior; y
 15 un anillo (222), definido entre el canal ascendente y la cubierta, definiendo además el anillo una segunda trayectoria de fluido, estando la segunda trayectoria de fluido acoplada a la primera trayectoria de fluido y extendiéndose a través de las perforaciones o de las grandes aberturas del anillo de soporte superior (218), a través del anillo (222), y acoplado de manera fluida a la porción inferior de la cavidad interior a través de la placa de soporte inferior perforada (214);
caracterizado por
 un intercambiador de calor (424), dispuesto exteriormente con respecto a la cubierta, y que está en comunicación fluida con la cavidad interior, teniendo el intercambiador de calor un colector de tubo superior horizontal (223a) y un colector de tubo inferior horizontal (223b), unidos por una serie de tubos intercambiadores de calor verticales (226).
 20
 25

2. El envase de barras de combustible nuclear gastado (200) de la reivindicación 1, que comprende además un primer recinto hemisférico acoplado a la cubierta en un extremo superior de la cubierta, comprendiendo el primer recinto hemisférico una superficie interior con radios que define una porción superior de la cavidad interior, y, opcionalmente, que comprende además un segundo recinto hemisférico acoplado a la cubierta en un extremo inferior de la cubierta, comprendiendo el segundo recinto hemisférico una superficie interior con radios que define una porción inferior de la cavidad interior.
 30

3. El envase de barras de combustible nuclear gastado (200) de la reivindicación 1, en el que la placa de soporte inferior (214) y el canal ascendente (216) forman una cesta.
 35

4. El envase de barras de combustible nuclear gastado de la reivindicación 1, en el que el colector de tubo superior (223a) está conectado a la cubierta en una ubicación por debajo de un nivel de refrigerante 201 y por encima del anillo de soporte superior (218) por un conducto del colector (225a).
 40

5. El envase de barras de combustible nuclear gastado de la reivindicación 4, en el que el conducto del colector 225a está inclinado de manera que el líquido que fluye a través del conducto está siempre en la dirección descendente.

6. Un método para disipar el calor de desintegración generado por una barra de combustible nuclear gastada, comprendiendo el método:
 45

cargar al menos una barra de combustible nuclear gastado en el envase de barras de combustible nuclear gastado de la reivindicación 1;
 50 sumergir el envase de barras de combustible nuclear gastado en un fluido de transferencia de calor contenido en una piscina de combustible gastado;
 transferir el calor de desintegración de la barra de combustible nuclear gastado al refrigerante fluido; y
 transferir el calor de desintegración del refrigerante fluido al fluido de transferencia de calor 5 en la piscina de combustible gastado.
 55

7. El método de la reivindicación 6, en el que uno de:

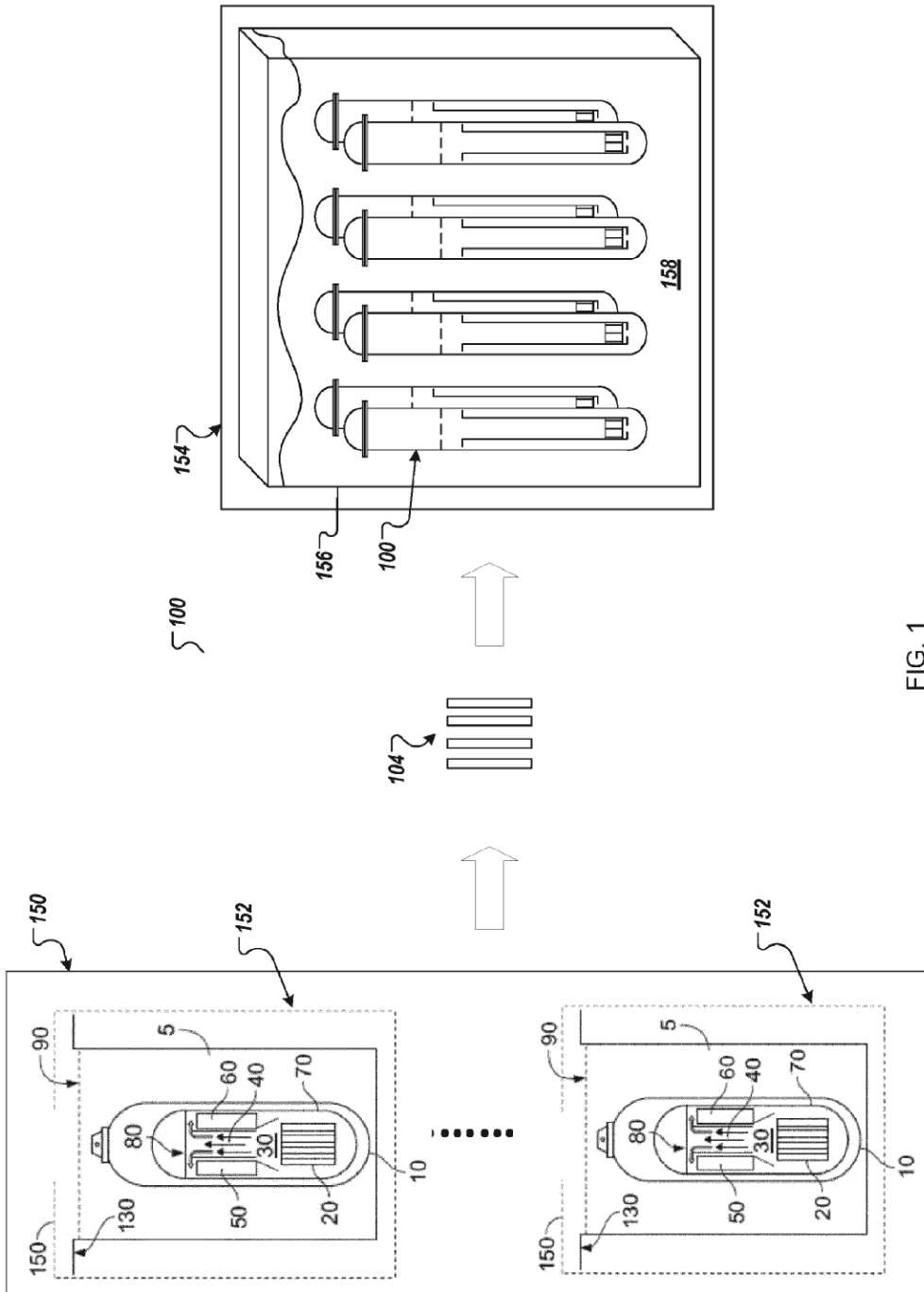
- a) una tasa a la que se transfiere el calor de la barra de combustible gastado es al menos tan alta como la tasa a la que la barra de combustible nuclear gastado produce calor de desintegración;
- 60 b) hacer circular el refrigerante fluido dentro de la cavidad interior del envase de combustible gastado a través de circulación natural; y
- c) exponer una superficie exterior del combustible gastado del envase al aire ambiente.

8. Método de la reivindicación 6, que comprende, además:

65 exponer una superficie exterior del envase de combustible gastado al aire ambiente;

basándose en la exposición al aire ambiente, cambiar de fase una porción del refrigerante fluido de un líquido a un gas en el envase de combustible gastado; y
cambiar de fase el gas de nuevo a un condensado líquido en una superficie interior del envase de combustible gastado basándose, al menos en parte, en la transferencia de calor entre el gas y el aire ambiente.

- 5
9. El método de la reivindicación 8, que comprende además hacer circular al menos una porción del condensado líquido en la superficie interior a una piscina de refrigerante fluido en una porción inferior del envase.



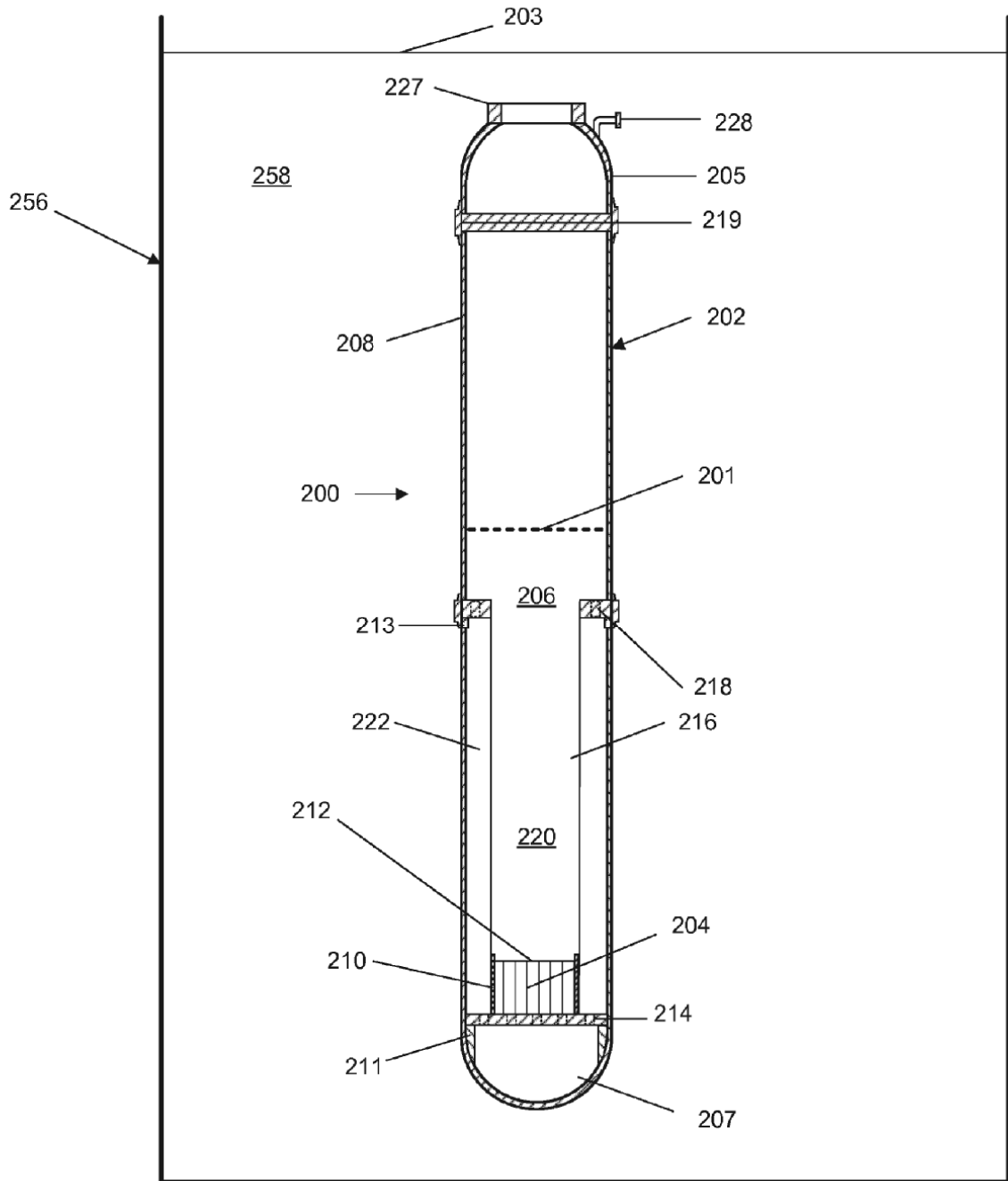
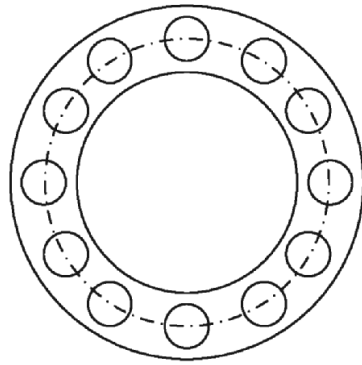
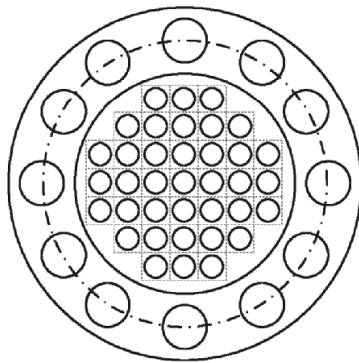


FIG. 2A



218



214

FIG. 2B

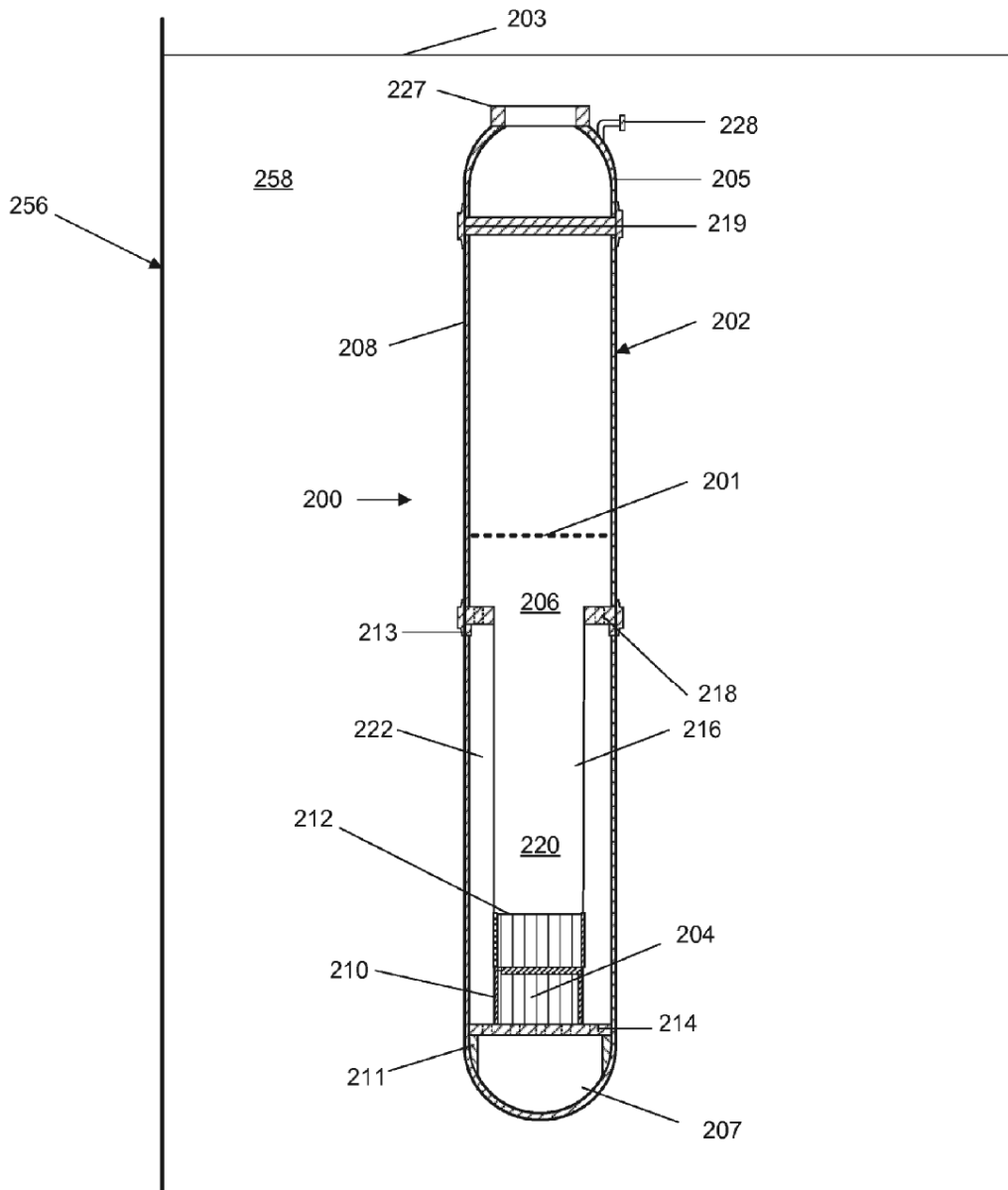


FIG. 2C

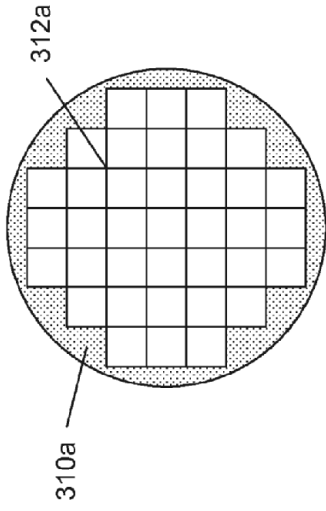


FIG. 3A

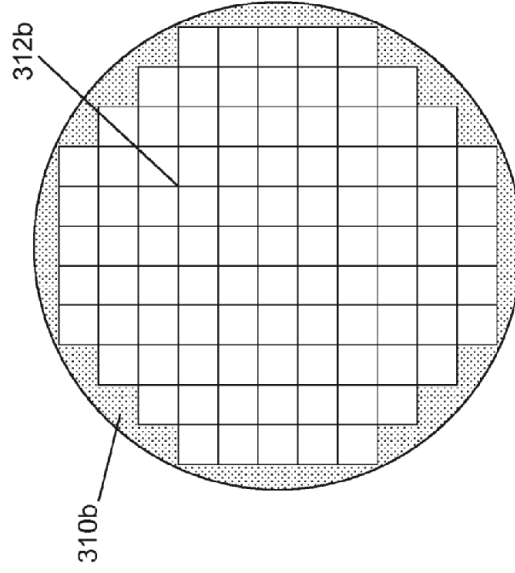


FIG. 3B

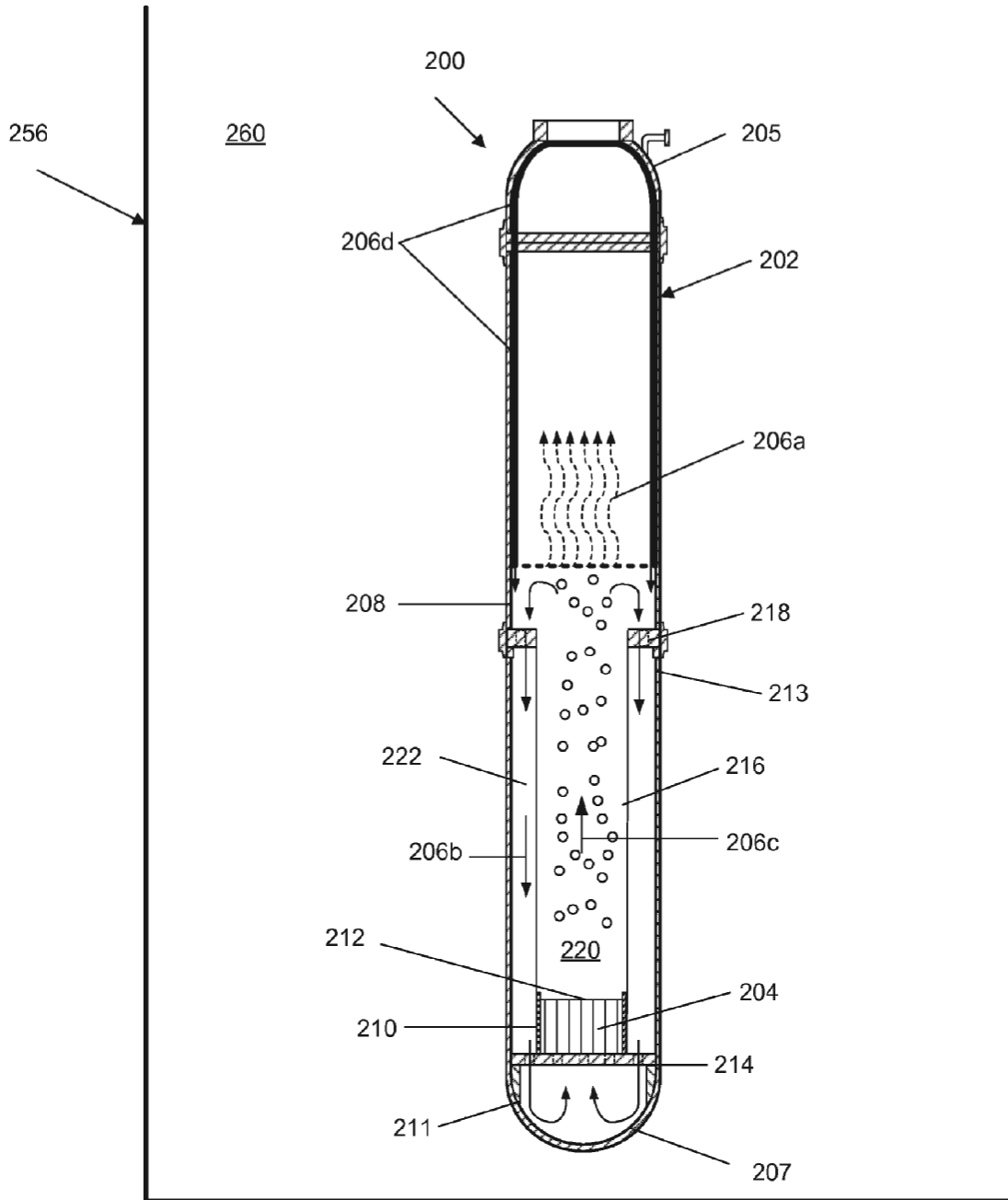


FIG. 4

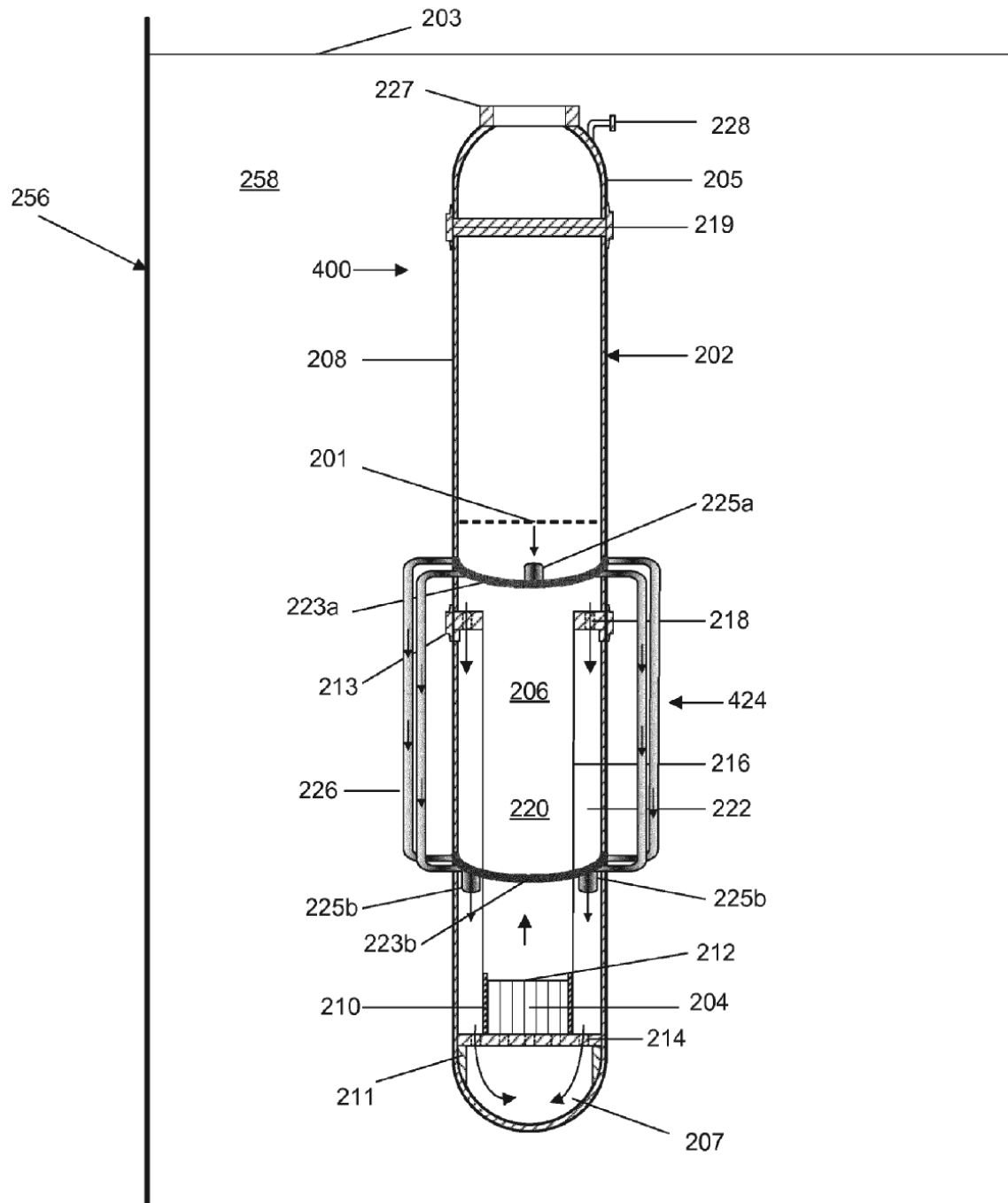


FIG. 5A

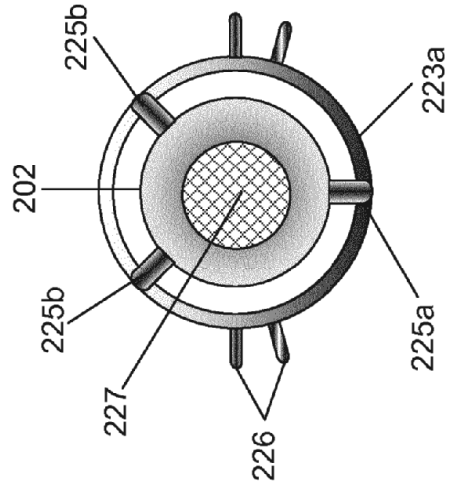


FIG. 5B

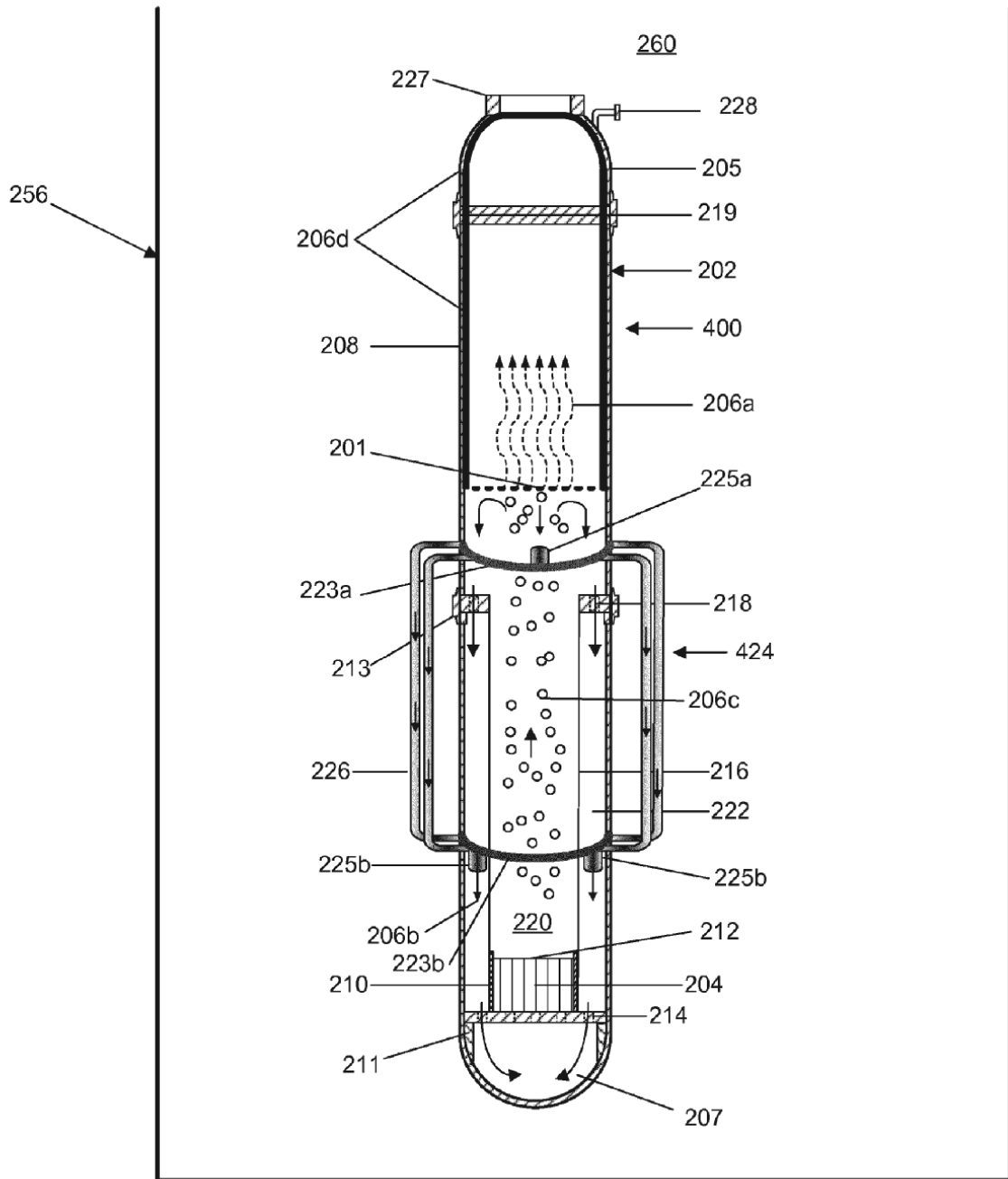


FIG. 5C

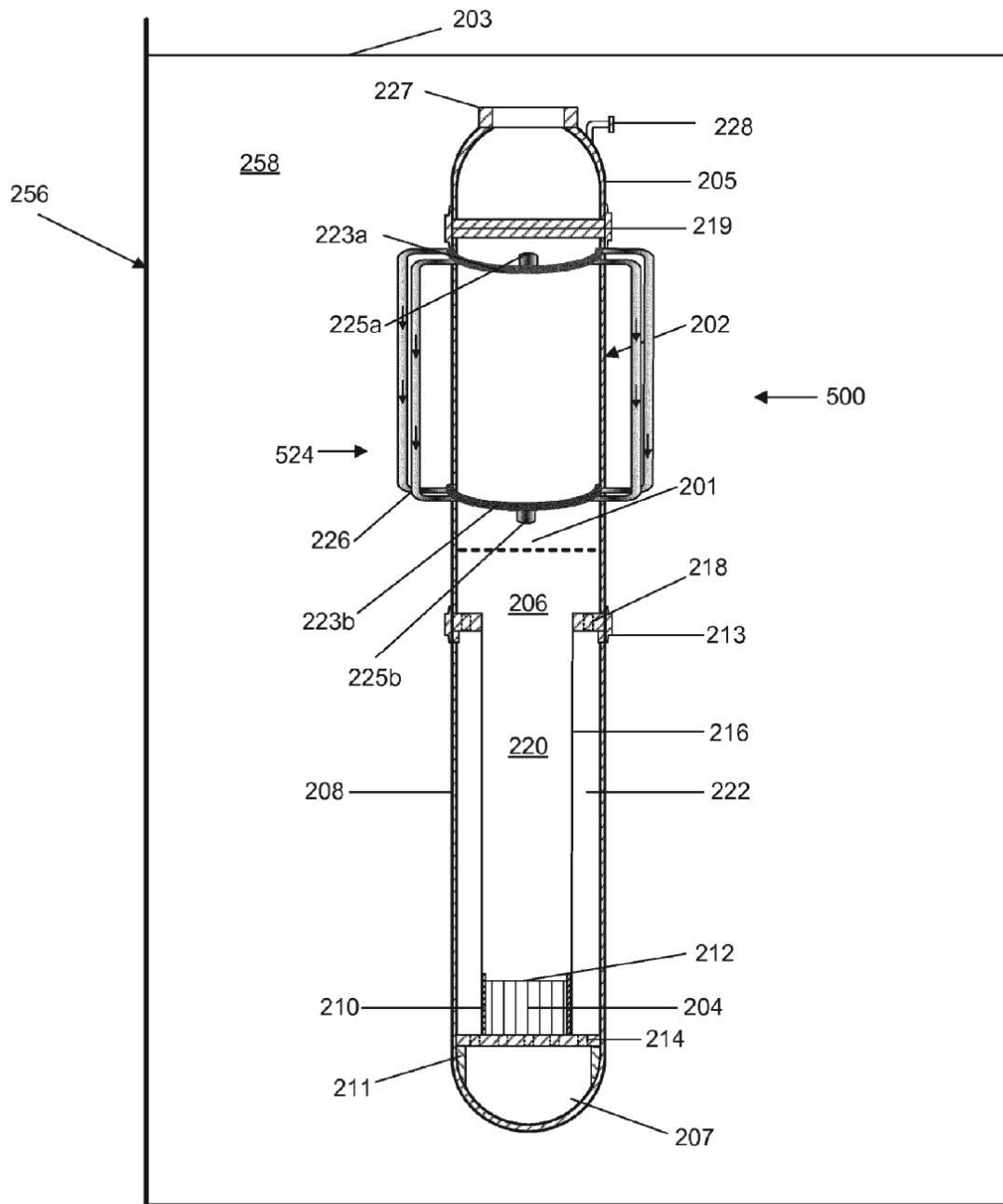


FIG. 6A

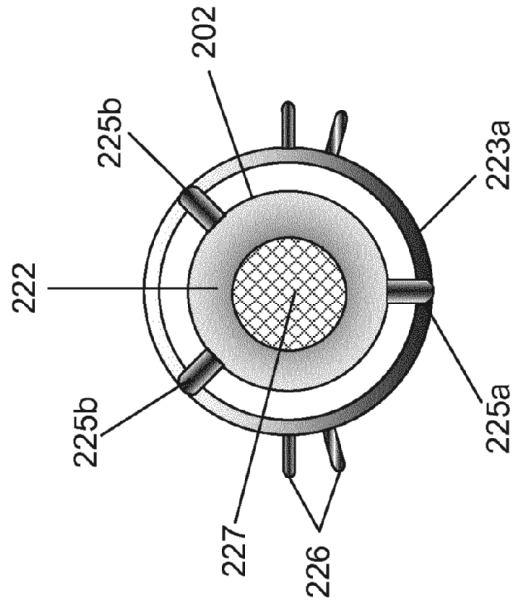


FIG. 6B

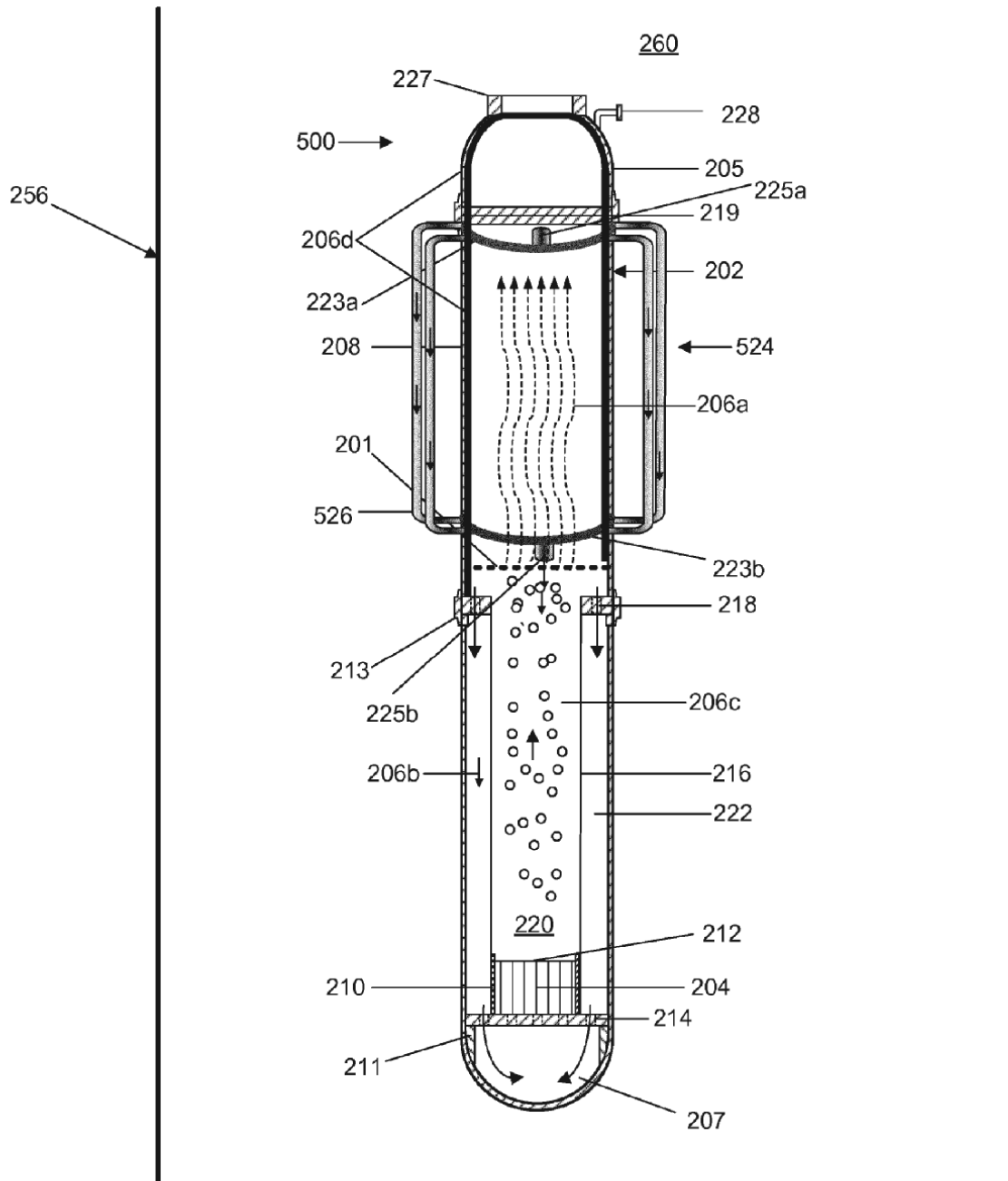


FIG. 6C

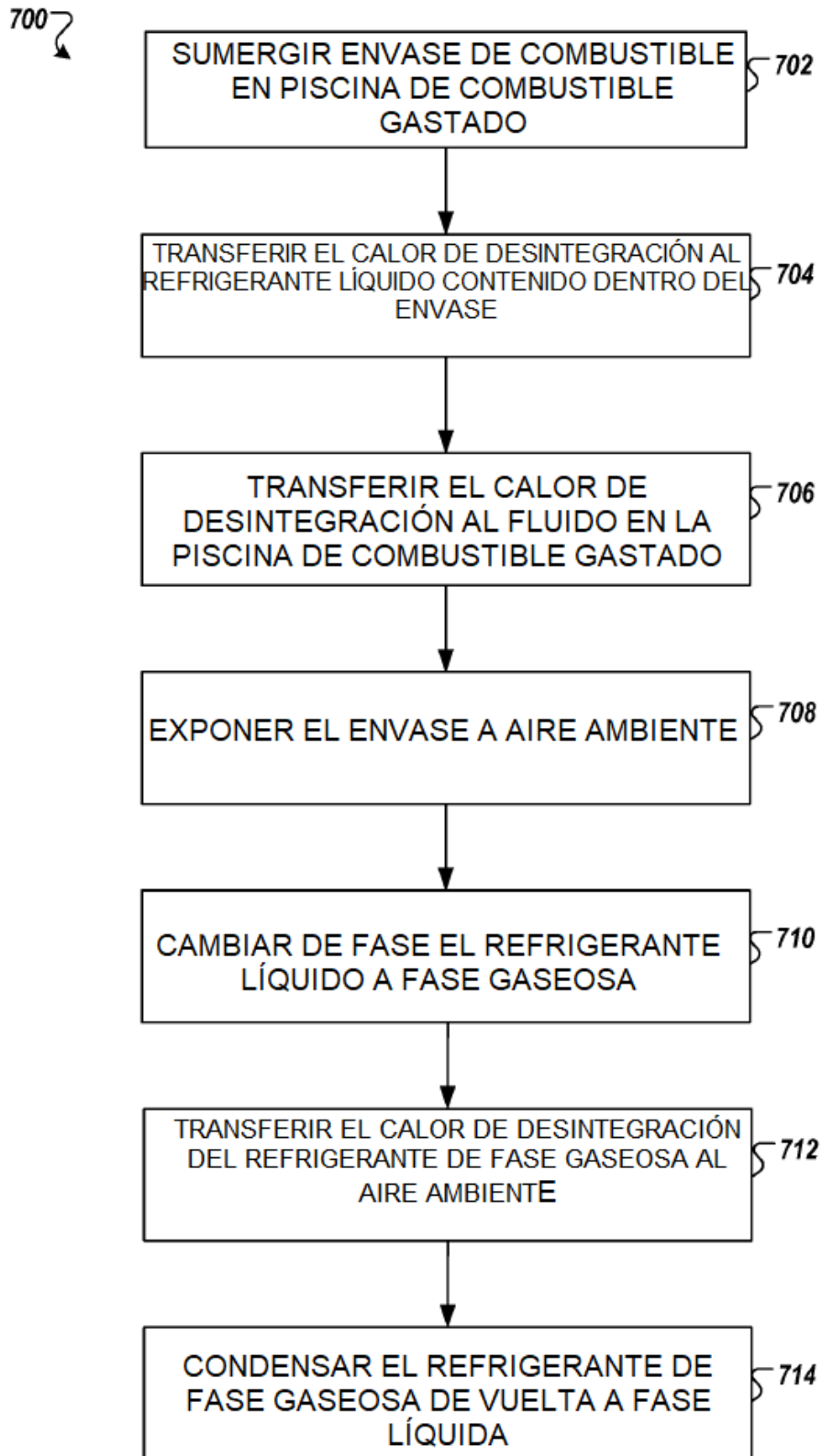


FIG. 7

800 ↷

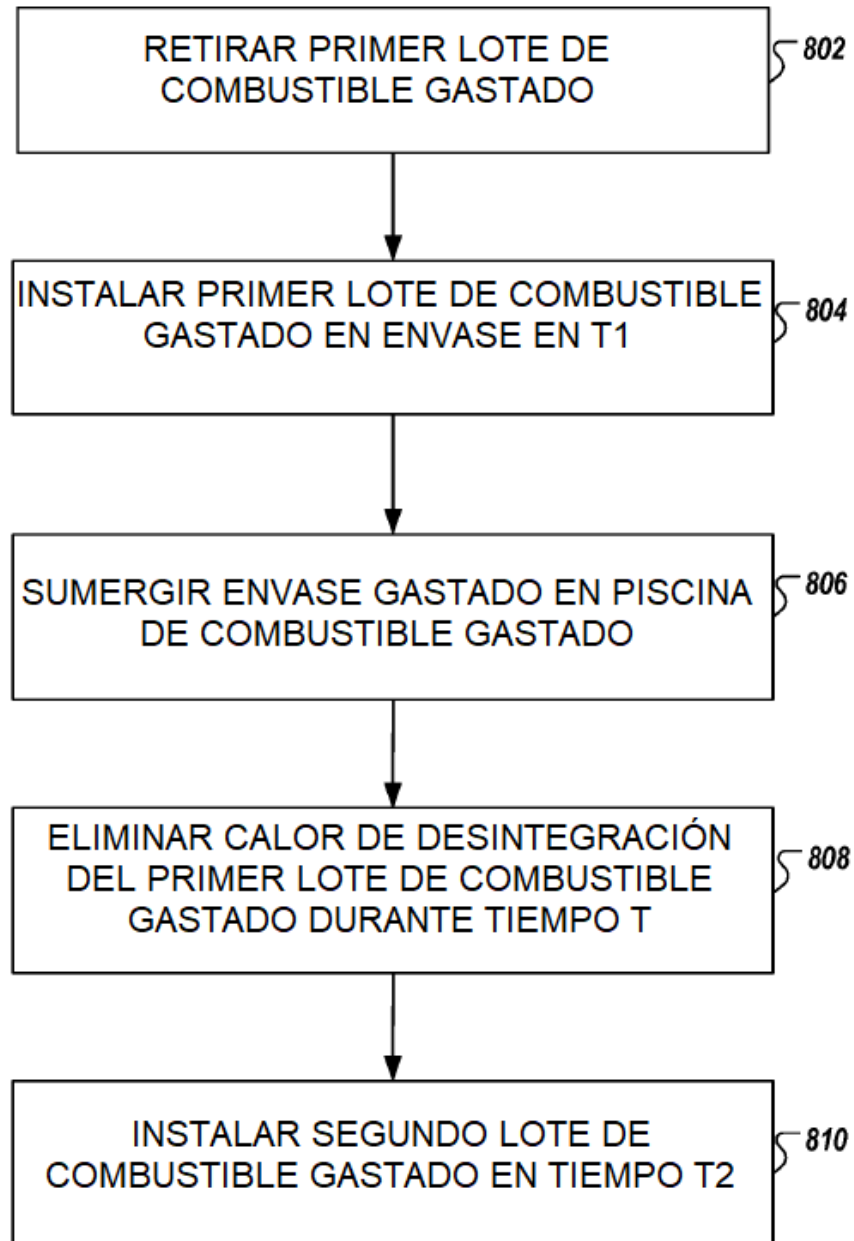


FIG. 8