

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 649 687**

51 Int. Cl.:

G21C 1/22	(2006.01)
G21C 1/03	(2006.01)
G21C 1/32	(2006.01)
G21C 5/02	(2006.01)
G21C 17/00	(2006.01)
G21C 3/54	(2006.01)
G21C 5/12	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.02.2013 PCT/CA2013/050090**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **15.08.2013 WO13116942**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.02.2013 E 13746701 (5)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.08.2017 EP 2815404**

54 Título: **Reactor integrado de sales fundidas**

30 Prioridad:

06.02.2012 US 201261633071 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.01.2018

73 Titular/es:

**TERRESTRIAL ENERGY INC. (100.0%)
2425 Matheson Blvd. E. 8th Floor
Mississauga, ON L4W 5K4, CA**

72 Inventor/es:

LEBLANC, DAVID

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 649 687 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

Reactor integrado de sales fundidas

5 **Campo**

La presente divulgación se refiere en general a reactores nucleares (véase por ejemplo, los documentos DE1589751 y US6259760). Más específicamente, la presente divulgación se refiere a reactores nucleares de sal fundida.

10 **Antecedentes**

Los reactores de sal fundida (MSR) se desarrollaron principalmente a partir de los años 1950 a 1970, pero, en los últimos tiempos, ha habido un creciente interés mundial en este tipo de reactores. Los conceptos más antiguos se vuelven a evaluar y se presentan nuevas ideas. Esta clase de reactor nuclear tiene una gran cantidad de ventajas sobre los reactores nucleares actuales, entre las que se incluyen los costes de capital potencialmente más bajos, la seguridad general, el perfil de residuos de larga duración y la sostenibilidad de los recursos.

Con las ventajas de los MSR también vienen algunos importantes desafíos tecnológicos que conducen a difíciles decisiones de diseño básicas. El primero y probablemente el más importante es si y cómo puede emplearse un moderador de neutrones. El grafito, en casi todos los casos, se ha elegido como moderador, ya que se comporta muy bien en contacto con las sales de flúor usadas en los MSR. Estas sales son mezclas eutécticas de fluoruros fisionables y fértiles (UF₄, ThF₄, PuF₃, etc.) con otras sales de soporte tales como LiF, BeF₂ o NaF. El uso de grafito como moderador masivo dentro del núcleo del MSR tiene muchas ventajas. Por ejemplo, proporciona un espectro de neutrones más blando o más termalizado que proporciona un control mejorado del reactor y un inventario de fisión inicial mucho más reducido. Además, el uso de grafito en todo el núcleo de un MSR permite la capacidad de emplear lo que se conoce como una zona externa poco moderada que actúa como un elemento absorbente neto de neutrones y ayuda a proteger la pared externa de la vasija del reactor de la exposición a neutrones dañinos. La vasija, que contiene el núcleo nuclear, se ha propuesto normalmente como fabricada de una aleación de alto contenido de níquel tal como Hastelloy N; sin embargo, son posibles otros materiales.

El uso de grafito dentro del núcleo del MSR (es decir, dentro del flujo de neutrones de un MSR) puede tener, sin embargo, un serio inconveniente. Es decir, que el grafito primero se contraerá y a continuación se expandirá más allá de su volumen original al estar expuesto a un flujo de neutrones rápidos. Puede calcularse un límite superior de la fluencia de neutrones rápidos totales y la operación del MSR es de tal manera que no se supera este límite. Este límite determina cuándo el grafito comenzará a expandirse más allá de su volumen original y dañará potencialmente los elementos de grafito circundantes o a la propia vasija del reactor. El tiempo que puede usarse el grafito en el núcleo del reactor está por lo tanto, relacionado directamente con la densidad de potencia local y, por lo tanto, con el flujo de neutrones rápidos que experimenta. Un núcleo de baja densidad de potencia puede usar el mismo grafito durante varias décadas. Este es el caso de muchos reactores anteriores que emplean grafito, tales como los reactores Magnox y AGR refrigerados por gas británico. Eran extremadamente grandes y tenían una baja densidad de potencia por razones termohidráulicas, pero esto permitió una vida útil del grafito extremadamente larga. Sin embargo, los MSR se beneficiarían de tener una densidad de potencia mucho mayor y, por lo tanto, la vida útil del grafito puede convertirse en un problema.

Los científicos e ingenieros que diseñan los MSR desde hace mucho tiempo se han enfrentado con opciones de diseño importantes. Una primera opción es simplemente diseñar el reactor para que sea bastante grande y con una densidad de potencia muy baja con el fin de obtener una vida útil total de 30 años o más del grafito. De este modo, puede sellarse todo el grafito dentro de la vasija y el grafito puede permanecer en la vasija durante la vida útil de diseño de la planta nuclear. Pueden encontrarse ejemplos de esta elección en los estudios de Oak Ridge National Laboratories (ORNL) a fines de la década de 1970 y a principios de la de 1980. Por ejemplo, ORNL TM 7207 propone un reactor de 1000 MWe que se denominó el diseño de "una vez a través de 30 años" que tendría una gran vasija de reactor de aproximadamente 10 metros de diámetro y altura con el fin de evitar la necesidad de reemplazar el grafito. Gran parte del trabajo posterior del Dr. Kazuo Furukawa de Japón, en lo que se conoce como la serie de diseños de reactores FUJI, también eligió esta ruta de núcleos nucleares grandes y de baja potencia. Estos núcleos muy grandes tienen desventajas económicas obvias en términos de la gran cantidad de material necesario para fabricar el núcleo y la vasija del reactor, y en el peso excesivo del núcleo. Estos desafíos aumentan el coste y la complejidad de la construcción del reactor circundante como entenderían los expertos en la materia. Debería añadirse que una vida útil de la planta nuclear de 30 años fue bastante aceptable en la década de 1970, pero los estándares de hoy en día se considerarían cortos. Ahora se desean 50 o 60 años y esto significaría un núcleo aún más grande para permitir esta vida sin el reemplazo del grafito.

Una segunda opción a menudo propuesta es el empleo de un núcleo de densidad de potencia más alta mucho más pequeño, pero planificando el reemplazo periódico del grafito. Este enfoque se asumió comúnmente en el trabajo de Oak Ridge National Laboratories (ORNL) en el diseño del Reactor reproductor de sal fundida desde 1968 hasta 1976, antes de que se cancelara el programa. Este diseño de reactor de 1000 MWe tenía una vasija externa de Hastelloy N que contendría cientos de elementos de grafito que encajarían entre sí y llenarían la vasija pero con

canales de paso para que el combustible de sal fundida fluyera y saliese del núcleo a unos intercambiadores de calor externos. En esta segunda opción, el reactor tiene dimensiones mucho más pequeñas que son de aproximadamente 6 metros de diámetro y altura. En este caso, el grafito, específicamente en el centro del núcleo con el mayor flujo de neutrones rápidos, solo tuvo una vida útil esperada de 4 años. Por lo tanto, el reactor tenía que
5 diseñarse para pararse y abrirse cada 4 años para reemplazar una gran fracción de los elementos de grafito. Esto puede no sonar demasiado difícil para quienes no son expertos en la materia, pero con sal fundida, los productos de fisión, algunos de los cuales son relativamente volátiles, están en la sal de combustible y también pueden incrustarse en una capa superficial de grafito y, por ejemplo, en las superficies metálicas interiores de la vasija del reactor. Por lo tanto, se sabía que la simple apertura de la vasija del reactor era una operación que podría ser difícil
10 de realizar sin permitir que los elementos radiactivos se propagaran a la zona de contención circundante. Además, el diseño de la vasija del reactor en sí es más complejo cuando debe abrirse periódicamente. Estos desafíos explican por qué a menudo se eligió la ruta de núcleos de densidad de potencia más baja y más grandes.

Una tercera opción es tratar de omitir el uso de grafito completamente. Esto es posible y da como resultado unos reactores normalmente con un espectro de neutrones mucho más duro. Un ejemplo de esta elección es el Reactor rápido de sal fundida (MSFR) propuesto por un consorcio de investigadores franceses y otros investigadores europeos a partir de alrededor del año 2005. Sin embargo, tiene serios inconvenientes. Por ejemplo, requiere más de cinco veces la carga de fisión de inicio y cualquier exposición accidental de la sal a un moderador, tal como el agua o incluso el contenido de hidrógeno en el hormigón, podría conducir a peligros de criticidad.
15

Más allá del problema de la vida útil del grafito, también están los problemas en cierta medida relacionados con la vida útil de la propia vasija del reactor y de los intercambiadores de calor primarios.
20

La pared de la vasija del reactor también puede tener una vida útil limitada debido a la fluencia de neutrones con tanto neutrones térmicos como rápidos potencialmente provocadores de problemas. El material más comúnmente propuesto es una aleación de alto contenido de níquel, tal como la Hastelloy N, con un comportamiento razonablemente bien comprendido y límites permitidos de fluencia de neutrones. Como tal, se requiere un gran esfuerzo en el diseño del núcleo para limitar la exposición de los neutrones y/o disminuir la temperatura de operación de la pared de la vasija. Además, el añadir grosor a la pared puede ayudar a medida que se pierde fuerza
25 con el aumento de la exposición a neutrones. Esto suma peso y gasto. Por lo tanto, es un desafío tener una vida útil de 30 a 60 años de la vasija del reactor.
30

Otro desafío de diseño son los intercambiadores de calor primarios que transfieren el calor desde la sal de combustible primaria radiactiva a una sal refrigerante secundaria. Esta sal refrigerante normalmente transfiere calor a un medio de trabajo como vapor, helio, CO₂, etc. En algunos casos, estos intercambiadores de calor están en el exterior o son externos a la vasija del reactor, lo que parece ser el caso de todos los diseños de ORNL de los años 1950 a 1980. También pueden estar localizados dentro de la propia vasija del reactor, que tiene su propio conjunto de ventajas y desafíos. Una gran ventaja de los intercambiadores de calor internos es que no es necesario que la radiación salga del reactor, ya que solo la sal refrigerante secundaria entra y sale de la vasija.
35

Para tanto los intercambiadores de calor internos como externos, el gran reto es, o en servicio o en sustitución. Cuando se abre un MSR, esto puede conducir potencialmente a la liberación de radiactividad en una zona o espacio de contención. El ORNL, por ejemplo, propone unos tubos comunes en intercambiadores de calor de carcasa externos al núcleo, cuatro unidades de intercambiador de calor por reactor de 1000 MWe. En el caso de fugas de algún tubo, la operación no consistía en fijar o taponar los tubos, sino en abrir la carcasa y extraer todo el haz de tubos y reemplazarlos con un nuevo haz. Solo después de un período de refrigeración se tomaría una decisión sobre la reparación y la reutilización del haz o un repositorio sencillo. Por lo tanto, es evidente que las técnicas de servicio y/o reemplazo del intercambiador de calor primario son un gran desafío en el diseño del MSR.
40

Además, cuando se sustituyen o bien el grafito o los intercambiadores de calor, entonces el problema de su almacenamiento seguro debe dirigirse también a como se convertirán significativamente en radiactivos durante la operación. Esto representa otro desafío más en el diseño general de la planta de MSR.
45

Debería destacarse, además, que el campo del diseño nuclear relacionado de los reactores de alta temperatura enfriados con sal de fluoruro, (conocidos como FHRs) tiene problemas muy similares. En este trabajo, el diseño del reactor puede ser muy similar, pero en lugar de que el combustible esté en la sal de fluoruro, está en forma sólida dentro del moderador de grafito que usa la forma de combustible conocida como TRISO. En este caso, la vida útil limitada del grafito también es una función de la vida útil de los combustibles TRISO sólidos; sin embargo, todos los demás problemas y desafíos de diseño son muy similares al trabajo de diseño de MSR. En los FHR, la sal refrigerante primaria no es tan radiactiva, pero normalmente contiene algunos elementos radiactivos, tales como el tritio, y un conjunto similar de desafíos están presentes cuando se planifica el uso de combustibles TRISO de bloque sólidos y reemplazarlos periódicamente. Un subconjunto del diseño de FHR implica el uso de una forma de combustible de bolas que facilita el reemplazo de combustible sin abrir la vasija del reactor; sin embargo, este tipo de diseño tiene su propio conjunto de problemas.
50
55
60

Por lo tanto, pueden desearse mejoras en los reactores nucleares.
65

Sumario

La presente divulgación se refiere a la integración de los elementos funcionales primarios del moderador de grafito y la vasija de reactor y/o los intercambiadores de calor primarios y/o barras de control en una unidad reemplazable
 5 única que tiene una densidad de potencia más económica y más alta mientras que conserva las ventajas de una unidad sellada. Una vez que se alcanza la vida útil de diseño de un reactor de sal fundida integral (IMSR), por ejemplo, en el intervalo de 3 a 10 años se desconecta, se retira y se reemplaza como una unidad y esta unidad también puede funcionar potencialmente como el medio o almacenamiento a largo plazo del grafito radiactivo y/o los intercambiadores de calor y/o las barras de control y/o la propia sal de combustible. Las funciones de eliminación de
 10 calor por desintegración y el almacenamiento de gas volátil también pueden integrarse in situ.

De acuerdo con la presente invención, se proporciona un método de operación de una planta de energía nuclear de acuerdo con la reivindicación 1. La planta de energía nuclear comprende un reactor de sal fundida (MSR) para producir calor, un sistema intercambiador de calor, y un sistema de uso final, recibiendo el sistema intercambiador de calor el calor producido por el MSR y proporcionando el calor recibido al sistema de uso final. El método comprende las etapas de: operar el MSR, comprendiendo el MSR una vasija, un núcleo moderador de grafito colocado en la vasija, y una sal fundida que circula al menos en la vasija, recibiendo el sistema intercambiador de calor el calor de la sal fundida; parar el MSR después de una duración de operación predeterminada, para obtener un MSR parado; separar cualquier conexión operacional entre el MSR apagado y cualquier parte del sistema intercambiador de calor localizado en el exterior de la vasija, obtener un MSR parado y separado; aislar el MSR parado y separado; y conectar operacionalmente un MSR de reemplazo a cualquier parte del sistema intercambiador de calor localizado en el exterior de la vasija del MSR de reemplazo.

Otros aspectos y características de la presente divulgación serán evidentes para los expertos en la materia tras la revisión de la siguiente descripción de las realizaciones específicas en relación con las figuras adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirán las realizaciones de la presente divulgación, solamente a modo de ejemplo, haciendo referencia a las figuras adjuntas

La figura 1 muestra un reactor nuclear de sal fundida de acuerdo con la presente divulgación.
 La figura 2 muestra una vista superior del reactor nuclear de sal fundida de la figura 1.
 La figura 3 muestra, de acuerdo con la presente divulgación, los conductos de sal fundida de entrada y salida dispuestos para desconectarse cuando se detecta radiactividad en los conductos de sal fundida o cuando se detecta un cambio de presión en los conductos de sal fundida.
 La figura 4 muestra otro reactor nuclear de sal fundida de acuerdo con la presente divulgación.
 La figura 5 muestra una vista superior del reactor nuclear de sal fundida de la figura 4.
 La figura 6 muestra otro reactor nuclear de sal fundida más de acuerdo con la presente divulgación.
 La figura 7 muestra un reactor nuclear de sal fundida adicional de acuerdo con la presente divulgación.
 La figura 8 muestra un reactor nuclear de sal fundida adicional de acuerdo con la presente divulgación.
 La figura 9 muestra un diagrama de flujo de un método de acuerdo con ciertos ejemplos de la presente divulgación.
 La figura 10 muestra una planta de energía nuclear de acuerdo con ciertos ejemplos de la presente divulgación.

Descripción detallada

La presente divulgación proporciona un reactor de sal fundida integral (IMSR). El IMSR de la presente divulgación tiene un núcleo de grafito que está permanentemente integrado con la vasija del IMSR, lo que significa que el núcleo de grafito está en la vasija del IMSR durante la vida útil del IMSR. Como tal, en el IMSR de la presente divulgación, el núcleo de grafito no es un núcleo de grafito reemplazable y permanece dentro del IMSR durante la vida útil operativa del IMSR. El núcleo de grafito está sujeto de manera fija dentro de la vasija del IMSR. Ventajosamente, esto elimina la necesidad de cualquier aparato que se requiera para reemplazar el núcleo de grafito en momentos predeterminados de acuerdo con una programación predeterminada. Una ventaja adicional es que el IMSR no requiere ningún puerto de acceso para permitir el acceso al núcleo de grafito para el reemplazo del núcleo de grafito. Una ventaja adicional del IMSR de la presente divulgación es que, después de la expiración del tiempo de vida útil del diseño del IMSR, el IMSR sirve como un contenedor de almacenamiento para cualquier materia radiactiva dentro del IMSR. Los componentes del IMSR incluyen la propia vasija del reactor y cualquier elemento de grafito del núcleo nuclear. Otros componentes pueden incluir los intercambiadores de calor primarios que pueden instalarse, en la vasija del reactor, durante la fabricación del IMSR. El IMSR está construido para operar (producir electricidad) durante una vida útil de diseño, que tiene en cuenta la expansión del núcleo de grafito del reactor a lo largo del tiempo y la integridad estructural del núcleo de grafito. Es decir, como se ha mencionado anteriormente en la sección de Antecedentes, el núcleo de grafito se expandirá con el tiempo más allá de su volumen original bajo el flujo de neutrones. La operación de los MSR en presencia de dicha expansión no es deseable ya que el núcleo de grafito puede sufrir roturas. El IMSR de la presente divulgación simplemente se apaga y se reemplaza después de la expiración de su vida útil de diseño. Otros componentes del IMSR pueden incluir tuberías tales como unos

conductos de entrada y unos conductos de salida de sal refrigerante, y el árbol de la bomba y el impulsor para mover (bombear) la sal refrigerante (el fluido refrigerante primario) cuando se emplea una bomba.

5 En algunas configuraciones de la presente divulgación, un IMSR que se ha parado puede simplemente permanecer en su zona de contención (celda caliente) que puede actuar como un disipador de calor para el calor de desintegración generado por el IMSR parado. El calor de desintegración simplemente irradia el IMSR a través de la pared de la vasija del IMSR y hacia la zona de contención y finalmente hacia el entorno exterior. Los MSR en general funcionan a temperaturas en el entorno de los 700 °C, el calor radiante es muy eficaz para eliminar el calor de desintegración. Además, para acelerar la eliminación del calor de desintegración, el IMSR de la presente
10 divulgación, puede añadirse una sal tampón en la zona de contención para rodear al IMSR; esto permite una extracción de calor más rápida desde el IMSR a la zona de contención. En ciertas configuraciones, el IMSR puede tener un tapón congelado de sal que puede fundirse para permitir que el drenaje del refrigerante primario desintegre los tanques de eliminación de calor.

15 En alguna otra configuración, durante la operación del IMSR y después de la parada del IMSR, el IMSR puede ser una unidad sellada que simplemente retiene los gases de fisión producidos dentro de la vasija sellada de IMSR o, los gases de fisión pueden liberarse lentamente a cualquier sistema de tratamiento de gases de fisión adecuado.

20 La figura 1 muestra la vista delantera de un IMSR 90 de la presente divulgación. 100 es la propia vasija del reactor, fabricada de Hastelloy N, una aleación de alto contenido de níquel, o cualquier otro material adecuado, como la aleación de molibdeno TZM (aleación de titanio-circonio-molibdeno). La vasija de reactor 100 puede denominarse vasija de reactor sellado en el sentido de que cualquier núcleo de grafito dentro de la vasija de reactor 100 está sellado en su interior; es decir, esto significa permanecer dentro de la vasija de reactor 100, y no reemplazarse durante la vida útil operativa del IMSR. Como el IMSR 100 de la presente divulgación puede tener una corta vida de
25 diseño de aproximadamente 5 años, las paredes de la vasija de reactor 100 pueden ser más delgadas que las requeridas para los MSR que tienen una vida de diseño de más de 30 años y se les puede permitir operar de una manera de mayor fluencia de neutrones, o a una temperatura de operación más alta que los MSR de larga duración. 102 muestra la región del núcleo o el núcleo que puede ser una masa simple de grafito que define unos canales 115 para que fluya a su través un combustible de sal fundida 108. El núcleo 102 también puede denominarse región de
30 núcleo, núcleo de moderador de grafito y núcleo moderador de neutrones de grafito. Como el núcleo 102 de la configuración de la figura 1 no necesita reemplazarse, la construcción del núcleo 102 puede simplificarse en la medida en que requiere cualquier característica estructural que permita y/o facilite su extracción de la vasija 100 o su reemplazo. 104 muestra un reflector (reflector neutrónico) para reflejar neutrones hacia el núcleo 102 y para proteger la unidad de intercambiador de calor primario 106 del flujo de neutrones excesivo. El reflector 104 puede ser
35 opcional. En ausencia del reflector 104, cualquier estructura metálica, por ejemplo, los conductos y los intercambiadores de calor localizados en el IMSR por encima del núcleo 102 sufran probablemente daños por neutrones. El reflector 104 puede fabricarse de acero inoxidable ya que no tiene un fin estructural, por lo que el daño por irradiación del reflector 104 tiene poca importancia. El reflector 104 tiene unos canales 99 o tuberías definidos en el mismo para permitir que el combustible de sal fundida 108 fluya desde la unidad de intercambiador de calor primario 106 a través de los canales 115 definidos por el núcleo 102. Los canales 115 pueden variar en diámetro o en espaciado de red en diferentes áreas del núcleo 102 para crear, por ejemplo, una región submoderada así como una zona de reflector exterior en el grafito, como se entenderá por los expertos en la materia. En el ejemplo de IMSR de la figura 1, se muestra el flujo del combustible de sal fundida 108 en la vasija 100 por las flechas 109.

45 La unidad de intercambiador de calor primario 106 tiene una abertura 117 que recibe la sal de combustible 109 proporcionada por la unidad de árbol de accionamiento e impulsora 116, que se acciona por una bomba 118. La unidad de intercambiador de calor primario 106 contiene una serie de intercambiadores de calor. Un intercambiador de calor de este tipo se muestra con el número de referencia 119. Cada intercambiador de calor 119 está conectado a un conducto de entrada 114 y a un conducto de salida 112 que propaga una sal refrigerante 113 (que también puede denominarse sal refrigerante secundaria) desde el exterior de la vasija 100, a través del intercambiador de calor 119, hasta el exterior de la vasija 100. La sal refrigerante 113 fluye a través del conducto de entrada 114, el intercambiador de calor 119 y el conducto de salida 112 en la dirección representada por las flechas 111. La sal refrigerante 113 recibe el calor del intercambiador de calor 119, que recibe el calor de la sal de combustible 108 que fluye, o circula alrededor, del intercambiador de calor 119. La sal refrigerante secundaria 113 se bombea por una
50 bomba o sistema de bombeo (no mostrado). Para mayor claridad, el intercambiador de calor 119 se muestra como un conducto recto que conecta el conducto de entrada 114 al conducto de salida; sin embargo, como entenderá el experto en la materia, el intercambiador de calor 119 puede tener cualquier forma adecuada y puede incluir cualquier cantidad de conductos que conecten el conducto de entrada 114 al conducto de salida 112.

60 La unidad de intercambiador de calor 106, los intercambiadores de calor 119 que comprende, y los conductos de entrada 114 y los conductos de salida 112 conectados a los intercambiadores de calor 119, son todos parte de un sistema intercambiador de calor que se usa para transferir el calor desde el IMSR a una sistema o aparato tal como, por ejemplo, un generador de vapor. Un sistema intercambiador de calor de este tipo se muestra en otra parte de la divulgación, en relación con una planta de energía nuclear. Los conductos de entrada 114 y los conductos de salida 112 están conectados operativamente a un sistema de bombeo, no mostrado, que también forma parte del sistema intercambiador de calor. El sistema de bombeo hace circular la sal refrigerante a través de los conductos de entrada
65

114, los conductos de salida 112 y los intercambiadores de calor 119. Los conductos de entrada 114 y los conductos de salida 112 pueden conectarse operativamente a unos intercambiadores de calor adicionales que proporcionan el calor de la sal refrigerante que circula en los intercambiadores de calor 119, los conductos de entrada 114 y los conductos de salida 112 a otro medio, tal como, por ejemplo, otro fluido tal como agua.

5 En el ejemplo de la figura 1, el sistema intercambiador de calor está parcialmente comprendido en la vasija 100 como los intercambiadores de calor 119 y una parte del conducto de entrada 114 y del conducto de entrada 112 está en el interior de la vasija 100. Además, el sistema intercambiador de calor está parcialmente en el exterior de la vasija 100 debido a que otra parte del conducto de entrada 114 y del conducto de salida 112 está en el exterior de la vasija 100, como son el sistema de bombeo mencionado anteriormente y cualquier intercambiador de calor adicional.

15 También en el ejemplo de la figura 1, la sal de combustible fundida circula solo en la vasija 100. Es decir, en condiciones normales de operación, es decir, condiciones en las que no se producen roturas en los equipos, la sal de combustible fundida 108 no sale de la vasija 100.

20 El IMSR 90 está colocado en una celda caliente cuya función es evitar que la radiación o los elementos radiactivos, presentes o generados en el IMSR 90, atraviesen las paredes de la celda. Una pared de celda caliente de este tipo se muestra con el número de referencia 130. El conducto de salida 112, y el conducto de entrada 114, pueden pasar a través de la abertura en la pared de celda caliente 130 y pueden alcanzar un intercambiador de calor secundario (no representado), dando calor a, o un tercer lazo de fluido de trabajo o al medio de trabajo final tal como vapor o gas.

25 El nivel de sal de combustible fundida 108 dentro de la vasija del reactor se representa por el número de referencia 122. Los gases de fisión se recogerán por encima de este nivel de líquido 112 y pueden retenerse en la vasija 100 o permitírseles el tránsito, a través de una línea de gas de descarga 120, a una zona de aislamiento de gas de descarga (no representada). Estos gases de descarga pueden moverse al área de aislamiento mediante un sistema de suspensión de helio (no representado).

30 Un ejemplo de las dimensiones del IMSR de la figura 1 puede ser de 3,5 metros de diámetro, 7-9 metros de altura, y puede proporcionar una potencia total de 400 MW_{térmicos} (hasta aproximadamente 200 MW_{eléctricos}). Esta densidad de potencia daría una vida útil del grafito y, por lo tanto, una vida útil de diseño del IMSR de entre 5 y 10 años. Estas dimensiones del IMSR 90 hacen que el transporte y el reemplazo del IMSR 90 sean manejables y la densidad de potencia permite muchos años de uso de cualquier grafito empleado. La geometría del núcleo 102 y de la vasija 100 puede ser cilíndrica.

40 La figura 2 muestra una vista de arriba hacia abajo de la parte superior de un ejemplo de un IMSR de la presente divulgación. La figura 2 muestra el motor de bomba 118 y la línea de gas de descarga 120. Además, la figura 2 muestra una serie de cuatro conductos de entrada 114 y cuatro conductos de salida 112 que pasan desde la vasija de reactor 100 a través de la pared de celda caliente primaria 130. Se representan cuatro pares separados de líneas (un par de líneas tiene un conducto de entrada 114 y un conducto de salida 112); sin embargo, cualquier número adecuado de dichos pares de líneas (y el intercambiador de calor asociado 119) también está dentro del alcance de la presente divulgación. Cada par de líneas está conectado a un intercambiador de calor comprendido en la unidad de intercambiador de calor 106.

45 Una ventaja de mantener los intercambiadores de calor primarios dentro del IMSR y simplemente sustituir el IMSR después de su vida útil de diseño, es que no necesitan desarrollarse las técnicas para la reparación, la eliminación, y/o la sustitución del intercambiador de calor. Sin embargo, deben hacerse planes para posibles fallos y fugas entre la sal de combustible primario y el refrigerante secundario. Compartimentalizando la unidad de intercambiador de calor primario 106 en múltiples intercambiadores de calor independientes 119, cualquier fallo de los intercambiadores de calor 119 y/o fuga de la sal de combustible fundida 108 en el refrigerante 113 puede gestionarse de manera eficaz.

55 La figura 3 muestra una configuración de una disposición de desconexión para cortar el flujo del refrigerante secundario 113 a través de los conductos de entrada 114 y los conductos de salida 112 en la dirección dada por las flechas 111. Para mayor claridad, solo un par de líneas (un conducto de entrada 114 y un conducto de salida 112) se muestran en la figura 3. En el ejemplo de la figura 3, un detector de radiactividad 300, por ejemplo, un contador Geiger se coloca junto a una línea de salida 112 y puede detectar cualquier fuga de sal combustible primario radioactivo en la línea de salida 112. Cuando se detecta radiactividad más allá de un nivel predeterminado mediante el detector de radiactividad 300, un controlador 301, conectado al detector de radiación 301, controla los mecanismos de parada 304 que están conectados al conducto de salida 112 y al conducto de entrada 114 para parar el conducto de salida 112 y su correspondiente conducto de entrada 114. Los mecanismos de parada son para aislar el intercambiador de calor individual 119 (no mostrado en la figura 2) conectado al conducto de entrada 114 y al conducto de salida 112 ahora parados. Los mecanismos de parada 304 también pueden ser para cortar la conexión física a lo largo del conducto de entrada 114 y del conducto de salida 112. Los mecanismos de parada pueden incluir cualquier tipo adecuado de válvulas de cierre y cualquier tipo adecuado de dispositivos de engarzado,

estos últimos para engarzar el conducto de entrada 114 y el conducto de entrada 112 parados. Además, si se produce una fuga de fluido de refrigerante secundario 113 a la sal de combustible fundida 108, puede detectarse midiendo una caída de presión, usando uno o más detectores de presión 303 montados o conectados de otra manera operativa al conducto de entrada 114, al conducto de salida 112 o ambos. El uno o más detectores de presión están conectados operativamente al controlador 301, que puede parar los mecanismos de parada 304 al determinar que se ha producido una caída de presión (o cualquier cambio anormal de presión) en la sal refrigerante 113 que circula en el conducto de entrada 114, en el conducto de salida 112, o en ambos.

Al elegir sales portadoras primarias compatibles para la sal de combustible fundida 108 y la sal refrigerante secundaria 113, puede tolerarse la mezcla de estos fluidos. Por ejemplo, si la sal portadora primaria es LiF-BeF₂ y/o NaF-BeF₂, entonces una sal refrigerante secundaria de LiF-BeF₂ y/o NaF-BeF₂ sería compatible con la sal portadora primaria en los casos de mezcla limitada, es decir, en los casos donde el volumen de sal refrigerante 113 filtrado en la sal de combustible fundida 108 son tolerables en términos de sus efectos sobre la producción y absorción de neutrones. Al tener muchos, tal vez 4 pero incluso hasta 10 o más pares de conductos de entrada/conductos de salida (y los intercambiadores de calor correspondientes 119), la pérdida de uno o más intercambiadores de calor individuales puede hacer poco a la capacidad general de transferir calor desde la unidad de intercambiador de calor primario 106 a la sal refrigerante 113 ya que los otros pares restantes de conductos de entrada/conductos de salida pueden tomar simplemente la carga de intercambio de calor añadida o el IMSR puede reducir su potencia nominal ligeramente. Los intercambiadores de calor son, a diferencia de muchos otros sistemas en los que hay muy poca economía de escala, de tal manera que 10 pares más pequeños de entradas/salidas o haces de tubos no tendrán un coste combinado mucho más que una unidad grande.

La figura 4 muestra otro IMSR 92 de acuerdo con la presente divulgación. Como en el IMSR 90 de la figura 1, el IMSR 92 de la figura 4 comprende una vasija 100, un reflector 104 y un núcleo 102. Además, el IMSR 92 comprende una barra de control 400 (que puede ser opcional) y una serie de unidades de intercambiador de calor 106. Cada unidad de intercambiador de calor tiene una unidad de árbol de accionamiento e impulsora 116 para bombear la sal de combustible fundida 108 a través de las unidades de intercambiador de calor 106. Para mayor claridad, no se muestran los motores de bomba que accionan las unidades de árbol e impulsora 116. También para mayor claridad, no se muestran los conductos de entrada y los conductos de salida que propagan una sal refrigerante a través de las unidades de intercambiador de calor 106.

La sal fundida de combustible 108 que se bombea a través de las unidades de intercambiador de calor 106 se dirige hacia abajo, hacia la periferia del núcleo 102 por una estructura de deflector 402. La sal de combustible fundida fluye hacia el fondo de la vasija 100 y a continuación hacia arriba a través de los canales 115 del núcleo 102. Aunque se muestran dos canales 115 en la figura 4, cualquier número adecuado de canales 115 está dentro del alcance de la presente divulgación.

La figura 5 muestra una vista superior en sección transversal del MSR 92 mostrado en la figura 4. La vista superior de la figura 5 muestra 8 unidades de intercambiador de calor 106, teniendo cada una de las mismas un conducto de entrada 114, un conducto de salida 112, y una unidad de árbol de bomba e impulsora 116. También se muestra la barra de control 400.

La figura 6 muestra una vista en perspectiva lateral del IMSR de la figura 4. El IMSR 92 comprende seis unidades de intercambiador de calor 106, teniendo cada una de las mismas un conducto de entrada 114, un conducto de salida 112 y una unidad de árbol e impulsora 116. Las unidades de intercambiador de calor 106 están localizadas por encima del núcleo 102 y alrededor de un eje longitudinal de la vasija, siendo el eje longitudinal paralelo a la barra de control 400. La dirección del flujo de la sal de combustible fundida 108 está indicada por la flecha 109. Después de salir de los intercambiadores de calor individuales 106, el combustible fundido 108 fluye oblicuamente hacia abajo, guiado por la estructura deflectora 402 y, opcionalmente, por las particiones 404 que separan las salidas de las unidades de intercambiador de calor individuales.

El flujo de la sal de combustible fundida 108 a través del núcleo 102 puede estar en diferentes direcciones en diferentes configuraciones, por ejemplo, hacia arriba como se muestra en la figura 1 o hacia abajo como se muestra en la figura 4. Existen ventajas y desventajas en las direcciones de flujo hacia arriba y hacia abajo. Un flujo ascendente a través del núcleo como se muestra en la figura 4 tiene la ventaja de estar en la misma dirección que la circulación natural, pero puede hacer el uso de las bombas (las bombas que bombean la sal refrigerante a través de las unidades de intercambiador de calor) un poco más difícil para dirigir el flujo a través de los intercambiadores de calor primarios.

En algunas configuraciones de la presente divulgación, las bombas y las unidades de árbol e impulsora pueden omitirse y el MSR en su lugar puede usar la circulación natural para hacer circular la sal de combustible fundida 108. Como tal, las bombas y las unidades de árbol e impulsora pueden ser opcionales donde la circulación cuando sea suficiente para hacer circular el combustible de sal fundida 108. La figura 7 muestra una configuración en donde se usa la circulación natural de la sal de combustible fundida 108. El MSR 94 de la figura 7 es similar al MSR 92 de la figura 6 con la excepción de que no se requieren bombas o unidades de árbol e impulsora. Más bien, la sal de combustible fundida 108 presente en los canales 115 se calienta a través de una reacción de fisión nuclear y fluye

hacia arriba hacia la región superior de la vasija 100. Una vez fuera de los canales 115, la sal fundida se enfría y comienza a fluir hacia abajo, a través de los intercambiadores de calor 105, y hacia el fondo de la vasija 100, donde la sal de combustible fundida enfriada vuelve a entrar en los canales para calentarse.

5 La figura 8 muestra otro IMSR de acuerdo con la presente divulgación. El IMSR 96 de la figura 8 tiene una vasija 100 en la que se coloca un núcleo moderador de grafito 102, que puede tener uno o más canales 115 definidos en el mismo. La vasija 100 está conectada a una unidad de intercambiador de calor 106 que está localizada fuera de la vasija 100. La unidad de intercambiador de calor 106 contiene una pluralidad de intercambiadores de calor (no mostrados); cada intercambiador de calor incluye un conducto de entrada 114 y un conducto de salida 112 que hacen circular la sal refrigerante a través del intercambiador de calor. Cada conducto de entrada 114 y conducto de salida 112 está conectado operativamente a un sistema de bombeo de sal refrigerante (no mostrado). El conducto de entrada 114 y el conducto de salida 112 se muestran atravesando una pared de celda caliente 130. La vasija 100 está conectada a la unidad de intercambiador de calor 106 a través de los conductos 700 y 702. Una bomba 704 hace circular una sal de combustible fundida 706 a través de la vasija 100, los canales 115, y el intercambiador de calor 106. La misma configuración mostrada en la figura 3 de detector de radiactividad, detectores de presión 303, mecanismos de parada y controlador, puede aplicarse también a la configuración de la figura 8.

Tras alcanzar el núcleo moderador de grafito 102 su vida útil operativa, los conductos 700 y 702 pueden separarse para desconectar físicamente la vasija 100 del resto del IMSR. Después de sellar la parte de corte de los conductos 700 y 702 unidos a la vasija 100, la vasija 100 puede disponerse en una instalación de contención y una nueva vasija con un nuevo núcleo moderador de grafito puede unirse a los conductos 700 y 702.

Las configuraciones de IMSR mostradas en las figuras 1-8 se han descrito como teniendo una sal de combustible fundida (108 o 706) que circula en el mismo. Sin embargo, unas modificaciones a las configuraciones de las figuras 1-8 permitirían que los IMSR mostrados en las mismas operen en un combustible nuclear sólido comprendido dentro del núcleo 102 en lugar de estar comprendido en la sal de combustible fundida. Por ejemplo, en la configuración de la figura 1, la sal de combustible fundida puede sustituirse por una sal fundida libre de combustible (combustible nuclear libre) y el núcleo 102 puede comprender combustible nuclear sólido tal como los combustibles TRISO. Además, como no hay gases de fisión a liberar en tales IMSR de combustible sólido, no habría ninguna necesidad de la línea de gas de descarga 120. Como se ha descrito anteriormente, sin embargo, hay ventajas similares a la invención de integrar un núcleo de combustible sólido sellado en la unidad de IMSR reemplazable.

La figura 9 muestra un ejemplo de una planta de energía nuclear 2000 que incluye un MSR 2002 tal como cualquiera de los IMSR 90, 92, 94, y 96 descritos anteriormente en relación a las figuras 1, 4, 6, 7 y 8. El MSR 2002 genera calor y proporciona el calor generado a un sistema intercambiador de calor 2004. El sistema intercambiador de calor 2004 puede incluir la unidad de intercambiador de calor 106 dispuesta en la vasija 100, que también incluye un núcleo moderador de grafito 102 tratado anteriormente en relación a las figuras 1, 4, 6, y 7. Con respecto al MSR 96 mostrado en la figura 8, el sistema intercambiador de calor 2004 puede incluir la unidad de intercambiador de calor 106, que se localiza en el exterior de la vasija 100 que incluye el núcleo moderador de grafito 102. Además, el sistema intercambiador de calor 2004 de la figura 9 puede incluir unos intercambiadores de calor adicionales que reciben el calor desde las unidades de intercambiador de calor 106 indicadas anteriormente. La planta de energía nuclear 2000 de la figura 9 incluye un sistema de uso final 2006 que recibe el calor del sistema intercambiador de calor 2004 y usa ese calor para hacer el trabajo. Por ejemplo, el sistema de uso final 2006 puede incluir un aparato intercambiador de calor que transporta el calor recibido desde el sistema intercambiador de calor 2004 a un aparato industrial que usa ese calor. Un ejemplo de un aparato industrial de este tipo incluye un horno de cemento. En otras configuraciones, el sistema de uso final 2006 puede incluir un generador de vapor que usa el calor recibido desde el sistema intercambiador de calor de 2004 para producir vapor que acciona un sistema de turbina, que puede usarse para alimentar un generador eléctrico. En configuraciones adicionales, el sistema de uso final 2006 puede incluir un generador de vapor que usa el calor recibido desde el sistema intercambiador de calor 2004 para producir vapor que se usa para la extracción de asfalto de arenas bituminosas (por ejemplo, un drenaje de gravedad asistido por vapor).

La figura 10 muestra un diagrama de flujo de un método de acuerdo con ciertos ejemplos de la presente divulgación. El método mostrado en la figura 10 es un método de operación de una planta de energía nuclear. La planta de energía nuclear comprende un MSR que genera calor (energía térmica) y un sistema intercambiador de calor. El MSR comprende una vasija, un núcleo moderador de grafito colocado en la vasija, y una sal fundida que circula al menos en la vasija. El MSR calienta la sal fundida y el sistema intercambiador de calor recibe el calor de la sal fundida.

El método de la figura 10 incluye, en la acción 1000, operar el MSR bajo unas condiciones de operación predeterminadas. En la acción 1002, el MSR se apaga después de un tiempo predeterminado de operación. La duración predeterminada de la operación se determina en relación con el mantenimiento de la integridad estructural del núcleo moderador de grafito colocado en la vasija del MSR y en relación con las condiciones de operación bajo las que opera el MSR. Para un núcleo moderador de grafito dado, cuando las condiciones de operación predeterminadas son tales que el núcleo moderador de grafito se somete a bajas densidades de potencia pico y a densidades de potencia promedio bajas, la duración predeterminada de la operación será más larga que cuando las condiciones de operación predeterminadas son tales que el núcleo moderador de grafito se somete a densidades de

potencia pico altas y a densidades de potencia promedio altas. Un MSR que tiene una densidad de potencia pico de $20 \text{ MW}_{\text{térmicos}}/\text{m}^3$ resultaría en una duración predeterminada de la operación que estaría alrededor de unos 11,5 años cuando funciona a plena capacidad, y a cerca de 15 años cuando funciona al 75 % de capacidad. Se prevé que el tiempo de operación (duración) de un IMSR práctico sea menos de 15 años y por lo tanto, tendrá una densidad de potencia pico más alta que $20 \text{ MW}_{\text{térmicos}}/\text{m}^3$.

En la acción 1004, se separa cualquier conexión operativa entre el MSR parado y cualquier parte del sistema intercambiador de calor localizado en el exterior de la vasija. Esto resulta en un MSR parado y separado. En la acción 1004, se separa cualquier tipo de conducto conectado al MSR y usado para transferir el calor desde el MSR a cualquier parte del sistema intercambiador de calor localizado en el exterior de la vasija.

En la acción 1006, el MSR parado y separado se aísla en una zona de aislamiento, que puede estar en la propia planta de energía nuclear, o en cualquier otro lugar adecuado, tal como, por ejemplo, unas minas abandonadas, etc. En la acción 1008, un nuevo MSR puede conectarse en cualquier parte del sistema intercambiador de calor localizada en el exterior de la vasija del nuevo MSR.

Una vez que se alcanza la vida útil de servicio (vida de diseño) del IMSR, el reactor se para usando, por ejemplo, una barra de control (barra de parada) o drenando la sal de combustible fundida 108 al almacenamiento externo. A continuación, las líneas de refrigerante pueden sellarse y/o engarzarse y desconectarse junto con cualquier otra línea tal como las líneas de gas de descarga. Después de desconectar estas líneas el IMSR gastado, es decir, la vasija de IMSR y todos los segmentos de conducto restantes unidos a la misma, pueden eliminarse, por ejemplo, usando una grúa puente. Tales operaciones pueden hacerse después de un período de enfriamiento in situ para disminuir los niveles de radiación. En un modo tal, probablemente la siguiente unidad (es decir, la IMSR de sustitución) puede instalarse adyacente al IMSR gastado de tal manera que, a largo plazo, mientras que una unidad funciona, la otra se está enfriando y a continuación se reemplaza antes de que la unidad de operación termine su ciclo. El uso de una grúa puente para la eliminación puede implicar algún mecanismo que pueda romper la celda caliente primaria. El motor de bomba, si se emplea, es un componente que puede reciclarse, por ejemplo, cortándolo a partir del árbol. El resto de la unidad puede transferirse fuera del sitio o a otra zona de la planta de energía nuclear, tal vez incluso dentro de la celda caliente primaria. Como una opción, la unidad también podría usarse para el almacenamiento a corto, medio o incluso a largo plazo de la propia sal de combustible primario, tal vez después de que se retiren algunos o todos los actínidos para su reciclaje o almacenamiento alternativo. Por lo tanto, la unidad puede actuar como un almacenamiento y/o una cápsula repositorio para el grafito interno, los intercambiadores de calor primarios e incluso la propia sal. En algún momento una decisión sobre el aislamiento a largo plazo tendría que realizarse pero potencialmente toda la unidad podría bajarse a un lugar subterráneo tal como un pozo profundo realizado in situ o transportarse a una caverna de sal para el aislamiento seguro a largo plazo.

Algunos comentarios sobre la viabilidad económica general son tal vez de uso, ya que va en contra de la lógica impuesta a menudo de tratar de obtener la mayor vida útil posible de todos los componentes. Las ventajas parecen ser mucho mayores que cualquier sanción económica de la disminución del tiempo de amortización del capital. En primer lugar, puede haber un pequeño cambio en la necesidad general del grafito a lo largo de la vida útil de la propia planta nuclear como se entenderá por los expertos en la materia. En segundo lugar, los componentes que tienen ahora una vida útil más corta, tales como la vasija del reactor y/o los intercambiadores de calor primarios normalmente representan solo una pequeña fracción de los costes de la planta nuclear. En estudios realizados por Oak Ridge National Laboratories, tales como en el ORNL 4145, el coste de la vasija del reactor y los intercambiadores de calor primarios eran solo de alrededor del 10 % del coste de la planta. La capacidad de reducir el coste de estos elementos por las grandes simplificaciones permitidas por tener una unidad reemplazable sellada parecería más que compensar por la disminución del tiempo de amortización. Cuando se tiene en cuenta la disminución de los costes de investigación y desarrollo, la ventaja de este diseño desvelado parece clara.

En la descripción anterior, por fines de explicación, se exponen numerosos detalles con el fin de proporcionar una comprensión completa de la invención. Sin embargo, será evidente para un experto en la materia que no se requieren estos detalles específicos.

Las configuraciones descritas anteriormente pretenden ser solamente ejemplos. Alteraciones, modificaciones y variaciones pueden efectuarse a las realizaciones específicas por los expertos en la materia sin alejarse del alcance, a definirse únicamente en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para operar una planta de energía nuclear, comprendiendo la planta de energía nuclear un reactor de sal fundida (MSR) para producir calor, un sistema intercambiador de calor, y un sistema de uso final, recibiendo el sistema intercambiador de calor el calor producido por el MSR y proporcionando el calor recibido al sistema de uso final, comprendiendo el método las etapas de:
- operar (1000) el MSR, comprendiendo el MSR una vasija, un núcleo moderador de grafito colocado en la vasija, y una sal fundida que circula al menos en la vasija, teniendo el sistema intercambiador de calor una parte interior localizada en el interior de la vasija y una parte exterior localizada en el exterior de la vasija, teniendo la parte interior una pluralidad de intercambiadores de calor, teniendo cada intercambiador de calor un conducto de entrada y un conducto de salida, extendiéndose cada conducto de entrada y cada conducto de salida desde cada intercambiador de calor respectivo, a través de la vasija, hacia la parte exterior del sistema intercambiador de calor y conectando cada intercambiador de calor respectivo a la parte exterior del sistema intercambiador de calor, sellándose la vasija para integrar de manera permanente el núcleo de grafito en la vasija;
- parar (1002) el MSR después de una duración predeterminada de la operación, para obtener un MSR parado; separar (1004) cualquier conexión operativa entre los conductos de entrada y los conductos de salida del MSR parado y la parte exterior del sistema intercambiador de calor, para obtener un MSR parado y separado; aislar (1006) el MSR parado y separado; y
- conectar operativamente un MSR de reemplazo (1008) a la parte exterior del sistema intercambiador de calor localizado en el exterior de la vasija del MSR de reemplazo.
2. El método de la reivindicación 1, en el que antes de parar el MSR, el MSR se opera para proporcionar una densidad de potencia de pico del núcleo de al menos $20 \text{ MW}_{\text{térmicos}}/\text{m}^3$.
3. El método de la reivindicación 1, en el que aislar el MSR parado y separado está precedido por una etapa de dejar el MSR parado y separado en su lugar para permitir que el MSR parado y separado se enfríe por desintegración radioactiva de los elementos radiactivos presentes en el MSR parado y separado.
4. El método de la reivindicación 1, en el que el núcleo moderador de grafito tiene una duración de operación de daño más allá de la cual el núcleo moderador de grafito se daña, siendo la duración predeterminada de la operación más corta que la duración de operación de daño al núcleo.
5. El método de la reivindicación 1, en el que:
- la sal de combustible es una sal de combustible fundida;
- la planta de energía nuclear comprende además detectores de radiactividad, y mecanismos de parada, el núcleo moderador de grafito define uno o más de un orificio pasante,
- el sistema intercambiador de calor comprende: una unidad de intercambiador de calor colocada en la vasija, teniendo la unidad de intercambiador de calor la pluralidad de intercambiadores de calor dispuestos en la misma, teniendo cada intercambiador de calor una sal refrigerante que circula en el mismo, estando la unidad de intercambiador de calor en comunicación fluidica con el uno o más de un orificio pasante del núcleo moderador de grafito, y
- el MSR comprende además:
- un sistema de bombeo para bombear la sal de combustible fundida a través de la unidad de intercambiador de calor y a través del uno o más de un orificio pasante del núcleo moderador de grafito, estando los intercambiadores de calor dispuestos en la unidad de intercambiador de calor para tener el flujo de combustible fundido en los mismos, teniendo cada intercambiador de calor asociado al mismo un detector de radiactividad respectivo, estando cada detector de radiactividad dispuesto para detectar la radiactividad presente en la sal refrigerante que circula en el intercambiador de calor respectivo, y
- teniendo cada intercambiador de calor asociado al mismo un mecanismo de parada respectivo dispuesto para parar la circulación de la sal refrigerante que circula en el intercambiador de calor respectivo,
- comprendiendo el método además, antes de parar el MSR, activar el mecanismo de parada de un intercambiador de calor específico cuando se detecta una radiactividad más allá de una cantidad umbral, por el detector de radiactividad del intercambiador de calor específico, en el intercambiador de calor específico.
6. El método de la reivindicación 5, en el que
- la planta de energía nuclear comprende además un sistema de monitorización de presión, estando cada intercambiador de calor conectado operativamente al sistema de monitorización de presión, monitorizando el sistema de monitorización de presión la presión de la sal refrigerante que circula en el intercambiador de calor respectivo,
- comprendiendo el método además, antes de parar el MSR, activar el mecanismo de parada del intercambiador de calor específico cuando el sistema de monitorización de presión detecta un cambio de presión en el intercambiador de calor específico.
7. El método de la reivindicación 1, en el que:
- la sal de combustible es una sal de combustible fundida;

la planta de energía nuclear comprende además detectores de radiactividad, y mecanismos de parada, el núcleo moderador de grafito define uno o más de un orificio pasante, y el sistema intercambiador de calor comprende además:

5 intercambiadores de calor dispuestos en la vasija, alrededor de un eje longitudinal de la vasija, teniendo cada intercambiador de calor una sal refrigerante que circula en el mismo, estando cada intercambiador de calor conectado operativamente al generador eléctrico, estando los intercambiadores de calor en comunicación fluidica con el uno o más de un orificio pasante del núcleo moderador de grafito, definiendo los intercambiadores de calor una abertura por encima del núcleo moderador de grafito,
 10 el MSR comprende además: un sistema de bombeo para bombear la sal de combustible fundida a través de la unidad de intercambiador de calor y a través del uno o más de un orificio pasante del núcleo moderador de grafito, estando los intercambiadores de calor dispuestos en la unidad de intercambiador de calor para tener el flujo de combustible fundido en los mismos;
 una estructura de deflector colocada en la vasija, entre los intercambiadores de calor y el núcleo moderador de grafito, guiando la estructura de deflector el fluido de sal fundida que fluye hacia abajo en la vasija y fuera de los
 15 intercambiadores de calor, a lo largo de una periferia exterior del núcleo moderador de grafito;
 teniendo cada intercambiador de calor asociado al mismo un detector de radiactividad respectivo, estando cada detector de radiactividad dispuesto para detectar la radiactividad presente en la sal refrigerante que circula en el intercambiador de calor respectivo,
 20 teniendo cada intercambiador de calor asociado al mismo un mecanismo de parada respectivo dispuesto para parar la circulación de la sal refrigerante que circula en el intercambiador de calor respectivo cuando se detecta radiactividad más allá de una cantidad umbral, por el detector de radiactividad respectivo, en el intercambiador de calor respectivo,
 comprendiendo además el método activar el mecanismo de parada de un intercambiador de calor específico, cuando se detecta una radiactividad más allá de una cantidad umbral, por el detector de radiactividad del
 25 intercambiador de calor específico, en el intercambiador de calor específico.

8. El método de la reivindicación 1, en el que:

la sal de combustible es una sal de combustible fundida;

la planta de energía nuclear comprende además detectores de radiactividad, y mecanismos de parada,

30 el núcleo moderador de grafito define uno o más de un orificio pasante, y

el sistema intercambiador de calor comprende además:

intercambiadores de calor dispuestos en la vasija, por encima del núcleo moderador de grafito y alrededor de un eje longitudinal de la vasija, teniendo cada intercambiador de calor una sal refrigerante que circula en el mismo, estando
 35 cada intercambiador de calor conectado operativamente al generador eléctrico, estando los intercambiadores de calor en comunicación fluidica con el uno o más de un orificio pasante del núcleo moderador de grafito, definiendo los intercambiadores de calor una abertura por encima del núcleo moderador de grafito,
 el MSR comprende además:

una estructura de deflector colocada en la vasija, entre los intercambiadores de calor y el núcleo moderador de grafito, guiando la estructura de deflector el fluido de sal fundida que fluye hacia abajo en la vasija y fuera de los
 40 intercambiadores de calor, a lo largo de una periferia exterior del núcleo moderador de grafito;

teniendo cada intercambiador de calor asociado al mismo un detector de radiactividad respectivo, estando cada detector de radiactividad dispuesto para detectar la radiactividad presente en la sal refrigerante que circula en el
 intercambiador de calor respectivo,

45 teniendo cada intercambiador de calor asociado al mismo un mecanismo de parada respectivo dispuesto para parar la circulación de la sal refrigerante que circula en el intercambiador de calor respectivo cuando se detecta una radiactividad más allá de una cantidad umbral, por el detector de radiactividad respectivo, en el intercambiador de calor respectivo,

circulando la sal de combustible fundida en los intercambiadores de calor y el núcleo moderador de grafito a través de la circulación natural provocada por el calentamiento de la sal de combustible fundida calentada a medida que
 50 atraviesa el moderador de grafito y por el enfriamiento a medida que la sal de combustible fundida atraviesa los intercambiadores de calor,

comprendiendo además el método activar el mecanismo de parada de un intercambiador de calor específico cuando se detecta radiactividad más allá de una cantidad umbral, por el detector de radiactividad del intercambiador de calor
 específico, en el intercambiador de calor específico.

55 9. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 1-9, en el que el MSR comprende además un reflector neutrónico colocado en la vasija, entre el núcleo moderador de grafito y la unidad de intercambiador de calor.

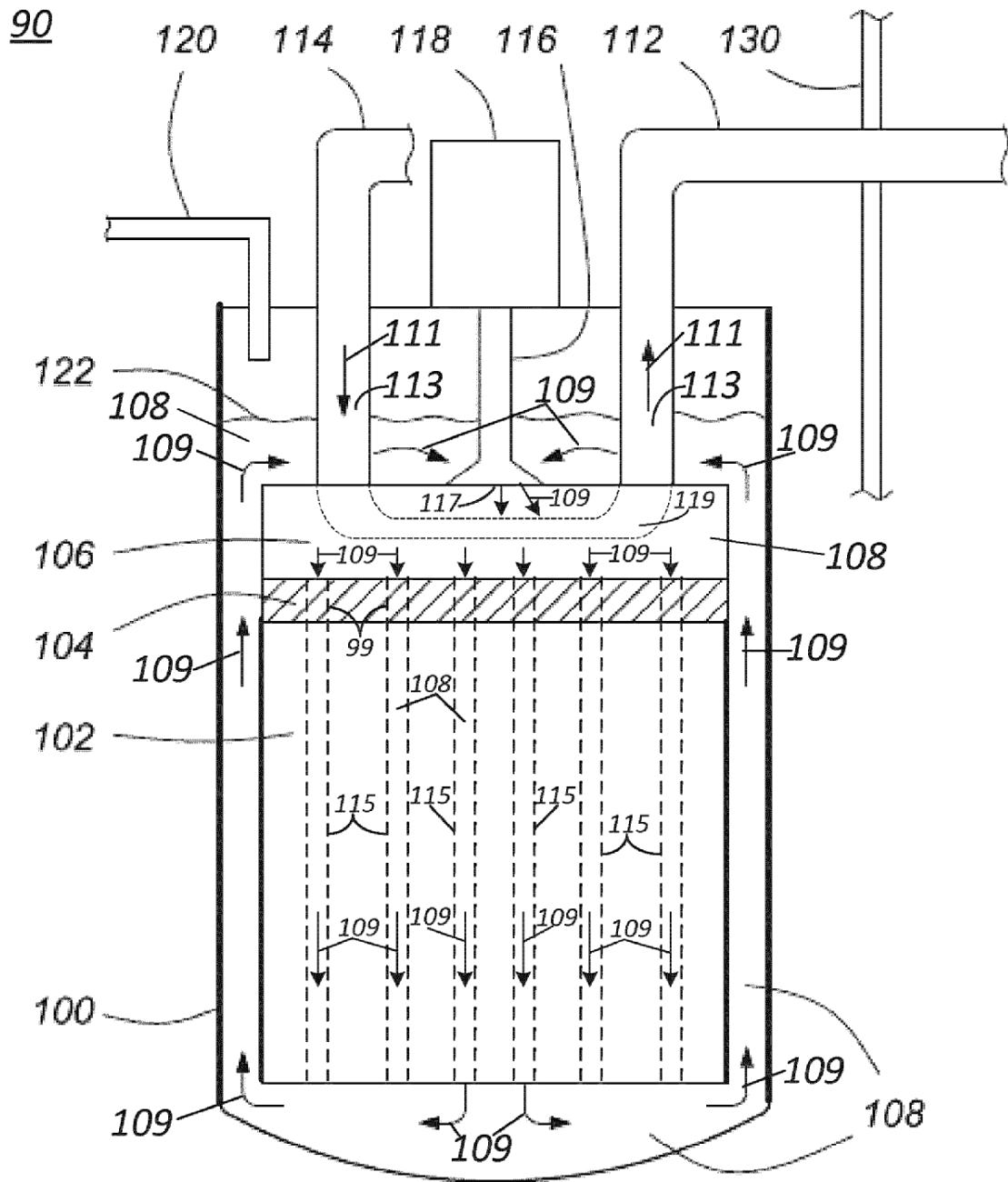


Figura 1

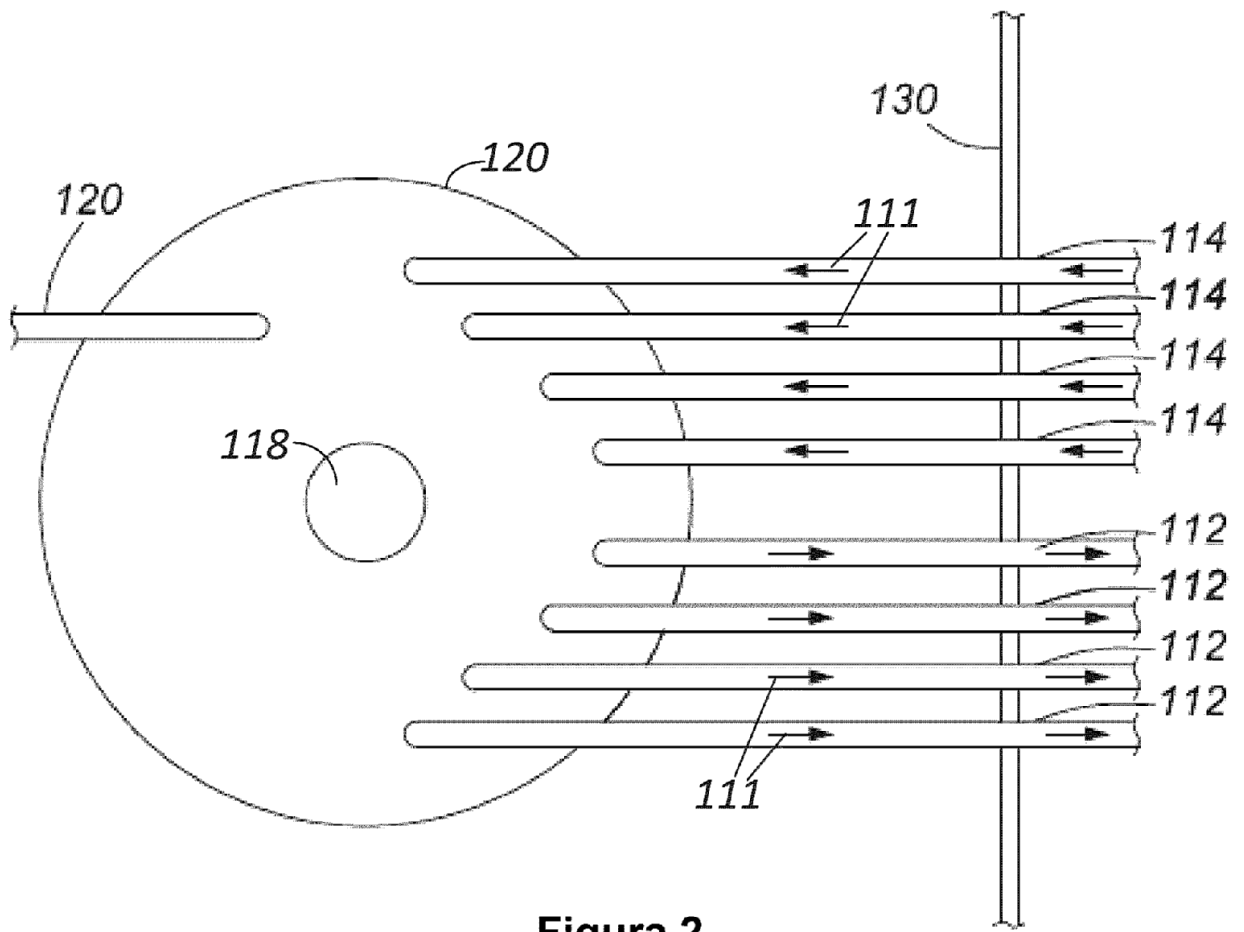


Figura 2

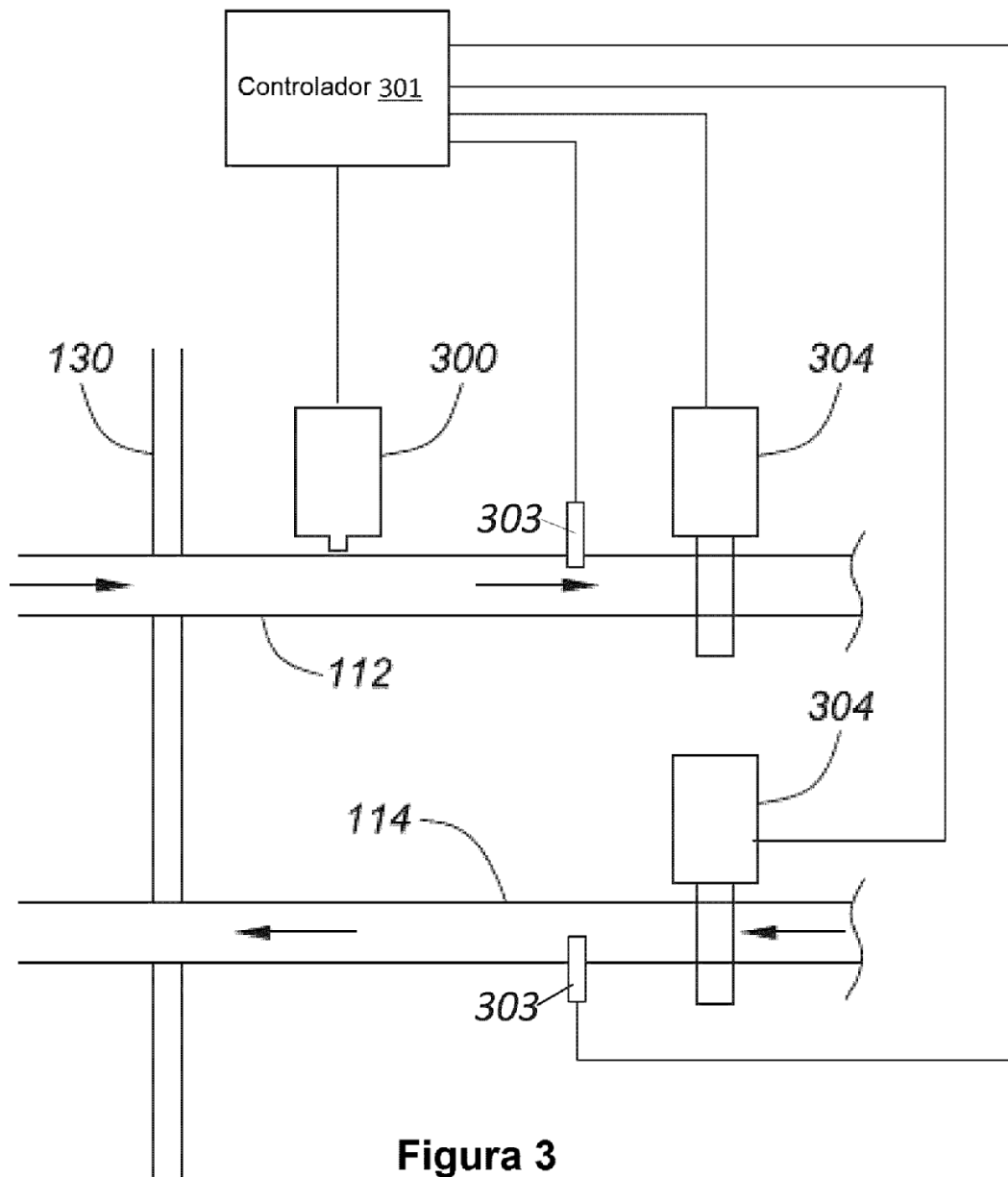


Figura 3

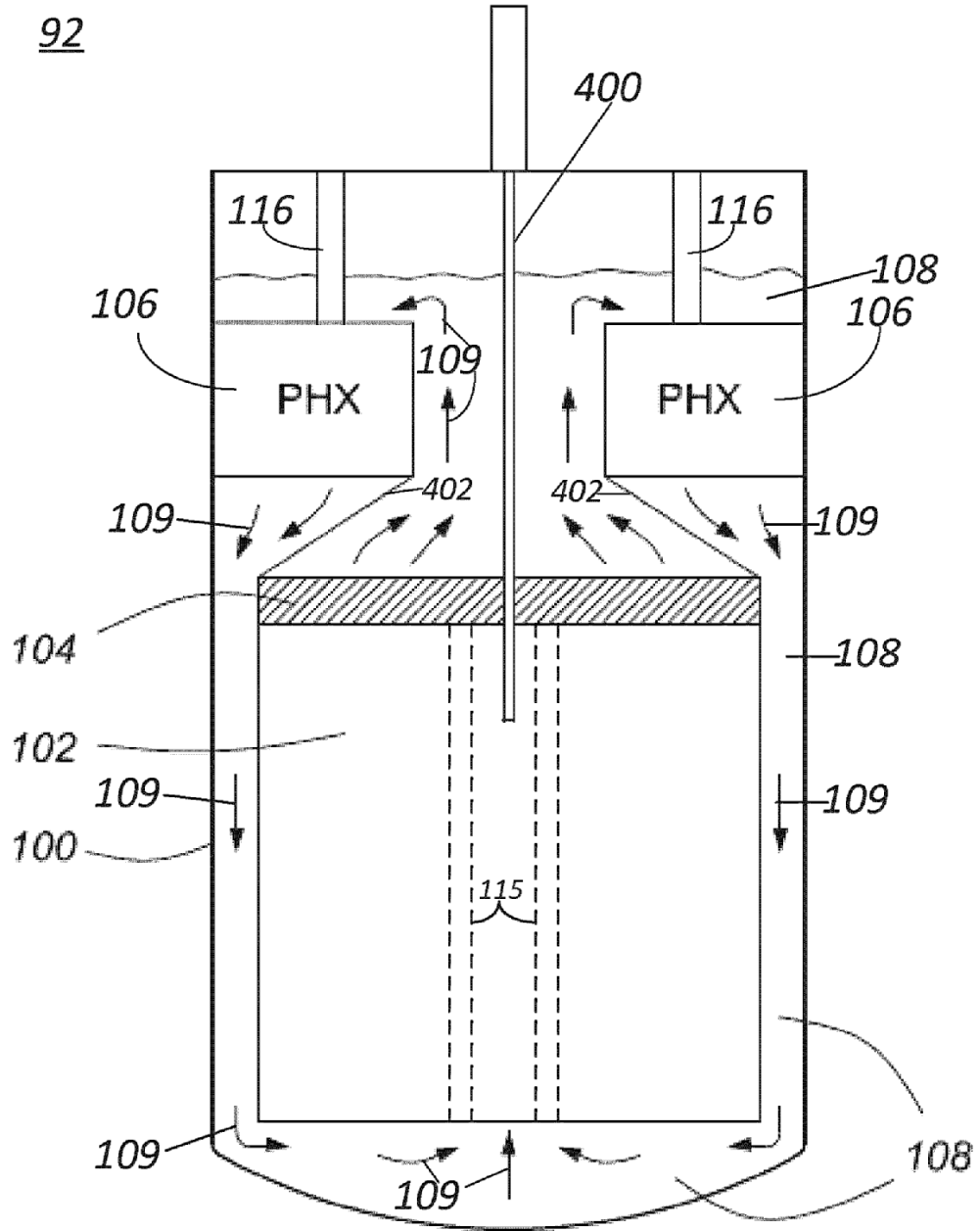


Figura 4

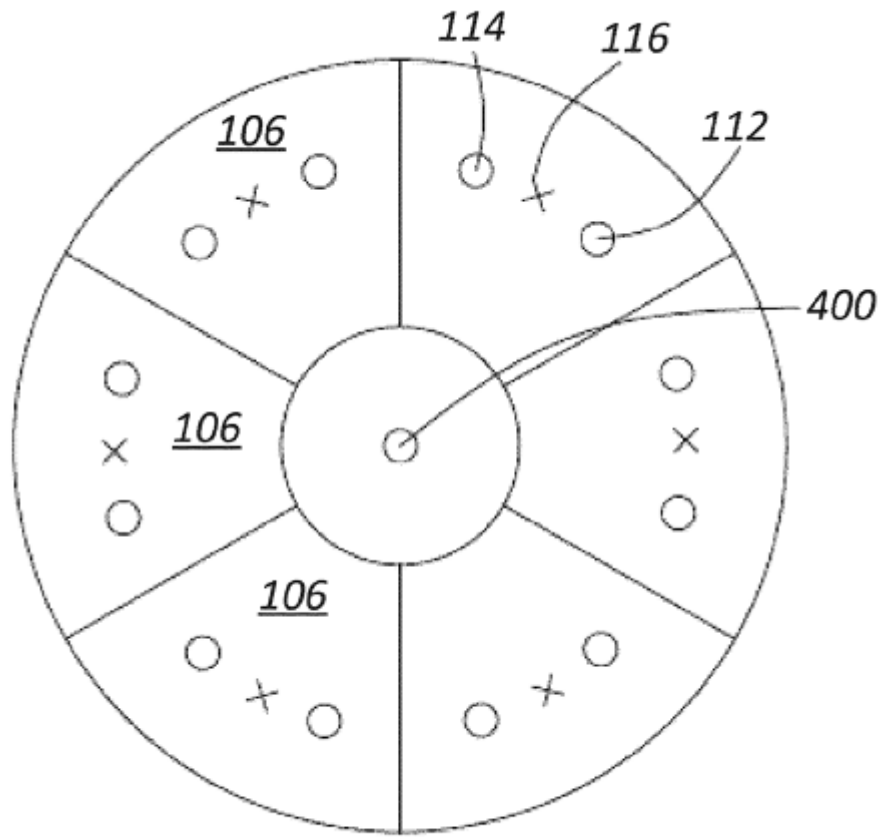


Figura 5

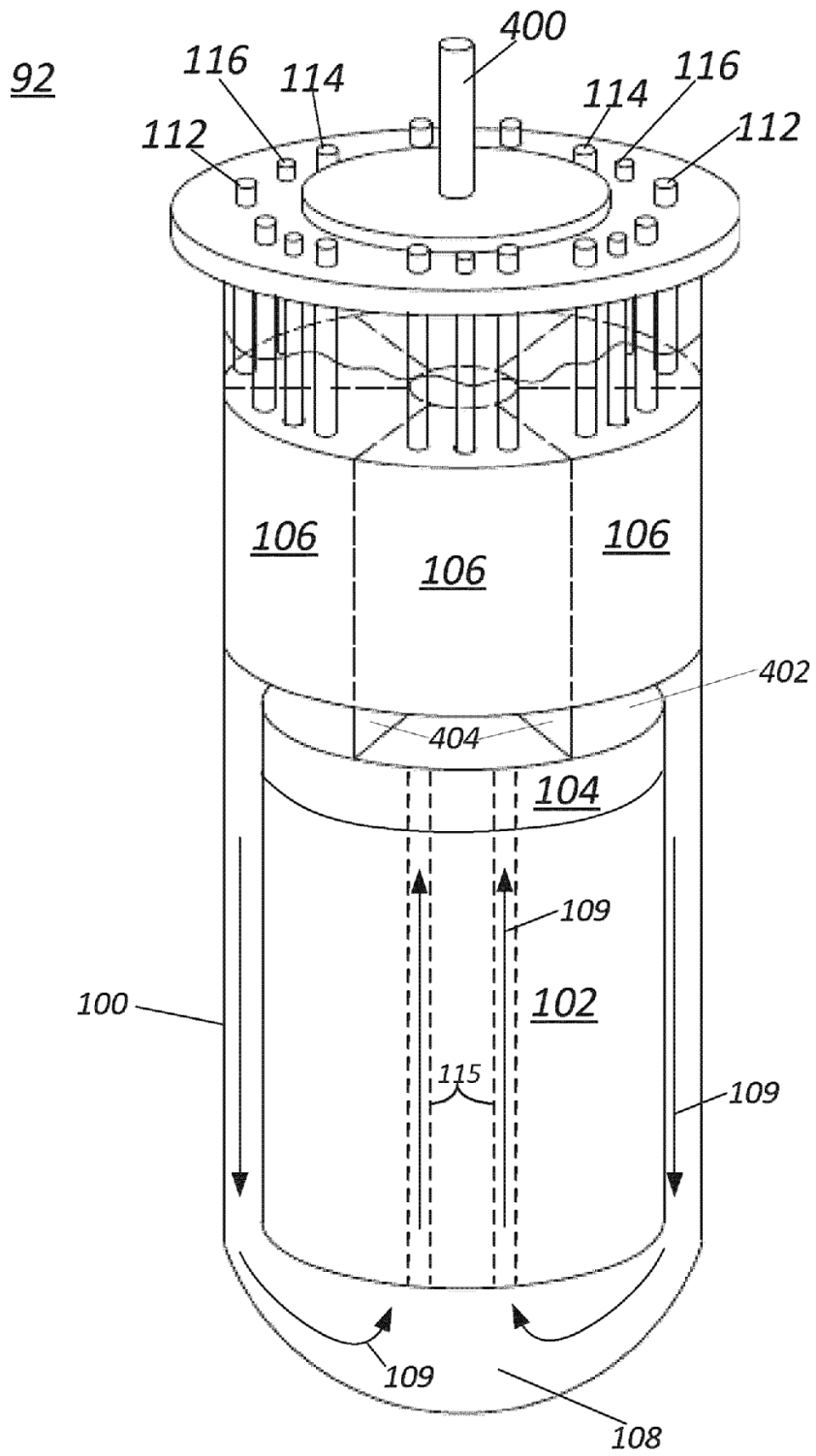


Figura 6

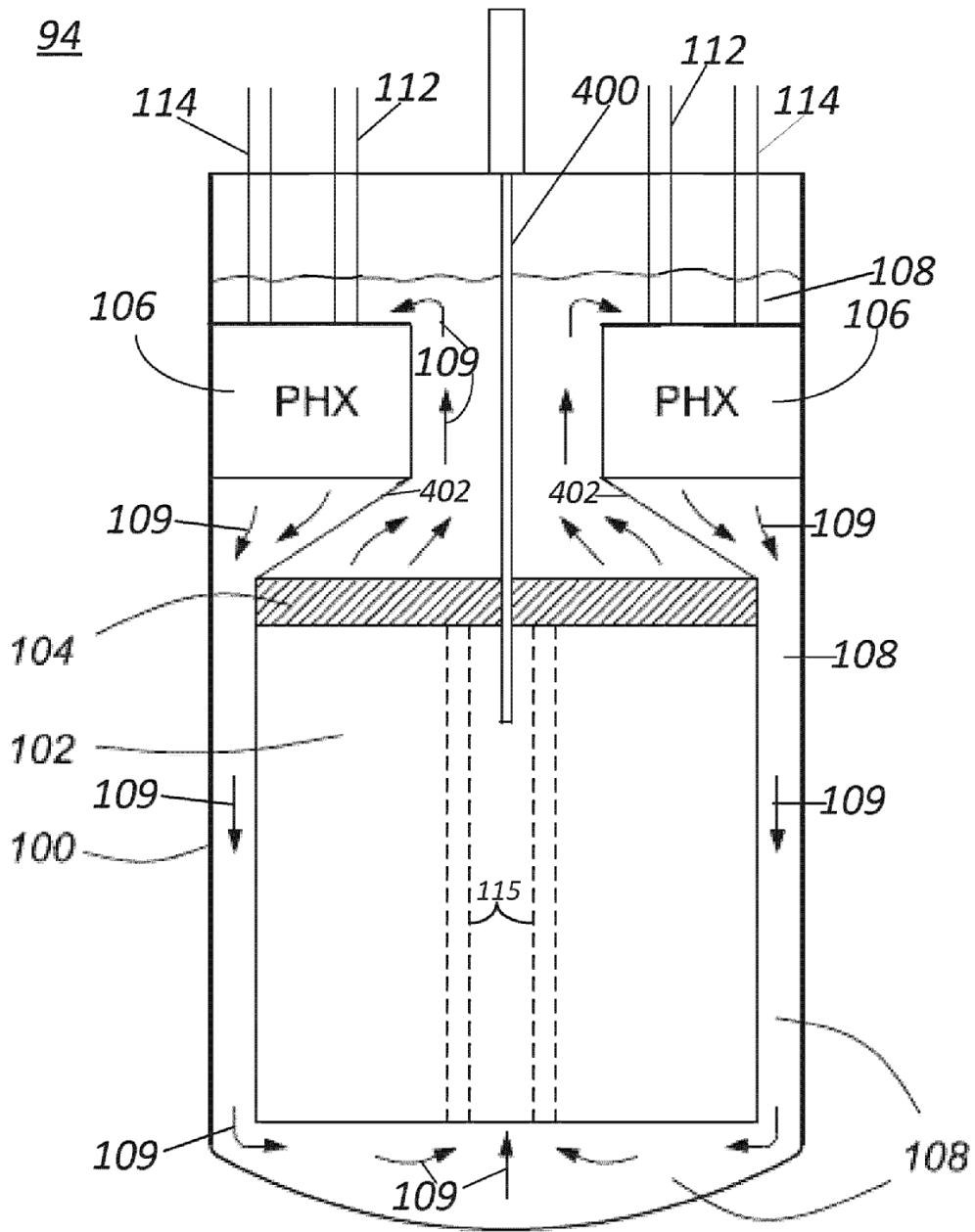


Figura 7

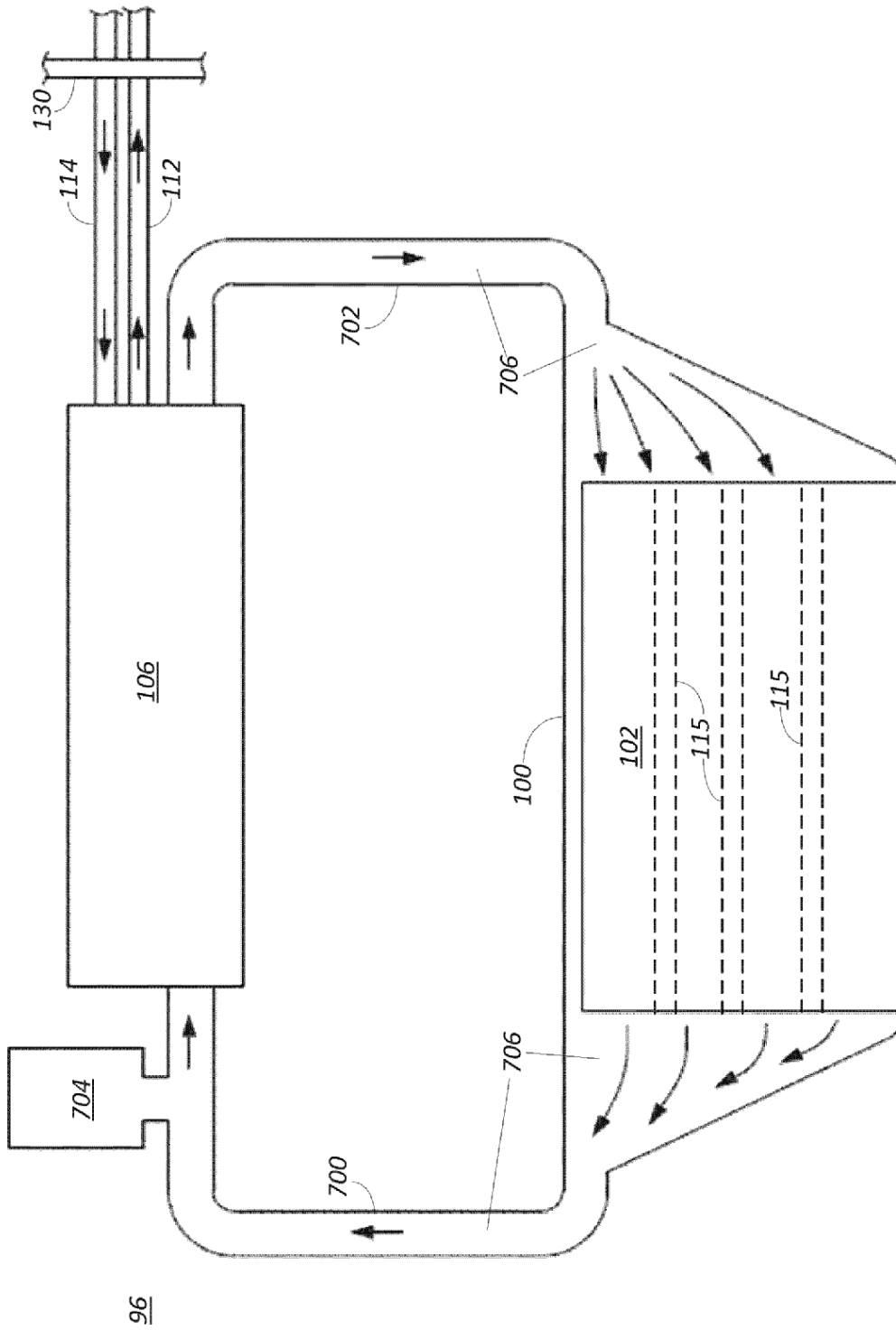


Figure 8

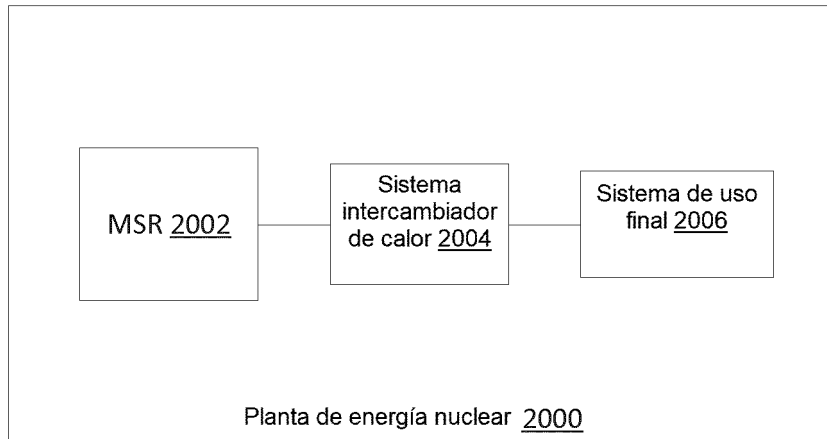


Figura 9

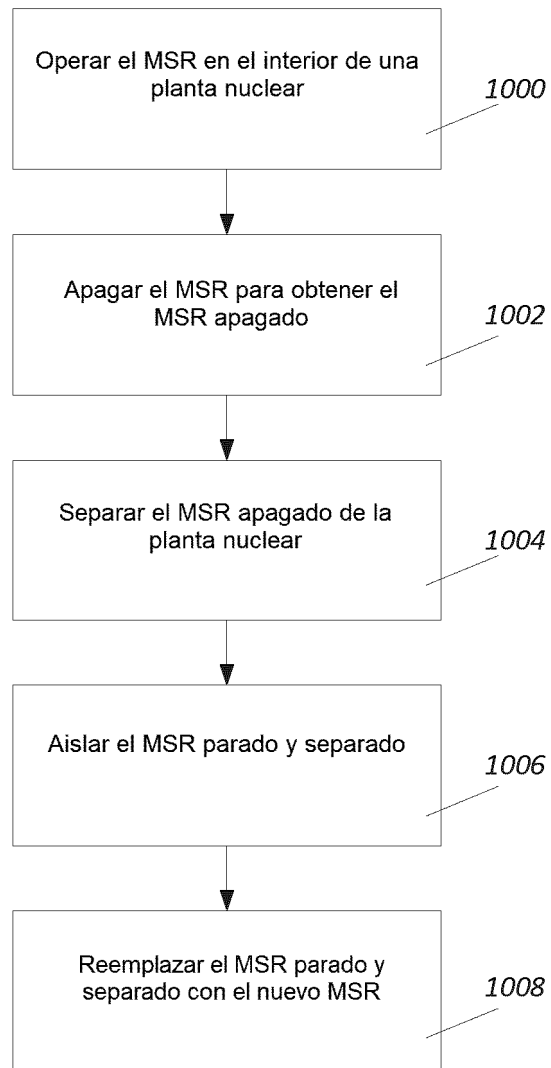


Figura 10