

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 682 197**

51 Int. Cl.:

G21C 15/12 (2006.01)

G21C 15/18 (2006.01)

G21D 1/02 (2006.01)

G21C 19/07 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.03.2014 PCT/US2014/022254**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.10.2014 WO14159155**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.03.2014 E 14774517 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.06.2018 EP 2973594**

54 Título: **Aparato para refrigerar pasivamente un depósito de refrigerante de una central nuclear**

30 Prioridad:

14.03.2013 US 201361781274 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.09.2018

73 Titular/es:

**WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC
(100.0%)**

**1000 Westinghouse Drive, Suite 141
Cranberry Township, PA 16066, US**

72 Inventor/es:

**CONWAY, LAWRENCE, E. y
SEDLACEK, GARY, L.**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 682 197 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

Aparato para refrigerar pasivamente un depósito de refrigerante de una central nuclear

Referencia cruzada con solicitudes relacionadas

La presente solicitud reivindica el beneficio de la solicitud de patente U.S. con nº de serie 61/781.274, presentada el 14 de marzo de 2013.

Antecedentes**1. Campo**

La presente invención versa, en general, acerca de un sistema de refrigeración pasiva para depósitos de refrigerante de una central nuclear y, más específicamente, acerca de tal sistema para refrigerar el tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento y la piscina del combustible gastado.

2. Técnica relacionada

El lado primario de los sistemas de generación de energía eléctrica en un reactor nuclear crea vapor para la generación de electricidad comercializable. Para tipos de reactor tales como los reactores de agua a presión o los reactores refrigerados por metal líquido, el lado primario comprende un circuito cerrado que está aislado y en una relación de intercambio de calor con un circuito secundario para la producción de vapor útil. Para tipos de reactor tales como los reactores de agua a presión o los reactores refrigerados por gas, el gas utilizado para generar la electricidad comercializable es calentado directamente en el núcleo del reactor. Se describirá una aplicación de reactor de agua a presión como un uso ejemplar de los conceptos reivindicados de aquí en adelante; aunque se debería apreciar que otros tipos de reactores también pueden beneficiarse igualmente de los conceptos divulgados en la presente memoria.

El lado primario de un sistema de reactor de agua a presión comprende una vasija del reactor que encierra una estructura interna de núcleo que soporta una pluralidad de conjuntos de combustible que contienen material físil, el circuito primario en los generadores de vapor de intercambio de calor, el volumen interno de un presionador, bombas y tuberías para hacer circular el agua a presión; conectando las tuberías cada uno de los generadores de vapor y de las bombas con la vasija del reactor de manera independiente. Cada una de las partes del lado primario que comprende un generador de vapor, una bomba y un sistema de tuberías, que están conectados con la vasija, forma un bucle del lado primario. Con un fin ilustrativo, la Figura 1 muestra un sistema primario simplificado de reactor nuclear de agua a presión, que incluye una vasija generalmente cilíndrica 10 a presión del reactor que tiene una cabeza 12 de cierre que encierra un núcleo 14. Se bombea un refrigerante líquido del reactor, tal como agua, al interior de la vasija 10 mediante bombas 16 a través del núcleo 14 en el que se absorbe energía térmica y es descargada mediante un intercambiador 18 de calor, denominado, normalmente, generador de vapor, en el que se transfiere calor a un circuito (no mostrado) de utilización, tal como un turbogenerador accionado por vapor. Entonces, se devuelve el refrigerante del reactor a las bombas 16 completando el bucle primario. Normalmente, una pluralidad de los bucles descritos anteriormente están conectados con una única vasija 10 del reactor mediante tuberías 20 de refrigerante del reactor.

Los reactores nucleares de agua a presión son normalmente recargados de combustible en un ciclo de 18 meses. Durante el procedimiento de recarga de combustible, se retira una porción de los conjuntos de combustible irradiado en el núcleo y es recargada con nuevos conjuntos de combustible que son colocados nuevamente en torno al núcleo. Los conjuntos retirados de combustible gastado son transferidos, normalmente, bajo agua fuera del recinto de confinamiento 22 del reactor a un edificio aparte que aloja una piscina del combustible gastado, mostrada figurativamente en la Figura 1 y designada mediante el número de referencia 24, en la que se almacenan estos conjuntos de combustible radiactivo. El agua en la piscina del combustible gastado es suficientemente profunda para blindar la radiación hasta un nivel aceptable y evitar que las varillas de combustible en los conjuntos de combustible alcancen temperaturas que podrían romper la vaina de las varillas de combustible que aloja herméticamente el material combustible radiactivo y los productos de fisión. La refrigeración continúa al menos hasta que se reduce el calor de decaimiento en los conjuntos de combustible hasta un nivel en el que la temperatura de los conjuntos es aceptable para un almacenamiento en seco.

Los sucesos en la central nuclear Fukushima Daiichi de Japón reafirmaron la preocupación por las posibles consecuencias de una pérdida de suministro eléctrico durante un periodo prolongado a los sistemas que refrigeran las piscinas del combustible gastado. Como resultado de este tsunami, hubo una pérdida de suministro eléctrico desde fuentes externas a la central y desde fuentes del interior de la central, lo que tuvo como resultado un periodo de pérdida completa de suministro de corriente alterna. La pérdida de energía detuvo los sistemas de refrigeración de la piscina del combustible gastado. El agua en algunas de las piscinas del combustible gastado se disipó mediante vaporización y evaporación debido a un aumento en la temperatura de las piscinas, calentada por los conjuntos de del combustible gastado muy radiactivo sumergidos en la misma. Sin energía durante un periodo prolongado para bombear agua de sustitución al interior de las piscinas, los conjuntos de combustible podrían

quedar potencialmente al descubierto, lo que podría, en teoría, aumentar la temperatura de las varillas de combustible en esos conjuntos, dando lugar, posiblemente, a una rotura en la vaina de esas varillas de combustible y al posible escape de radiactividad al entorno.

5 El documento US 2012/0 051 484 A1 describe una configuración de almacenamiento y de refrigeración de elementos combustibles que incluye una piscina de almacenamiento de elementos combustibles y un sistema de refrigeración que tiene al menos un primer intercambiador de calor dispuesto en la piscina de almacenamiento de elementos combustibles y al menos un segundo intercambiador de calor dispuesto en un disipador de calor y ubicado a una distancia del mismo, por encima de un punto más elevado del primer intercambiador de calor. Los dos intercambiadores de calor están conectados, utilizando un sistema de tuberías, para formar un circuito cerrado, que está lleno, al menos parcialmente, de un refrigerante fluido. Si la temperatura del primer intercambiador de calor aumenta con respecto al segundo intercambiador de calor, se garantiza una circulación natural del refrigerante y, por lo tanto el transporte de calor desde la piscina de almacenamiento de elementos combustibles hasta el disipador de calor, sin un aparato de bombeo. El documento WO 2003/072 384 A1 describe un sistema para la recuperación de energía eléctrica procedente de energía solar/de calor de desecho de baja calidad, que comprende un bucle de refrigerante cargado de ciclo cerrado. Se bombea fluido refrigerante a presión a temperatura ambiente a través de un intercambiador de calor conectado con una fuente solar/de calor de desecho para extraer energía térmica durante la conversión en un gas de alta presión. El documento WO 2012/145 406 A2 describe un sistema autoalimentado autónomo para la refrigeración de materiales radiactivos que comprende: una piscina de líquido; un circuito de fluido de bucle cerrado que comprende un fluido de trabajo que tiene una temperatura de ebullición que es inferior a una temperatura de ebullición del líquido de la piscina, comprendiendo el circuito de fluido de bucle cerrado, en acoplamiento fluido operable, un intercambiador de calor evaporativo sumergido, al menos parcialmente, en el líquido de la piscina, un turbogenerador y un condensador; una o más unidades de caudal forzado acopladas operativamente con el circuito de fluido de bucle cerrado para inducir el flujo del fluido de trabajo a través del circuito de fluido de bucle cerrado; y convirtiendo el circuito de fluido de bucle cerrado la energía térmica extraída del líquido de la piscina en energía eléctrica según el ciclo de Rankine, alimentando la energía eléctrica las una o más unidades de caudal forzado. El documento US 2011/0 158 371 A1 describe una disposición de suministro de vapor de reactor nuclear para un sistema de reactor pequeño que emplea un sistema de refrigeración pasiva y de despresurización que es un medio primario de despresurización para igualar la presión del sistema primario con la presión del sistema secundario en el momento de un accidente de rotura de tubo del generador de vapor, y una vasija de confinamiento del reactor que contiene el sistema primario y refrigera el sistema primario mediante refrigeración por aire.

Las centrales nucleares refrigeradas pasivamente diseñadas más recientemente, tales como el diseño de central nuclear AP100® ofrecido por Westinghouse Electric Company LLC, Cranberry Township, Pensilvania, EE. UU., que utiliza sistemas de seguridad pasiva, han sido evaluadas para poder continuar proporcionando refrigeración durante al menos tres días después de un suceso extremo como el de Fukushima.

35 Un objeto de la presente invención es modificar la forma en la que se utiliza el agua para refrigerar el combustible gastado, de forma que se pueda refrigerar el combustible gastado durante al menos diez días después de un suceso de tipo Fukushima.

Un objeto adicional de la presente invención es proporcionar tal refrigeración pasivamente para permitir que una central nuclear comercial de 1.100 megavatios proporcione una refrigeración del núcleo y del combustible gastado utilizando medios pasivos durante diez días o más.

Sumario

Se consiguen estos y otros objetos mediante una central nuclear según se reivindica en la reivindicación 1. La central tiene un sistema de suministro de vapor de reactor nuclear alojado herméticamente en un recinto de confinamiento. Un depósito, que comprende agua, está alojado en el recinto de confinamiento, o en proximidad del mismo. El combustible nuclear gastado está sumergido en el depósito y es refrigerado por el agua y hay colocado un termosifón para que se extienda desde el interior del depósito hasta el exterior del recinto de confinamiento para transferir calor pasivamente del depósito al aire en el exterior del recinto de confinamiento. El termosifón comprende intercambiadores de calor primero y segundo, teniendo el segundo intercambiador de calor una mayor elevación que el primer intercambiador de calor. El primer intercambiador de calor está sumergido, al menos parcialmente, en el depósito, lo que pone al agua en el depósito en el primer lado del primer intercambiador de calor en comunicación térmica con un fluido de trabajo en el segundo lado del intercambiador de calor. El segundo lado del primer intercambiador de calor se encuentra en comunicación de fluido con el primer lado del segundo intercambiador de calor mediante un bucle cerrado en el que circula el fluido de trabajo, lo que pone al fluido de trabajo en el primer lado del segundo intercambiador de calor en comunicación térmica con el aire ambiente en el exterior del recinto de confinamiento en el segundo lado del segundo intercambiador de calor. En una realización preferente, el fluido de trabajo es un refrigerante y el bucle cerrado en el exterior del recinto de confinamiento comprende un tubo con aletas. Según la invención, el recinto de confinamiento comprende una carcasa de acero que se extiende sustancialmente en torno al recinto de confinamiento y que tiene paredes sustancialmente verticales que se extienden desde una porción inferior del recinto de confinamiento hasta una porción superior del recinto de confinamiento. Un deflector de aire se extiende sustancialmente en torno a las paredes verticales del recinto de

confinamiento, y está separado de las mismas, con una entrada de aire a una elevación menor del deflector de aire y una salida de aire a una elevación superior del deflector de aire, estando soportado el segundo intercambiador de calor en un anillo entre la pared vertical del recinto de confinamiento y el deflector de aire. Preferentemente, el segundo intercambiador de calor está soportado en una porción inferior del anillo.

- 5 En otra realización, el primer intercambiador de calor incluye una pluralidad de primeros intercambiadores de calor, el segundo intercambiador de calor incluye una pluralidad de segundos intercambiadores de calor y el bucle cerrado incluye una pluralidad de bucles cerrados. La pluralidad de bucles cerrados está configurada para operar en paralelo con cada uno de los bucles cerrados que tienen al menos uno de los primeros intercambiadores de calor y al menos uno de los segundos intercambiadores de calor. Preferentemente, cada uno de los segundos intercambiadores de calor está separado en torno al exterior del recinto de confinamiento. De forma deseable, el bucle cerrado incluye una válvula para cortar la circulación del fluido de trabajo.

- 10 En una realización, el depósito es un tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento. En la presente solicitud, el primer intercambiador de calor se encuentra en el interior del recinto de confinamiento y el segundo intercambiador de calor se encuentra en el exterior del recinto de confinamiento. En otra realización, el depósito es una piscina del combustible gastado en el exterior del recinto de confinamiento, y en proximidad de la misma.

Breve descripción de los dibujos

Se puede obtener una mayor comprensión de la invención a partir de la siguiente descripción de las realizaciones preferentes cuando sea leída junto con los dibujos adjuntos, en los que:

- 20 La Figura 1 es un esquema simplificado de un sistema convencional de reactor nuclear;
la Figura 2 es un esquema simplificado de un sistema AP1000® de suministro de vapor de reactor nuclear mostrado en su recinto de confinamiento refrigerado pasivamente;
la Figura 3 es una vista isométrica de la disposición, en el interior del recinto de confinamiento, de los componentes del sistema AP1000® de suministro de vapor de reactor nuclear mostrado en la Figura 2;
25 la Figura 4 es un diagrama esquemático que muestra las configuraciones de los intercambiadores de calor primero y segundo utilizadas en el termosifón empleado en la presente invención;
la Figura 5 es un diagrama esquemático que muestra la carcasa del recinto de confinamiento con el primer intercambiador de calor entre fluidos mostrado en el tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento y el segundo intercambiador de calor entre gas y aire
30 mostrado por encima de la elevación del primer intercambiador de calor, en el anillo entre la carcasa del recinto de confinamiento y un deflector de aire; y
la Figura 5A es una ampliación de los tubos con aletas de intercambio de calor empleados en el intercambiador 2 de calor entre gas y aire en el anillo entre la carcasa del recinto de confinamiento y el deflector de aire.

Descripción de la realización preferente

- 35 Según se ha mencionado anteriormente, en el improbable caso de un incidente de tipo Fukushima, la central AP1000® está diseñada para utilizar sistemas de seguridad pasiva, tales como el recinto de confinamiento refrigerado pasivamente 22 mostrado en la Figura 2, para continuar proporcionando una refrigeración durante al menos tres días. Uno de los sistemas de seguridad para lograr ese objetivo es el sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento ilustrado en la Figura 2. El sistema 22 de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento rodea el sistema AP1000® de suministro de vapor de reactor nuclear, incluyendo la vasija 10 del reactor, el generador 18 de vapor, el presionador 26 y la bomba principal 16 de circulación del refrigerante; todos conectados mediante la red 20 de tuberías. El sistema 22 de confinamiento comprende, en parte, un recinto de vasija 28 de confinamiento con cúpula de acero rodeado por un edificio 30 de blindaje de hormigón que proporciona una protección estructural para la vasija 28 de confinamiento con cúpula de acero.
- 45 Los componentes principales del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento son un depósito 32 de almacenamiento de agua de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento, un deflector 34 de aire, una entrada 36 de aire, una salida 38 de aire y un sistema 40 de distribución de agua. El tanque 32 de almacenamiento de agua de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento está incorporado en la estructura 30 de edificio de blindaje, por encima de la vasija 28 de confinamiento con cúpula de acero. Un deflector 34 de aire ubicado entre la vasija 28 de confinamiento con cúpula de acero y el edificio 30 de blindaje de hormigón define el recorrido del flujo de refrigeración por aire que entra a través de una abertura 36 en el edificio 30 de blindaje a una elevación aproximadamente en la parte superior del recinto 28 de confinamiento con cúpula de acero. Después de entrar en el edificio 30 de blindaje, el recorrido del aire desciende por un lado del deflector 34 de aire e invierte su dirección en torno al deflector de aire a una elevación adyacente a la porción inferior de la vasija de confinamiento con cúpula de
50 acero y luego fluye ascendentemente entre el deflector y la vasija 28 de confinamiento con cúpula de acero y sale por la abertura 38 de escape en la parte superior del edificio 30 de blindaje. La abertura 38 de escape está rodeada por el tanque 32 de almacenamiento de agua de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento.

En el caso improbable de un accidente, el sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento proporciona agua que se drena por gravedad del tanque 32 de almacenamiento de agua de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento y forma una película sobre la vasija 28 de confinamiento con cúpula de acero. La película de agua se evapora, eliminando, de esta manera, calor del edificio 28 de confinamiento con cúpula de acero.

5 El sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento es capaz de eliminar suficiente energía térmica, incluyendo el subsiguiente calor de decaimiento, de la atmósfera del recinto de confinamiento tras un suceso base de diseño que tiene como resultado la presurización del recinto de confinamiento, de forma que la presión del recinto de confinamiento permanezca por debajo del valor de diseño sin que se requiera una acción por parte del operario durante al menos 72 horas.

10 El recorrido del flujo de aire que se forma entre el edificio 30 de blindaje, que rodea la vasija 28 de confinamiento con cúpula de acero, y el deflector 34 de aire tiene como resultado la circulación natural de aire ascendente a lo largo de la superficie exterior de acero de las vasijas de confinamiento. Esta circulación natural de aire es causada por empujes hidrostáticos cuando se calienta el aire que fluye mediante la superficie de acero del recinto de confinamiento y cuando el aire es calentado por agua —y la evapora—, que se aplica a la superficie del recinto de confinamiento. El aire que fluye también mejora la evaporación que se produce desde la superficie del agua. En el caso de un accidente, la transferencia de calor convectivo al aire por la superficie de acero del recinto de confinamiento solo da cuenta de una pequeña porción de la transferencia térmica total requerida, lográndose tal transferencia térmica total, principalmente, por la evaporación de agua de las áreas mojadas de la superficie de acero del recinto de confinamiento, que enfría el agua en la superficie, que entonces refrigera el acero del recinto de confinamiento, que entonces refrigera la atmósfera interior del recinto de confinamiento y condensa el vapor en el interior del recinto de confinamiento.

Para mantener una transferencia suficiente de calor de la vasija 22 de confinamiento con cúpula de acero para limitar y reducir la presión del recinto de confinamiento, después de los tres días iniciales después de un suceso base de diseño postulado, el sistema AP1000® de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento requiere que se siga aplicando el agua a la superficie exterior de acero del recinto de confinamiento. Inicialmente se proporciona el agua mediante el flujo pasivo por gravedad mencionado anteriormente. Tras tres días, se proporciona agua mediante medios activos inicialmente desde un almacenamiento en la propia central y luego desde otras fuentes internas o externas a la central. Se puede alcanzar una comprensión más detallada de este procedimiento de refrigeración del recinto de confinamiento en la solicitud de patente U.S. con nº de serie 13/444.932, presentada el 12 de abril de 2012 (expediente de agente NPP 2009-014).

Además, el AP1000® tiene sistemas pasivos para garantizar que los conjuntos de combustible en el núcleo permanecen cubiertos con refrigerante. En el caso improbable de que un bucle primario de refrigerante tenga una fuga, estos sistemas son activados automáticamente. Una pérdida de refrigerante puede implicar únicamente una pequeña cantidad, por lo que se puede inyectar refrigerante adicional desde un suministro relativamente pequeño de agua de relleno a alta presión, sin despresurizar el circuito de refrigerante del reactor. Si se produce una pérdida importante de refrigerante, es necesario añadir refrigerante desde un suministro a baja presión que contiene una gran cantidad de agua. Dado que es difícil utilizar bombas para superar la presión sustancial del circuito de refrigerante del reactor, por ejemplo, 15 MPa, el circuito de refrigerante del reactor es despresurizado automáticamente en el caso de una pérdida importante de refrigerante, de forma que se pueda añadir agua refrigerante desde un tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento, a la presión ambiente dentro de la cúpula 28 del recinto de confinamiento del reactor nuclear. Por lo tanto, según se muestra en la Figura 3, hay dos fuentes de refrigerante de relleno para una pérdida de refrigerante en el sistema AP1000® del reactor nuclear. Una entrada del tanque 42 de aporte al núcleo a alta presión está acoplada mediante válvulas con la entrada de refrigerante del reactor o rama fría 44. El depósito 42 de aporte al núcleo a alta presión también está acoplado mediante válvulas motorizadas y válvulas de retención con una entrada 46 de inyección de la vasija del reactor. El tanque 42 de aporte al núcleo a alta presión es operable para suministrar refrigerante adicional al circuito 20 de refrigeración del reactor, a la presión operativa del reactor, para compensar pérdidas relativamente pequeñas. Sin embargo, el tanque 42 de aporte al núcleo a alta presión solo contiene un suministro limitado de refrigerante, aunque, como puede apreciarse en la Figura 3, hay dos tanques de aporte al núcleo en este sistema.

Hay disponible una cantidad mucho mayor de refrigerante procedente del tanque 48 de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento, a presión atmosférica, debido a un respiradero, que se abre desde el tanque 48 al interior del edificio 28 de confinamiento. La solicitud de patente U.S. con nº de serie 12/972.568, presentada el 20 de diciembre de 2010 (solicitud U.S. nº 2012/0155597, publicada el 1 de junio de 2012), y cedida al cesionario de la presente solicitud, describe con más detalle cómo se despresuriza el sistema del reactor de forma que se pueda drenar el agua refrigerante del tanque 48 de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior de la vasija 10 del reactor.

La presente invención es una mejora con respecto a los otros sistemas de seguridad de la central AP1000® al aumentar la capacidad de proporcionar una refrigeración de la piscina del combustible gastado minimizando el calor de decaimiento que se emana del combustible gastado en la piscina del combustible gastado almacenando el

combustible gastado descargado más recientemente del reactor, en el recinto de confinamiento durante un ciclo de combustible antes de que el combustible gastado sea transferido a la piscina del combustible gastado, según se describe en la solicitud en tramitación como la presente con nº de serie 14/195.890 (expediente de agente NPP 2012-002). La presente invención complementa este procedimiento al permitir que la piscina del combustible gastado y el tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento sean refrigerados por aire, de forma que el calor de decaimiento tanto del combustible gastado como del núcleo del reactor pueda ser transferido al entorno durante un periodo prolongado de tiempo. Pueden conseguirse cuatro semanas o un periodo más prolongado de tiempo antes de que se requiera agua de relleno, sin depender de energía eléctrica o asistencia externa. La modificación proporcionada en la presente memoria: (i) mantendría el agua de la piscina del combustible gastado subenfriado y, por lo tanto, eliminaría la ebullición del agua de la piscina del combustible gastado y el desprendimiento de vapor al entorno (el almacenamiento del combustible gastado descargado más recientemente en el recinto de confinamiento durante un ciclo de combustible, divulgado en la solicitud en tramitación como la presente citada anteriormente, minimiza la superficie de transferencia de calor requerida para una refrigeración por aire del agua de la piscina del combustible gastado); y (ii) reduciría la velocidad a la que bulle el agua del tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento y proporcionaría una transferencia térmica adicional al aire, de forma que combinada con el sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento, no habría necesidad de una aplicación continua de agua a la superficie externa del recinto de confinamiento después de que se haya drenado el agua en el tanque de almacenamiento de agua del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento (en tres días).

Una realización preferente de la presente invención es tener múltiples bucles separados de refrigeración para la piscina del combustible gastado y el tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento según se ilustra esquemáticamente en la Figura 4, incluyendo cada bucle 50 un intercambiador 52 de calor (intercambiador 1 de calor) que estaría sumergido en la piscina del combustible gastado o en el agua del tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento, un intercambiador 54 de calor (intercambiador 2 de calor) refrigerado por aire ubicado en la porción inferior del anillo de refrigeración del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento y un pequeño tanque 60 de equilibrio que mantiene el nivel de refrigerante en el bucle 50 de refrigeración. El bucle forma, de hecho, un termosifón. Un movimiento convectivo del líquido comienza cuando se calienta en el intercambiador 1 (52) de calor el líquido en el bucle provocando que se expanda y se vuelva menos denso y, por lo tanto, es más boyante que el fluido de trabajo más frío en la parte inferior del bucle 50. La convección mueve el líquido calentado ascendentemente en el sistema dado que es sustituido simultáneamente por líquido más frío que regresa por gravedad que es enfriado por el intercambiador 2 (54) de calor. Como se explicará de aquí en adelante, si las temperaturas de aire en el sitio de la central no se enfrían demasiado, los bucles de refrigeración no requieren ninguna válvula de aislamiento u otros componentes en los bucles de refrigeración que tienen que ser accionados y los bucles de refrigeración siempre están disponibles para operar.

Preferentemente, los bucles de refrigerante contendrán un refrigerante, tal como 245fa que se evaporará, por ejemplo, a aproximadamente 82°C y a una presión de aproximadamente 830 kPa o a 98,9°C y 1,21 MPa. Por lo tanto, los intercambiadores 52 de calor (intercambiador 1 de calor) en la piscina del combustible gastado y en el tanque de almacenamiento de agua de recarga en el interior del recinto de confinamiento actuarán como los evaporadores para vaporizar el refrigerante y presurizar el bucle de refrigeración en respuesta al calentamiento de la piscina del combustible gastado o a la temperatura del agua del tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento, mientras que los intercambiadores 54 de calor (intercambiador 2 de calor) refrigerados por aire actúan como condensadores, creando un sistema de termosifón de dos fases que utiliza la gran diferencia de densidad entre el líquido y el refrigerante vaporizado provocada por el cambio de temperatura entre la piscina del combustible gastado o el agua del tanque de almacenamiento de agua de recarga en el interior del recinto de confinamiento y el aire de refrigeración para impulsar el flujo de refrigerante y expulsar calor al entorno. En términos más sencillos, en este bucle 56 de termosifón, la temperatura del agua en la piscina del combustible gastado y/o en el tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento provoca que se caliente el refrigerante y cambie a un estado gaseoso que presuriza el bucle de refrigeración; el refrigerante vaporizado sube hasta el intercambiador de calor de condensación en el que se enfría por aire el vapor calentado y es condensado; y la gravedad obliga al refrigerante licuado a fluir de nuevo hasta el intercambiador de calor de evaporación, en el que se repite el ciclo.

Los intercambiadores 54 de calor (condensadores) refrigerados por aire están ubicados, preferentemente, en la porción inferior del anillo 58 de refrigeración del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento (según se muestra en la Figura 2), haciendo uso, por lo tanto, del recorrido del flujo de aire del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento para generar una circulación natural de aire al interior del edificio de blindaje AP1000®, bajando por el anillo entre el deflector de aire del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento y la superficie interior del edificio 30 de blindaje, subiendo por el anillo 58 de refrigeración del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento entre la vasija 28 de confinamiento y el deflector 34 de aire del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento, y saliendo a través de la estructura 38 de escape de aire en el centro de la parte superior del edificio 30 de blindaje. El recorrido del flujo del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento está diseñado para ser suficientemente grande para obtener el flujo de aire requerido para transferir el combustible gastado y el calor de decaimiento del núcleo a la vez que se mantiene la

presión del recinto de confinamiento por debajo de la presión de diseño de la vasija de confinamiento después de tres días de refrigeración asistida por agua.

5 Cuando la central opera normalmente y se mantiene el agua en la piscina 24 del combustible gastado y en el tanque 48 de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento a temperaturas normales (inferiores o iguales a 48,9°C), los bucles 50 de refrigeración operará a baja capacidad y el refrigerante 245fa se vaporizará de forma que la presión del refrigerante sea menor o igual que 340 kPa. En este modo de operación, el calor transferido del agua al aire está limitado por la baja diferencia de temperatura entre el agua, el refrigerante y el aire, al igual que por el hecho de que la densidad del vapor del refrigerante es baja, lo que tendrá como resultado mayores velocidades de flujo en el tubo ascendente del vapor. Si se inhabilita una refrigeración normal de la piscina del combustible gastado, o aumentan las temperaturas, se vaporizará más refrigerante, la presión en el bucle aumentará, aumentando la temperatura y la densidad de vapor del refrigerante y, por lo tanto, aumentará el calor transferido al aire.

15 Se debe hacer notar que si la temperatura del aire ambiental es baja, el bucle de refrigeración puede enfriar en exceso la piscina del combustible gastado y el agua del tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento. En tales aplicaciones en las que tal condición es probable, se puede añadir al bucle 50 de refrigeración una válvula 62 de aislamiento de fallo en posición abierta para permitir que los operarios aislen el bucle de refrigeración y terminen la transferencia de calor.

20 Preferentemente, los intercambiadores 52 de calor sumergidos en la piscina 24 del combustible gastado y en el tanque 48 de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento (los evaporadores) son distintos de los intercambiadores 54 de calor refrigerados por aire (los condensadores) en el anillo 58 de refrigeración del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento. Preferentemente, los intercambiadores 52 de calor de evaporación tienen tubos verticales 64 fijados a un tubo colector superior y a uno superior, respectivamente, 66 y 68. Preferentemente, cada tubo 64 contiene un orificio de entrada para evitar la inestabilidad del recorrido paralelo de flujo cuando se produce la ebullición del refrigerante. Los intercambiadores de calor del tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento (condensadores y sus evaporadores asociados) están dimensionados para transferir suficiente calor al entorno, de forma que la presurización del recinto de confinamiento después del drenaje del tanque 38 de almacenamiento de agua de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento, tres días después del inicio del drenaje, no supere la presión de diseño del recinto de confinamiento.

30 Los intercambiadores 52 de calor del combustible gastado por evaporación también consisten en tubos verticales 64 fijados a un tubo colector inferior y a uno superior 66 y 68. Cada tubo también contendría un orificio de entrada para evitar una inestabilidad del recorrido paralelo de flujo cuando se produce la ebullición del refrigerante. Los intercambiadores 52 de calor de la piscina del combustible gastado por evaporación estarán dimensionados para transferir suficiente calor al entorno de forma que la temperatura del agua de la piscina del combustible gastado no supere 93,3°C.

40 Los intercambiadores 54 de calor de la piscina del combustible gastado por condensación y del tanque de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento consistirían en intercambiadores 64 de calor de tubo vertical fijados a un tubo colector inferior y a uno superior 66 y 68, respectivamente, en los cuales los tubos están dotados de aletas verticalmente para aumentar su área superficial eficaz, pero seguirían permitiendo que el aire fluya ascendentemente a través del haz de tubos. Preferentemente, las aletas deberían ser ligeramente onduladas para crear una turbulencia del aire para aumentar el coeficiente eficaz de transferencia de calor entre el tubo y el aire. Los condensadores 54 están ubicados adyacentes a la superficie exterior de la carcasa 28 del recinto de confinamiento y colocados en el interior del deflector 34 de aire del sistema de refrigeración pasiva del recinto de confinamiento, inmediatamente encima de la guía 72 del flujo de entrada del deflector de aire.

50 La Figura 5 proporciona una vista lateral esquemática de los intercambiadores 52 y 54 de calor, estando sumergido el intercambiador 52 de calor en el agua en el tanque 48 de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior del recinto de confinamiento con una pantalla 74 en torno a los tubos intercambiadores de calor para evitar que se ensucie el área de flujo entre los tubos 64. Se muestran las aletas del tubo en el intercambiador 54 de calor por condensación en la sección transversal ampliada proporcionada en la Figura 5A.

55 En consecuencia, la presente invención complementa la invención reivindicada en la solicitud, en tramitación como la presente, con nº de serie 14/195.890 (expediente de agente nº NPP 2012-002) extendiendo el número de días que se puede refrigerar pasivamente el combustible gastado en el caso de un fallo de suministro eléctrico desde fuentes del interior de la central y de un suministro eléctrico desde fuentes externas a la central a una central nuclear. El uso de un refrigerante en el bucle de refrigeración con una circulación natural mejora la eficacia de este procedimiento durante un periodo prolongado de tiempo. Adicionalmente, los sistemas de refrigeración activa de las piscinas del combustible gastado empleados en la actualidad obtendrán algunos beneficios adicionales de refrigeración por los sistemas descritos en la presente memoria que reducirán la temperatura del agua de la piscina

del combustible gastado y, por lo tanto, la carga térmica sobre los actuales sistemas hídricos de refrigeración de componentes.

Aunque se han descrito en detalle realizaciones específicas de la invención, los expertos en la técnica apreciarán que se podrían desarrollar diversas modificaciones y alternativas a los detalles que se encuentran dentro del alcance de la invención, que se define en las reivindicaciones adjuntas.

5

REIVINDICACIONES

1. Una central de energía nuclear que comprende:
 - un sistema de suministro de vapor de reactor nuclear;
 - una vasija (28) de confinamiento para alojar herméticamente el sistema de suministro de vapor de reactor nuclear; un depósito (48) que comprende agua, alojado en el interior de la vasija (28) de confinamiento, o en proximidad de la misma;
 - combustible nuclear gastado sumergido en el interior del depósito (48) y refrigerado por el agua; y
 - un termosifón (56) que se extiende desde el interior del depósito hasta un exterior de la vasija (28) de confinamiento para transferir calor en el depósito al aire en el exterior de la vasija (28) de confinamiento, **caracterizada porque** dicho termosifón (56) comprende intercambiadores primero y segundo (52, 54) de calor, encontrándose el segundo intercambiador de calor a mayor elevación que el primer intercambiador de calor, en el que el primer intercambiador de calor está sumergido, al menos parcialmente, en el depósito (48) que, en uso, pone el agua en el depósito en el primer lado del primer intercambiador de calor en comunicación térmica con un fluido de trabajo en el segundo lado del primer intercambiador de calor, encontrándose el segundo lado del primer intercambiador de calor en comunicación de fluido con el primer lado del segundo intercambiador de calor mediante un bucle cerrado en el que circula el fluido de trabajo, que, en uso, pone el fluido de trabajo en el primer lado del segundo intercambiador de calor en comunicación térmica (70) con el aire ambiente en el exterior de la vasija (28) de confinamiento en el segundo lado del segundo intercambiador de calor, y **porque** la vasija (28) de confinamiento comprende una carcasa de acero que se extiende sustancialmente en torno a un recinto de confinamiento y tiene paredes sustancialmente verticales que se extienden desde una porción inferior del recinto de confinamiento hasta una porción superior del recinto de confinamiento, y **porque** la central de energía nuclear incluye, además, un deflector (34) de aire que se extiende sustancialmente en torno a las paredes verticales, y está separado de las mismas, de la vasija (28) de confinamiento con una entrada (72) de aire a menor elevación del deflector de aire y una salida de aire a una elevación superior del deflector de aire, estando soportado el segundo intercambiador (54) de calor en el interior de un anillo (58) entre la pared vertical de la vasija (28) de confinamiento y el deflector de aire.
2. La central de energía nuclear de la Reivindicación 1, en la que el fluido de trabajo es un refrigerante.
3. La central de energía nuclear de la Reivindicación 2, en la que el refrigerante es 245fa.
4. La central de energía nuclear de la Reivindicación 1, en la que una porción del bucle cerrado en el exterior del recinto de confinamiento comprende un tubo (70) con aletas.
5. La central de energía nuclear de la Reivindicación 1, en la que el segundo intercambiador (54) de calor está soportado en una porción inferior del anillo (58).
6. La central de energía nuclear de la Reivindicación 1, en la que el primer intercambiador (52) de calor incluye una pluralidad de primeros intercambiadores de calor, el segundo intercambiador (54) de calor incluye una pluralidad de segundos intercambiadores de calor y el bucle cerrado incluye una pluralidad de bucles cerrados que operan en paralelo con cada uno de los bucles cerrados que tienen al menos uno de los primeros intercambiadores de calor y al menos uno de los segundos intercambiadores de calor.
7. La central de energía nuclear de la Reivindicación 6, en la que cada uno de los segundos intercambiadores (54) de calor está separado en torno al exterior de la vasija (28) de confinamiento.
8. La central de energía nuclear de la Reivindicación 1, en la que el bucle cerrado incluye una válvula (62) para cortar la circulación del fluido de trabajo.
9. La central de energía nuclear de la Reivindicación 1, en la que el depósito es un tanque (48) de almacenamiento de agua de recarga de combustible en el interior de la vasija (28) de confinamiento.
10. La central de energía nuclear de la Reivindicación 1, en la que el depósito es una piscina (24) del combustible gastado en el exterior de la vasija (28) de confinamiento, y en proximidad de la misma.

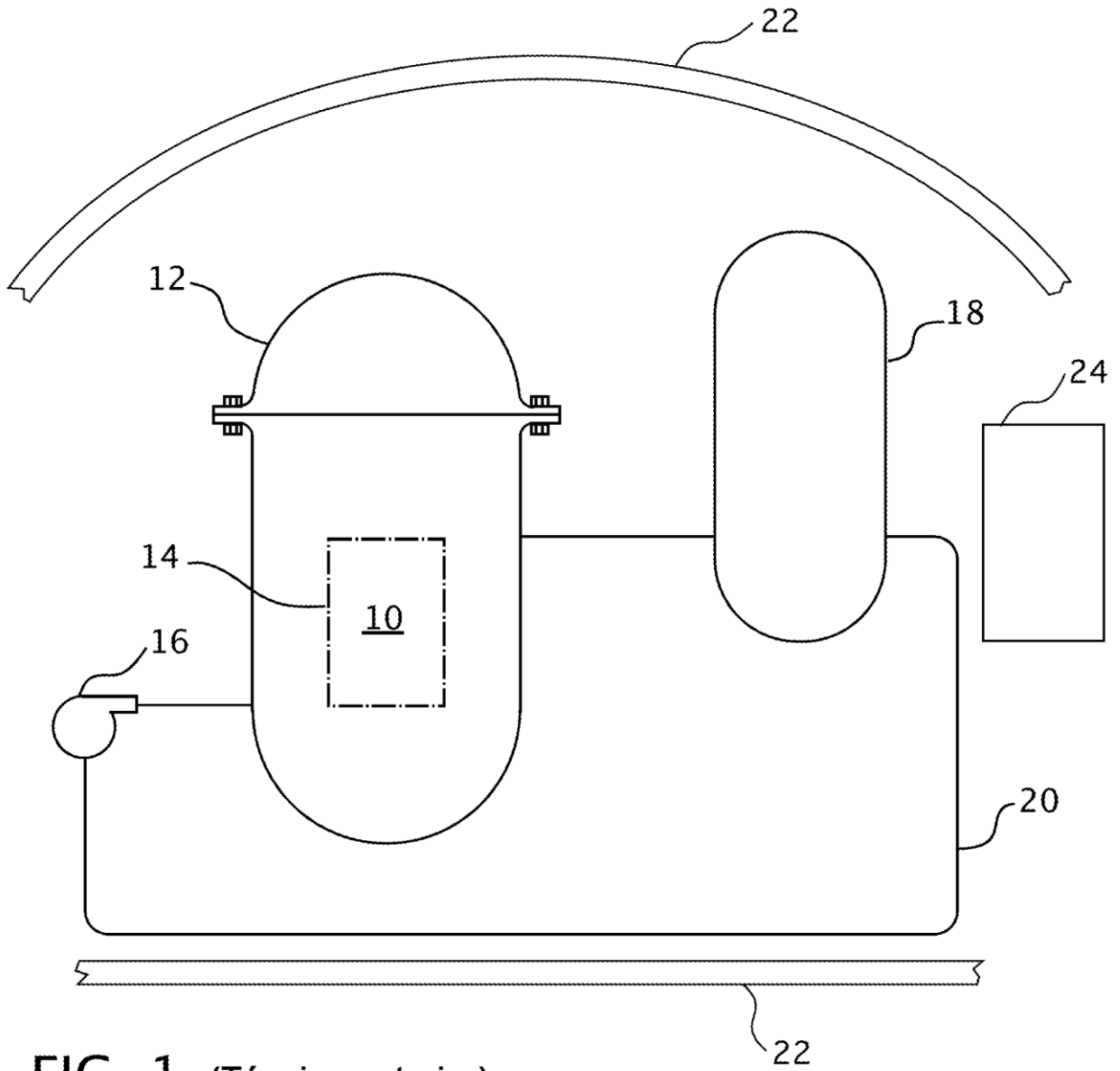


FIG. 1 (Técnica anterior)

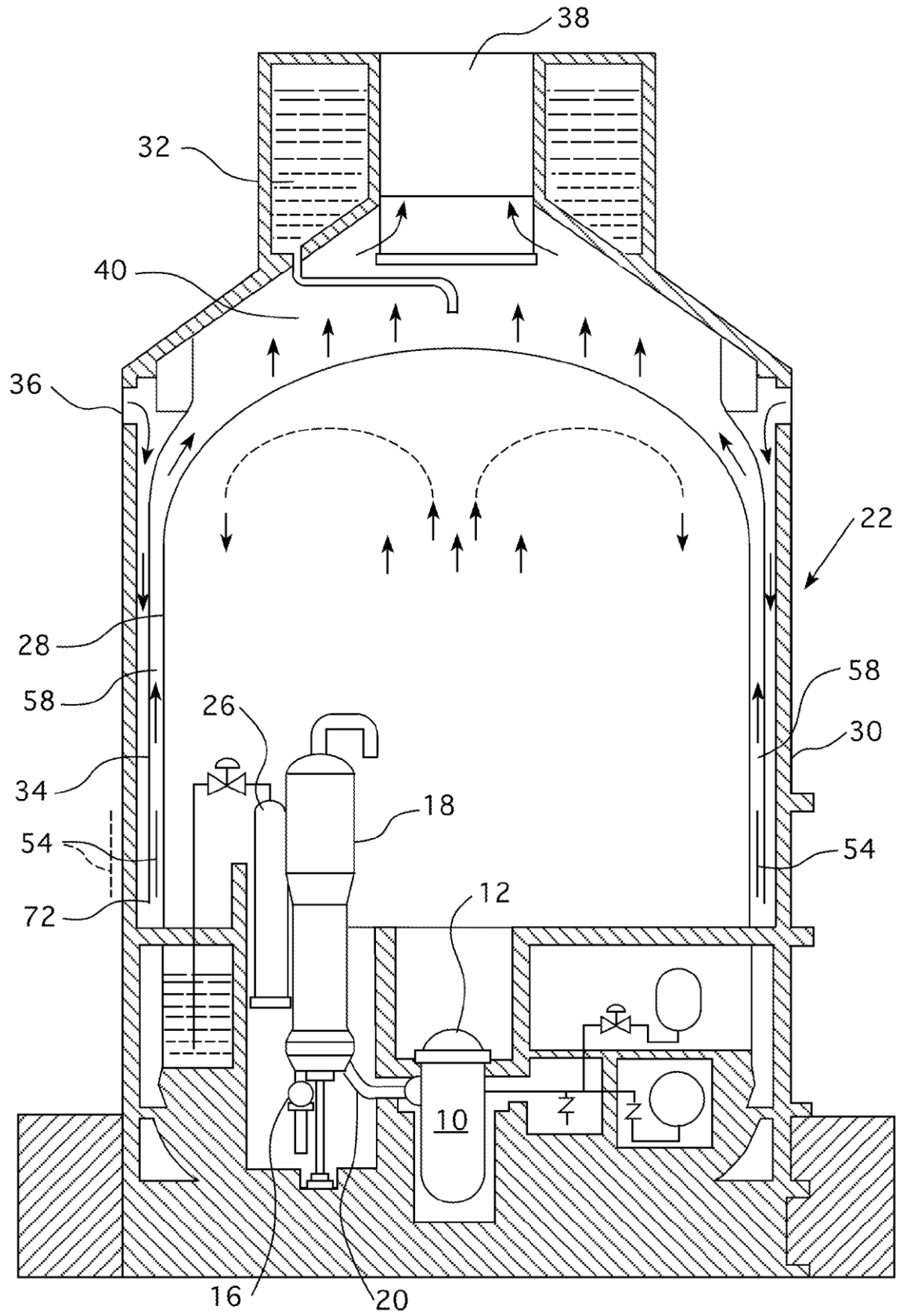


FIG. 2

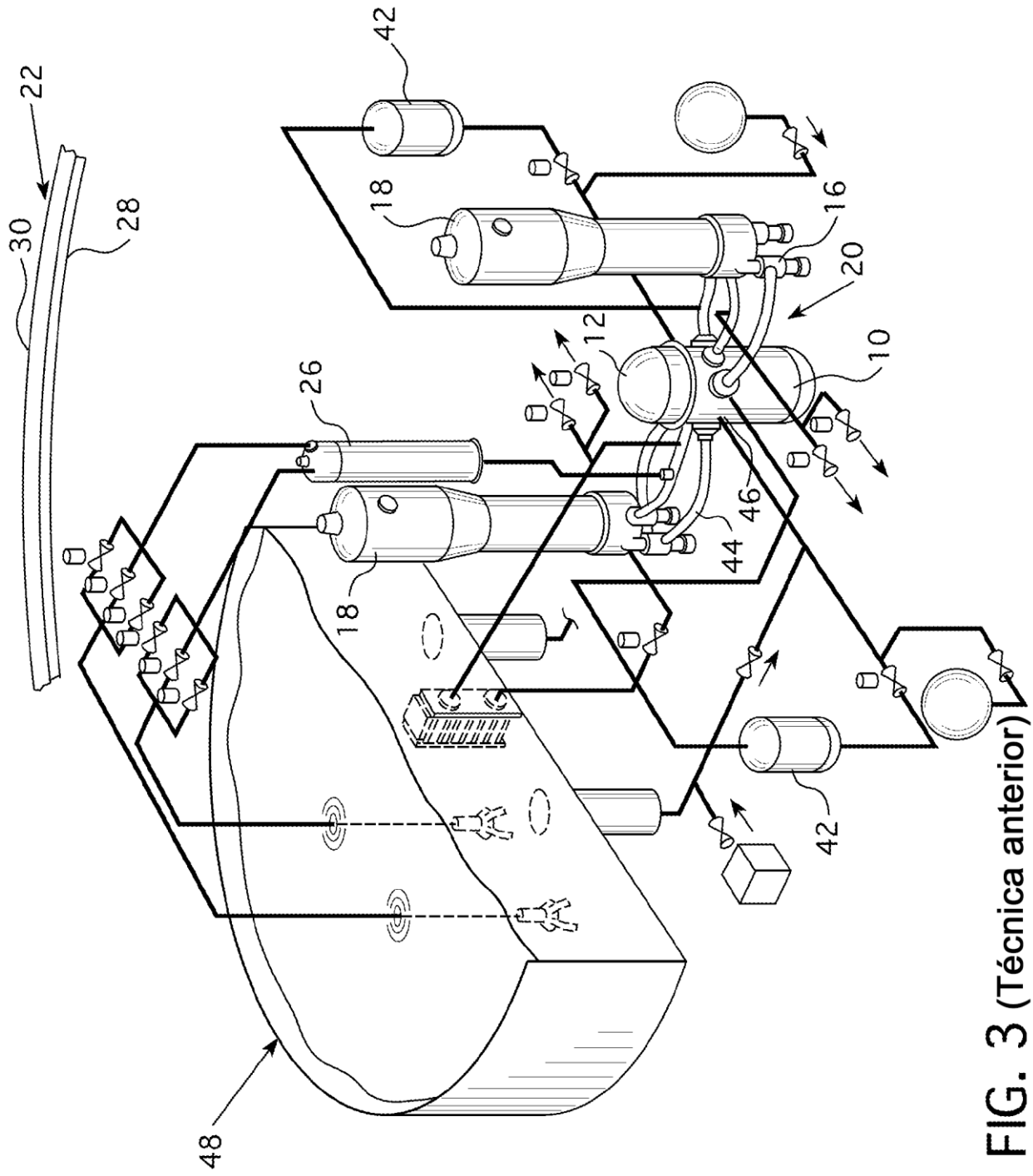


FIG. 3 (Técnica anterior)

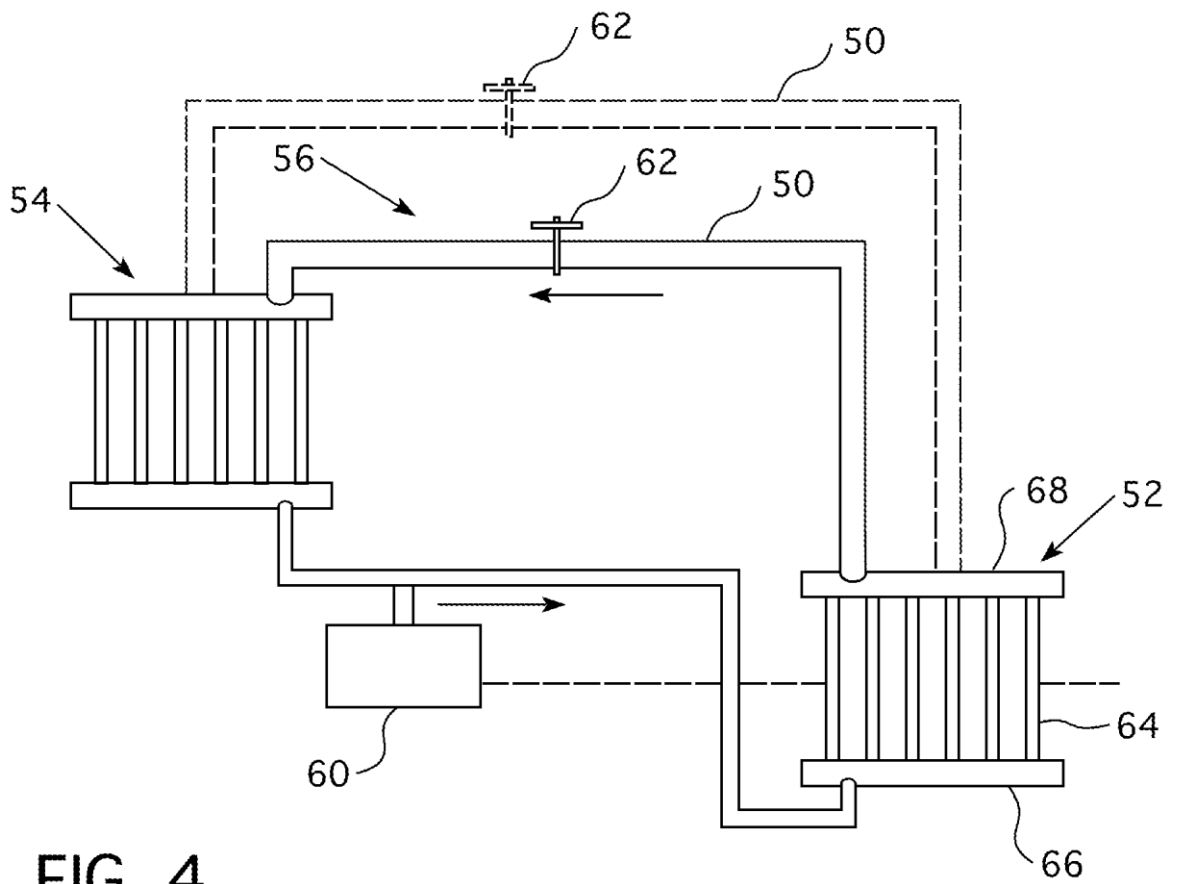


FIG. 4

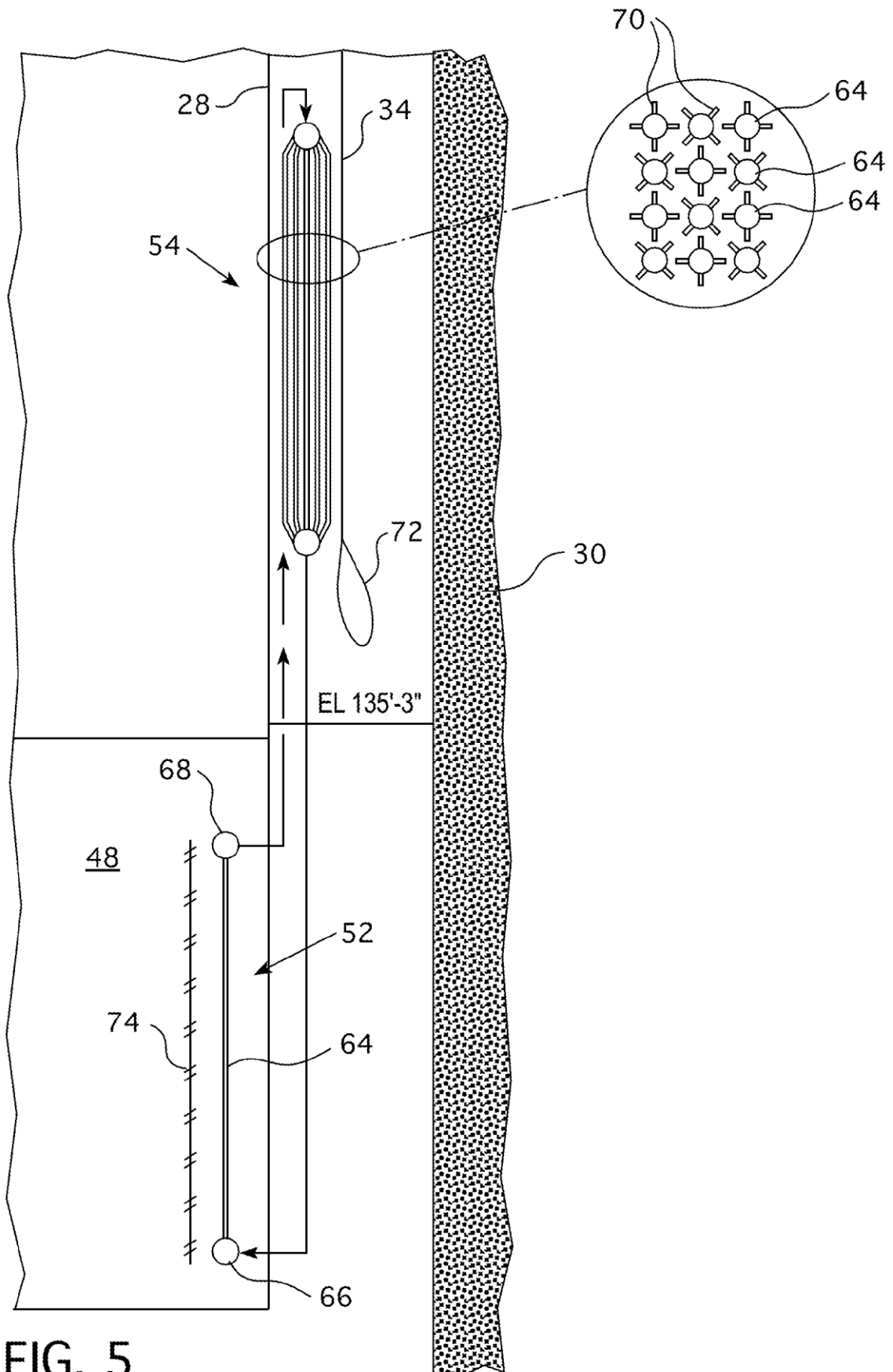


FIG. 5