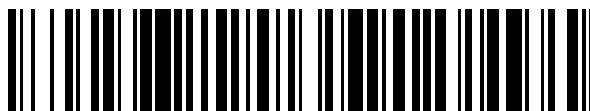


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 726 671**

51 Int. Cl.:

G21C 17/06 (2006.01)

G01N 29/032 (2006.01)

G21C 17/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.07.2014** **PCT/US2014/046506**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.01.2016** **WO16010512**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.07.2014** **E 14897503 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.02.2019** **EP 3170185**

54 Título: **Conjunto de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
08.10.2019

73 Titular/es:

WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC
(100.0%)
1000 Westinghouse Drive, Suite 141
Cranberry Township, PA 16066, US

72 Inventor/es:

HEIBEL, MICHAEL D.;
FLAMMANG, ROBERT W. y
SUMEGO, DAVID M.

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 726 671 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

Conjunto de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear

Antecedentes**1. Campo**

- 5 La presente invención versa, en general, acerca de sistemas de monitorización de un reactor nuclear y, más en particular, acerca de un monitor de la distribución de la energía intranuclear.

2. Técnica relacionada

- 10 El lado primario de los sistemas de generación de potencia de un reactor nuclear que son refrigerados con agua a presión comprende un circuito cerrado que está aislado en una relación de intercambio de calor con un circuito secundario para la producción de energía útil. El lado primario comprende la vasija del reactor que rodea 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 agua a presión; conectando las tuberías cada uno de los generadores de vapor y bombas con la vasija del reactor independientemente. Cada una de las partes del lado primario, que comprende un
- 15 generador de vapor, una bomba y un sistema de tuberías que están conectadas con la vasija, forma un bucle del lado primario.

- Con un fin ilustrativo, la Figura 1 muestra un sistema primario simplificado de reactor nuclear, que incluye una vasija generalmente cilíndrica 10 a presión del reactor que tiene una cabeza de cierre 12 que encierra un núcleo 14. Se bombea un refrigerante líquido del reactor, tal como agua, al interior de la vasija 10 por medio de la bomba 16, a través del núcleo 14 en el que se absorbe energía térmica y se descarga hasta un intercambiador 18 de calor, denominado, normalmente, turbogenerador accionado por vapor. Posteriormente, se devuelve el refrigerante del reactor hasta la bomba 16, completando el bucle primario. Normalmente, una pluralidad de los bucles descritos anteriormente están conectados con una única vasija 10 del reactor por medio de tuberías 20 de refrigerante del reactor.

- 25 En la Figura 2 se muestra con más detalle un diseño ejemplar de reactor. Además del núcleo 14 que comprende la pluralidad de conjuntos paralelos verticales 22 de combustible, de la misma extensión, para los fines de la presente descripción, las otras estructuras internas de la vasija pueden dividirse en los componentes estructurales internos inferiores 24 y los componentes estructurales internos superiores 26. En diseños convencionales, la función de los componentes estructurales internos inferiores es soportar, alinear y guiar los componentes del núcleo y la instrumentación al igual que dirigir el flujo en el interior de la vasija. Los componentes estructurales internos superiores restringen o proporcionan una restricción secundaria para los conjuntos 22 de combustible (mostrándose únicamente dos de los cuales en aras de la simplicidad en la Figura 2), y soportan y guían la instrumentación y los componentes, tales como barras 28 de control. En el reactor ejemplar mostrado en la Figura 2, el refrigerante entra en la vasija 10 del reactor a través de una o más toberas 30 de entrada, fluye descendentemente hacia un anillo entre la vasija y el barrilete 32 del núcleo, se hace que gire 180° en un plenum inferior 34, pasa hacia arriba a través de la placa inferior 37 de soporte y de una placa inferior 36 del núcleo sobre la que se asientan los conjuntos de combustible y a través y alrededor de los conjuntos. En algunos diseños, la placa inferior 37 de soporte y la placa inferior 36 del núcleo son sustituidas por una única estructura, una placa inferior de soporte del núcleo que tiene la misma elevación que 37. El flujo de refrigerante a través del núcleo y del área circundante 38 es normalmente grande del orden de 1.514 m³ por minuto a una velocidad de aproximadamente 6,1 m por segundo. La caída de la presión y las fuerzas de rozamiento resultantes tienden a provocar que se eleven los conjuntos de combustible, movimiento que es restringido por los componentes estructurales internos superiores incluyendo una placa superior circular 40 del núcleo. El refrigerante que sale del núcleo 14 fluye a lo largo del lado inferior de la placa superior 40 del núcleo y hacia arriba en una pluralidad de perforaciones 42. Posteriormente, el refrigerante fluye hacia arriba y radialmente hacia una o más toberas 44 de salida.
- 45

- Los componentes estructurales internos superiores 26 pueden estar soportados desde la vasija o la cabeza de la vasija e incluyen un conjunto superior 46 de soporte. Se transmiten cargas entre el conjunto superior 46 de soporte y la placa superior 40 del núcleo, principalmente por medio de una pluralidad de columnas 48 de soporte. Esencialmente, cada una de las columnas de soporte está alineada encima de un conjunto seleccionado 22 de combustible y de perforaciones 42 en la placa superior 40 del núcleo.
- 50

- Se guían barras 28 de control amovibles de forma rectilínea, que normalmente incluyen un eje 50 de accionamiento y una estructura 52 de tipo araña de barras de veneno neutrónico, a través de los componentes estructurales internos superiores 26 y al interior de conjuntos alineados 22 de combustible por medio de tubos guía 54 de las barras de control. Los tubos guía están unidos fijamente al conjunto superior 46 de soporte y a la parte superior de la placa superior 40 del núcleo. La disposición de las columnas 48 de soporte ayuda a retardar la deformación de los tubos guía en condiciones de accidente que podría afectar negativamente a la capacidad de inserción de las barras de control.
- 55

La Figura 3 es una vista en alzado, representada en forma acortada verticalmente, de un conjunto de combustible que es designado, en general, mediante el número de referencia 22. Normalmente, se utiliza el conjunto 22 de combustible en un reactor de agua a presión y tiene un armazón estructural que, en su extremo inferior, incluye una tobera inferior 58. La tobera inferior 58 soporta el conjunto 22 de combustible sobre la placa inferior 36 del núcleo en la región del núcleo del reactor nuclear. Además de la tobera inferior 58, el armazón estructural del conjunto 22 de combustible también incluye una tobera superior 62 en su extremo superior y un número de tubos o manguitos guía 84 que alinean los tubos guía 54 en los componentes estructurales internos superiores. Los tubos o manguitos guía 84 se extienden longitudinalmente entre las toberas inferior y superior 58 y 62 y en extremos opuestos están fijados rígidamente a las mismas.

El conjunto 22 de combustible incluye, además, una pluralidad de rejillas soporte transversales 64 separadas axialmente a lo largo de los manguitos guía 84, y montadas en los mismos, y un conjunto organizado de barras alargadas 66 de combustible separadas transversalmente de la rejilla soporte 64, y soportadas por la misma. Las rejillas soporte 64 formadas convencionalmente de un conjunto de flejes ortogonales que están intercalados en un patrón de huevera con la superficie de contacto adyacente de cuatro flejes que definen celdas de soporte aproximadamente cuadradas, muchas de las cuales soportan las barras 66 de combustible en una relación mutua separada transversal. Las celdas restantes están ocupadas por los manguitos guía 84 de las barras de control y un manguito 68 para instrumentos. Según se muestra en la Figura 3, el tubo o manguito 68 para instrumentos está ubicado en el centro del conjunto de combustible y se extiende entre las toberas inferior y superior 58 y 62, y está capturado por las mismas. Con tal disposición de partes, el conjunto 22 de combustible forma una unidad integral con capacidad para ser manipulada convenientemente sin dañar el conjunto de partes.

Según se ha mencionado anteriormente, las barras 66 de combustible en la disposición de las mismas en el conjunto 22 están mantenidas en una relación separada entre sí por medio de las rejillas 64 soporte separadas a lo largo de la longitud del conjunto de combustible. Cada barra 66 de combustible incluye una pluralidad de pastillas 70 de combustible nuclear y está cerrada en sus extremos opuestos por medio de tapones extremos superior e inferior 72 y 74. Las pastillas 70 se mantienen en una pila mediante el muelle 76 del plenum dispuesto entre el tapón extremo superior 72 de cierre y la parte superior de la pila de pastillas. Las pastillas 70, compuestas de material físil, son responsables de crear la energía reactiva del reactor. La vaina que rodea las pastillas funciona como una barrera para evitar que los subproductos de fisión entren en el refrigerante y contaminen adicionalmente el sistema del reactor.

Para controlar el procedimiento de fisión, un número de barras 78 de control son amovibles de forma recíproca en los manguitos guía 84 ubicados en posiciones predeterminadas en el conjunto 22 de combustible. Específicamente, un mecanismo 80 de barras de control para haz de barras, colocado por encima de la tobera superior 62, soporta una pluralidad de barras 78 de control. El mecanismo de control tiene un miembro de cubo cilíndrico roscado internamente 82 con una pluralidad de uñas o brazos 52 que se extienden radialmente que forman la araña que se ha hecho notar anteriormente con respecto a la Figura 2. Cada brazo 52 está interconectado con una barra 78 de control, de forma que el mecanismo de las barras de control sea operable para mover las barras de control verticalmente en los manguitos guía 84 para controlar, de ese modo, el procedimiento de fisión en el conjunto 22 de combustible, bajo la fuerza motriz de un eje 50 de accionamiento de las barras de control que está acoplado con el cubo 80 de las barras de control de una forma bien conocida.

Se utiliza el movimiento de las barras de control para dar forma a la distribución axial y radial de potencia para mantener las temperaturas máximas de las vainas de las barras de combustible dentro de límites aceptables. Para monitorizar este procedimiento, y para proporcionar información para los sistemas de control y de protección, se proporcionan monitores intranucleares de neutrones para monitorizar la radiación de neutrones y termopares para monitorizar la temperatura de salida del núcleo varios de los conjuntos de combustible, en el interior de los manguitos 68 para instrumentos. Los conductores de señales de estos sensores fueron encaminados normalmente, al principio a través de la parte inferior de la vasija del reactor y, más recientemente, a través de los componentes estructurales internos superiores, saliendo a través de la cabeza de la vasija del reactor, hasta un centro de control. Sin embargo, la instrumentación montada en la parte superior complica el procedimiento de recarga, debido a que estos sensores tienen que ser retirados del núcleo antes de que se pueda acceder a los conjuntos de combustible para su traslado o sustitución. La retirada de la instrumentación del núcleo y la sustitución posterior de la instrumentación después de que los conjuntos de combustible en el núcleo hayan sido reconfigurados aumenta significativamente el tiempo requerido para completar el procedimiento de recarga, que se encuentra en el camino crítico de una parada. La minimización del tiempo de parada para una empresa explotadora es un objetivo crítico, debido al coste elevado de la energía sustitutiva en el que se incurre durante una parada.

Además, el documento US 2014/0 050 293 A1 da a conocer un dispositivo termoacústico nuclear que incluye un alojamiento que define una cámara interior y una porción de combustible nuclear dispuesta en la cámara interior. Hay dispuesta una pila en la cámara interior y tiene un extremo caliente y un extremo frío. La pila está separada de la porción de combustible nuclear con el extremo caliente dirigido hacia la porción de combustible nuclear. La pila y la porción de combustible nuclear están colocadas de forma que se produzca una onda estacionaria acústica en la cámara interior. Una frecuencia de la onda estacionaria acústica depende de la temperatura en la cámara interior.

En consecuencia, un objeto de la presente invención es proporcionar un mecanismo para monitorizar la distribución axial y radial de la potencia en el núcleo que no se requerirá que se retire durante una parada de recarga.

Adicionalmente, un objeto de la presente invención es proporcionar tal disposición de sensores que pueda instalarse en una mayoría de los conjuntos de combustible, si no en todos, sin crear una obstrucción al flujo de refrigerante en los componentes estructurales internos superiores.

Además, un objeto de la presente invención es suministrar tal sistema de detección que pueda fabricarse como una parte integral del conjunto de combustible.

Sumario

Se logran estos y otros objetos mediante un conjunto de medición termoacústica de la distribución de energía nuclear que tiene una pluralidad de motores termoacústicos soportados en una disposición separada en tándem y dimensionados para caber en un manguito para instrumentos en un conjunto de combustible nuclear. Sustancialmente, cada uno de la pluralidad de motores termoacústicos tiene una vaina externa con una fuente autónoma de calor soportada en el interior de la vaina en el entorno de un extremo y separada de una cámara de resonancia en el otro extremo con una pila de intercambio de calor separando la fuente de calor de la cámara de resonancia. La vaina está dimensionada para caber con holgura en el manguito para instrumentos para permitir que el refrigerante fluya en torno al exterior de la superficie de la vaina. Cada una de las cámaras de resonancia está diseñada para generar una frecuencia distinta de sonido cuya amplitud es representativa de la diferencia en temperatura entre una primera ubicación en la cámara de resonancia sustancialmente en la pila de intercambio de calor y una segunda ubicación sustancialmente en el otro extremo de la vaina. La vaina en torno a la cámara de resonancia es muy conductora térmicamente para enfriar el gas en la cámara. Se intercala una pieza de separación entre cada uno de un par adyacente de los motores termoacústicos.

Preferentemente, una porción de la vaina que rodea la fuente autónoma de calor está aislada térmicamente y las piezas de separación están configuradas para aislar térmicamente la fuente de calor de uno de un par adyacente de motores termoacústicos del segundo del par de motores termoacústicos. En una realización, la fuente autónoma de calor de al menos algunos de los varios motores termoacústicos está soportada en un extremo inferior de la vaina y comprende material físil. En otra realización, la fuente autónoma de calor comprende un material con una propensión elevada a convertir la radiación gamma de fisión en calor detectable, tal como tungsteno. De forma deseable, se proporciona un sistema de telemetría acústica para recibir el sonido generado por sustancialmente cada uno de la pluralidad de motores termoacústicos, en una ubicación remota. De forma preferente, la disposición separada en tándem de la pluralidad de motores termoacústicos abarca sustancialmente una altura de un manguito para instrumentos del conjunto de combustible nuclear. En una realización, la disposición en tándem de la pluralidad de motores termoacústicos comprende aproximadamente siete motores termoacústicos.

La invención también contempla un sistema de generación de energía nuclear que incorpora una pluralidad de tales disposiciones separadas en tándem de motores termoacústicos estando ubicado al menos uno de la disposición separada en tándem de motores termoacústicos, respectivamente, en el interior de una pluralidad de manguitos para instrumentos en los conjuntos de combustible en el núcleo del sistema de generación de energía nuclear. Preferentemente, uno de la disposición separada en tándem de motores termoacústicos está ubicado en el manguito para instrumentos en el interior de cada uno de los conjuntos de combustible en el núcleo que no recibe una barra de control. De forma deseable, uno de la disposición separada en tándem de motores termoacústicos está ubicado en cada uno de los manguitos para instrumentos en el núcleo.

Breve descripción de los dibujos

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

La Figura 1 es una representación esquemática del lado primario de un sistema de generación de energía nuclear;

la Figura 2 es una vista en alzado, parcialmente en sección, de una vasija del reactor nuclear y de componentes internos a los que se pueden aplicar las realizaciones descritas de aquí en adelante;

la Figura 3 es una vista en alzado, parcialmente en sección, de un conjunto de combustible ilustrado en forma acortada verticalmente, con partes cortadas en aras de la claridad;

la Figura 4 es un diagrama esquemático que muestra los principios termoacústicos empleados en la presente invención; y

la Figura 5 es una vista esquemática de un conjunto parcial de medición termoacústica de la distribución de energía nuclear de una realización de la presente invención.

Descripción de la realización preferente

El rendimiento de un reactor nuclear, como el de muchos otros dispositivos de conversión de energía, está limitado por la temperatura que tolerarán los materiales componentes sin fallos. En el caso de un reactor nuclear con el

núcleo que comprende un montaje de conjuntos de combustible, tal como el ilustrado en la Figura 3, el límite superior de temperatura se determina mediante la barra de combustible o los materiales de vaina de las varillas de combustible empleados. Para proteger de forma adecuada el núcleo del reactor contra temperaturas excesivas, es necesario estudiar la temperatura de la varilla de combustible “más caliente” o del canal de refrigerante “más caliente” entre varillas de combustible adyacentes en el núcleo, dado que los daños se producirán, con máxima probabilidad, en primer lugar en la varilla de combustible más caliente. Por lo tanto, la varilla o el canal “más caliente” se convierte en el factor limitante para una operación segura del núcleo del reactor.

Como es bien conocido, se genera calor en un reactor mediante un procedimiento de fisión en el material de combustible. Sin embargo, el procedimiento de fisión produce no solo calor sino isótopos radiactivos que son potencialmente dañinos y que se debe evitar que escapen al entorno. Con este fin, se envaina el combustible con material que retiene los productos de fisión. Para evitar el calentamiento excesivo de las vainas y en aras de evitar la liberación de productos de fisión que se produciría tras un daño o fallo de la vaina, se hace circular refrigerante a través del núcleo del reactor. El calor transferido al refrigerante en circulación de los elementos de combustible es extraído en forma de energía utilizable corriente abajo del núcleo del reactor en un generador de vapor, según se ha mencionado anteriormente. Por lo tanto, por ejemplo, en un sistema de reactor de agua a presión, se mantiene a presión el agua que fluye a través del núcleo, sobrecalentado en el interior del núcleo, y es bombeada hasta el lado del tubo del generador de vapor, en el que su calor es transferido al agua en el lado de la carcasa del generador de vapor. El agua en el lado de la carcasa se encuentra a menor presión y, por lo tanto, la energía térmica transferida provoca que hierva el agua secundaria. El vapor generado de esta manera es empleado para accionar una turbina que, a su vez, mueve un generador para la producción de electricidad.

Según circula refrigerante a través del núcleo del reactor, se transferirá calor al mismo bien mediante convección subenfriada, denominada a menudo conducción laminar, o mediante ebullición nucleada. La ebullición nucleada se produce a mayores niveles de flujo calorífico y es el modo preferente de evacuación de calor dado que permite que se transfiera más energía al refrigerante, permitiendo, de ese modo, que el reactor opere a mayores niveles de eficacia. La ebullición nucleada se caracteriza por la formación de burbujas de vapor en puntos de formación de burbujas en las superficies de transferencia de calor. Estas burbujas se desprenden de la superficie y son transportadas hasta la corriente principal de refrigerante. Si la entalpía de la masa principal de refrigerante se encuentra por debajo de la saturación, las burbujas de vapor se colapsan sin ninguna formación neta de vapor en el canal. Este fenómeno es denominado ebullición subenfriada o ebullición local. Si la entalpía de la masa principal de refrigerante se encuentra a la entalpía, o por encima de la misma, del líquido saturado, las burbujas de vapor no se colapsan y se dice que el refrigerante se encuentra en ebullición nucleada saturada.

Si se aumenta el flujo calorífico hasta un volumen suficientemente elevado, se crean las burbujas formadas en la superficie de transferencia de calor durante la ebullición nucleada a tal tasa elevada que no pueden alejarse tan rápidamente como son generadas. Posteriormente, las burbujas tienden a unirse en la superficie de transferencia de calor y forman una capa o película de vapor. Esta película impone una resistencia elevada a la transferencia de calor y las caídas de temperatura a través de la película pueden volverse muy grandes aunque no haya un aumento adicional en el flujo calorífico. La transición de la ebullición nucleada a la ebullición en película es denominada “límite de ebullición nuclear” (LEN).

Otra condición que requiere la acción protectora es la incidencia de una densidad local elevada de potencia en una de las barras de combustible. Una densidad local excesiva de potencia inicia el reblandecimiento del combustible de la línea central, que puede dar lugar a una fractura de la integridad de la vaina del combustible. Además, una condición de densidad local excesiva de potencia es inaceptable en el caso de un accidente con pérdida de refrigerante dado que una densidad local excesiva de potencia provocaría que la temperatura de las vainas superase los límites permisibles si se perdiese el refrigerante. Como resultado del análisis de los accidentes con pérdida de refrigerante, los diseñadores del reactor establecen los valores para las máximas densidades locales permisibles de potencia en el inicio de un accidente con pérdida de refrigerante, de forma que se satisfagan los criterios de consecuencias aceptables. El límite de densidad local máxima de potencia se especifica, en general, como un límite de densidad lineal de potencia (DLP) con unidades de vatios por centímetro.

Una tercera condición que actúa como un límite operativo es la potencia autorizada a la que se permite que funcione el reactor particular. Estas tres condiciones limitantes para la operación deben ser monitorizadas para hacer que las operaciones del reactor sean seguras. Dado que es probable que se produzca un daño en la vaina debido a la reducción en el coeficiente de transferencia de calor y las elevadas temperaturas de la vaina acompañantes que pueden producirse cuando se produce un LEN, o debido a una densidad local excesiva de potencia, se debe detectar o predecir el inicio de estas condiciones y una acción correctiva en forma de una reducción en la tasa de fisiones implementada rápidamente. Una forma de monitorizar el LEN en el reactores para generar un índice o una correlación que indica la condición del reactor con respecto a la probabilidad de la incidencia del LEN. Esta correlación se denomina coeficiente del límite de ebullición nucleada (CLEN). Los límites tanto de CLEN como de DLP son indicativos de la proximidad de la operación a los límites apropiados de diseño.

En un procedimiento complejo, tal como una central nuclear, se proporcionan numerosos sensores para medir diversas condiciones físicas en el procedimiento, tales como, por ejemplo, presiones, temperaturas, flujos, niveles,

radiación y el estado de diversos componentes, tales como, la posición de las válvulas, de las barras de control y si se opera o no una bomba. Estas mediciones son utilizadas, en general, para llevar a cabo tres funciones distintas: el control, la vigilancia y la protección del procedimiento. El control del procedimiento implica una regulación automática o semiautomática de las condiciones del procedimiento para lograr el resultado deseado. La vigilancia abarca la monitorización de las condiciones del procedimiento para determinar que se logran los resultados deseados. La protección consiste en una respuesta automática a condiciones anormales en el procedimiento para evitar que las condiciones operativas superen los límites predeterminados de diseño y emprender etapas para mitigar los efectos adversos de operación fuera de los límites de diseño. En el caso de una central nuclear en particular, la función de protección es la más exigente de las tres. Sin embargo, todas estas funciones dependen de los sensores del reactor para ser eficaces. Uno de los sistemas principales de detección empleados para cada una de estas funciones son los sensores intranucleares de neutrones que transmiten una medición directa de distribución axial y radial de potencia, tanto durante la operación como la parada.

Una de las lecciones enseñadas por el tsunami de Fukushima Daichi fue que la monitorización de la condición del combustible nuclear es tan importante durante la parada como lo es durante la operación, especialmente cuando existe una pérdida de suministro eléctrico desde el interior como desde el exterior. Esta invención emplea principios termoacústicos para monitorizar la distribución intranuclear de potencia y transmitir las señales monitorizadas a un sitio remoto sin potencia externa y conductores externos de señales que, si no, estorbarían a los componentes estructurales internos del reactor y formarían un impedimento para el procedimiento de recarga. Los motores termoacústicos (denominados a veces "motores TA") son dispositivos termoacústicos que utilizan ondas acústicas de amplitud elevada para bombear calor de un lugar a otro o, si no, utilizan una diferencia de calor para inducir ondas acústicas de amplitud elevada. La presente invención emplea este principio.

La Figura 4 ilustra, de forma figurada, un motor termoacústico 86 rodeado en una vaina externa 88. El interior de la vaina 88 está segregado por un intercambiador 92 de calor también conocido como una pila, en una fuente 98 de calor y un resonador 90. Se aplica calor al lado caliente del intercambiador 94 de calor y crea un gradiente de temperatura a través de la pila 92. El lado frío de un intercambiador 96 de calor mantiene la temperatura del resto del motor a un valor deseado por debajo de la temperatura de la fuente 98 de calor. Aunque se muestra la fuente 98 de calor en un extremo en la Figura 5, se debería apreciar que la fuente de calor puede estar separada del extremo de la vaina siempre que la fuente 98 de calor se encuentre en un lado de la pila 92 del intercambiador de calor y el resonador 90 se encuentre en el otro lado de la pila 92. El procedimiento termoacústico puede iniciarse mediante una perturbación tal como ruido de fondo o fluctuaciones térmicas. Con referencia a la representación del diagrama de bloques en la parte inferior de la Figura 4 puede verse que según se mueve el gas en la pila hacia la izquierda (etapa 1), se transfiere calor del extremo caliente de la pila 94 al gas durante la etapa 2, aumentando la temperatura desde (T_{++} hasta T_{+++}) y la presión del gas. El aumento de la presión empuja al gas hacia atrás un poco más cada ciclo. Cuando el gas se mueve hacia la derecha (etapa 3), se transfiere calor del gas a la pila (etapa 4), reduciendo la temperatura del gas desde T_{+} hasta T_0 y reduciendo su presión. Esto vuelve a aspirar el gas hacia el extremo caliente de la pila un poco más cada ciclo. Esta acción en el interior de la pila provoca la formación de una onda acústica estacionaria en la porción de resonación del dispositivo con una frecuencia dictada por la longitud del dispositivo y una amplitud determinada por la diferencia de temperatura entre el extremo caliente y el extremo frío de la pila. Finalmente, la amplitud de la onda acústica crece hasta un nivel de estado estable en el que la potencia acústica disipada durante cada ciclo es igual a la potencia acústica generada por el procedimiento termoacústico. El resultado es que se sostiene una onda de presión acústica en el motor. La frecuencia está relacionada con la longitud del resonador L y la velocidad c del sonido del gas en el resonador. En el modo fundamental de longitud de media onda, f es igual a $c/2L$; para un resonador de sección transversal uniforme la velocidad de sonido está relacionada con la temperatura del gas. Si se aplica este principio en un núcleo, se puede utilizar un motor termoacústico para producir ondas acústicas estacionarias con características determinadas directamente por la diferencia entre la entrada de calor a un extremo y el calor eliminado en el otro extremo del dispositivo termoacústico.

La diferencia de calor entre los dos extremos de un dispositivo termoacústico requerida para producir información útil de energía acústica, según se ha descrito anteriormente, es sumamente difícil de modificar retroactivamente en los diseños existentes de combustible de un reactor nuclear. Se hace que sea posible la medición de la distribución de potencia en el interior del núcleo de un reactor nuclear comercial utilizando principios termoacústicos utilizando el conjunto de medición termoacústica de la distribución de energía nuclear reivindicado de aquí en adelante, definiéndose a continuación una realización del mismo. La presente invención permite que se determine una distribución radial y axial de la energía del núcleo a partir de sensores que producen información de frecuencia acústica correspondiente a la posición radial y axial en el interior del núcleo del reactor con una amplitud proporcional a la magnitud del flujo neutrónico en la ubicación del sensor. La entrada de calor es proporcionada por la inclusión de una fuente autónoma de calor tal como una pastilla de material fisionable en el extremo 98 de entrada de calor de cada sensor en el interior del conjunto. Se concibe que la expresión "autónomo" abarque cualquier fuente de calor que cuando sea colocada en el entorno de un núcleo operativo de un reactor, produzca continuamente suficiente calor para establecer el incremento de temperatura requerido para generar el gradiente de temperatura necesario para producir una cantidad práctica de energía acústica que pueda ser detectada en el exterior de la vasija del reactor. Esto permite que se determine la potencia reactiva relativa en las diversas ubicaciones de los sensores. Los principios operativos termoacústicos del conjunto de sensores permiten que la

presente invención produzca información instantánea de la distribución de la potencia del núcleo sin requerir un entrada procedente de una fuente externa de alimentación y sin conductores de salida de señales que requieren penetraciones en la vasija del reactor.

Por lo tanto, se pueden utilizar los principios termoacústicos descritos anteriormente con respecto a la Figura 4 para producir ondas acústicas estacionarias con características determinadas directamente por la diferencia entre la entrada de calor a un extremo 94 y el calor eliminado en el otro extremo 96 y la longitud de la cámara 90 de resonancia. En la Figura 5 se muestra una realización del diseño del conjunto detector contemplado por la presente invención y contiene un número de elementos termoacústicos 86 de detección que están apilados en el interior de un tubo 100 que sirve de vaina externa. El conjunto 108 de sensores está instalado en el interior del manguito central 68 para instrumentos en el interior de un estilo existente de un conjunto comercial 22 de combustible, tal como el ilustrado en la Figura 3. Se determinan el número y la posición axial de los elementos 86 de detección colocados en el interior del vaina externa 100 para lograr la precisión requerida de la medición de la distribución axial y radial de potencia del núcleo del reactor para lograr el factor diana de pico del núcleo y los objetivos de potencia operativa del reactor. Una separación axial típica será tal que el centro de cada pastilla de material fisionable estará ubicado en múltiplos de un séptimo de la altura de la región axial activa de combustible. De forma deseable, este dispositivo estará colocado en todos los conjuntos de combustible —incluyendo aquellas ubicaciones radiales del núcleo con conjuntos de combustible que contienen barras de control, que normalmente no tienen detectores intranucleares fijos del flujo a los que se accede desde los componentes estructurales internos superiores—. Por lo tanto, el empleo de este concepto no solo proporciona una imagen más precisa de la distribución axial y radial de potencia del núcleo, sino que también elimina las etapas de recarga requeridas para retirar y volver a insertar la instrumentación intranuclear.

Aunque en la Figura 5 solo se muestran dos elementos, es decir motores termoacústicos 86, se debería apreciar que se pueden añadir elementos adicionales en tándem y apilados igual que los dos elementos mostrados en la Figura 5, solo como una extensión de la cadena axial de elementos 86. La fuente 98 de calor para producir la onda acústica estacionaria es generada por el material fisil 98 contenido en el extremo “caliente” 94 de cada dispositivo en el conjunto 108. El calor será directamente proporcional a la tasa de fisión en el material fisil. Por lo tanto, la amplitud, es decir, la intensidad acústica, de la onda producida en cada dispositivo 86 será proporcional a la tasa de fisión en la ubicación del dispositivo. El incremento de temperatura requerido para generar el gradiente de temperatura necesario para producir una cantidad práctica de energía acústica se obtiene cubriendo el extremo caliente del dispositivo con aislamiento 102 y proporcionando un contacto térmico mejorado con el refrigerante en el extremo frío de la pila en cada sensor utilizando, por ejemplo, aletas que se prolongan radialmente para mejorar el contacto del refrigerante con la superficie. Según los principios desarrollados aquí, cada dispositivo tendrá una cámara 90 de resonancia con una longitud única, de forma que cada dispositivo tenga una frecuencia única para permitir que se identifique con claridad la tasa de fisión en cada ubicación de sensor a partir de la onda acústica que genera la cámara. Se requiere el uso de telemetría acústica 106 para recoger señales de los sensores en una ubicación remota y producir la información de tasa local de fisión. La información de tasa local de fisión puede ser utilizada para producir una medición tanto de la potencia total del núcleo como una distribución tridimensional de la potencia del núcleo en una base esencialmente continua en tiempo real utilizando las herramientas disponibles en la actualidad y entendidas por los expertos en la técnica.

Los principios operativos termoacústicos del conjunto de sensores permiten que la presente invención produzca información instantánea de la distribución de la potencia del núcleo sin requerir una fuente externa de alimentación o conductores de señales que necesiten penetraciones en la vasija del reactor y tengan que ser gestionados durante un procedimiento de recarga.

Se puede obtener una mejora adicional empleando, como una fuente autónoma de calor, un material con una propensión elevada a convertir la radiación gamma de fisión en calor detectable, tal como tungsteno, en el extremo de entrada de calor del sensor en el interior del conjunto en vez de material fisil. Se concibe que la expresión “calor detectable” abarque la cantidad de calor, es decir, BTU, requerida para generar el gradiente de temperatura necesario para producir una cantidad práctica de energía acústica que ha de ser detectada en el exterior de la vasija del reactor. La diferencia clave entre la presente realización y la anterior realización es que se sustituye el material fisionable por un volumen de material que absorberá energía de la radiación gamma de fisión y convertirá la energía absorbida en calor que proporcionará la fuerza motriz utilizada para generar sonido con una amplitud proporcional a la entrada de calor que puede ser detectado en el exterior de la vasija del reactor. Este tipo de fuente de calor no se gastará con un mayor tiempo de estancia en el interior del núcleo del reactor. Esto permitirá una determinación mucho más sencilla y el mantenimiento de la relación entre la generación de calor en el elemento de calentamiento y la amplitud del sonido medida. Dado que la población gamma de fisión, y el calor asociado generado en el material del elemento de calentamiento, por ejemplo tungsteno, es proporcional a la tasa local de fisión, se puede determinar la potencia relativa del reactor en la ubicación de los sensores a partir de la amplitud del sonido generado. El tungsteno es solo un ejemplo de un material adecuado para esta aplicación. Un volumen reducido de tungsteno se calentará rápidamente en presencia de un campo intenso de radiación gamma. Un cálculo sencillo para un volumen de 1,9 cm por 1,9 cm por 2,54 cm de tungsteno en un reactor operativo a plena potencia producirá al menos cuarenta vatios de calor. Esto es más que suficiente para excitar amplitudes adecuadas de sonido en todas las frecuencias necesarias. La presente realización no requerirá ningún material fisionable y no experimentará ningún

cambio complejo en características operativas como una función del tiempo de operación en el reactor. La presente realización también será mucho menos costosa de fabricar y, en último término, producirá una medición mucho más estable y precisa de la distribución de la potencia del núcleo.

5 Los sensores acústicos pueden fijarse al exterior de la vasija del reactor para medir la amplitud del sonido para cada frecuencia correspondiente a una posición distinta axial y radial del núcleo. Posteriormente, se puede utilizar esta información para crear una distribución tridimensional de la potencia del núcleo utilizando técnicas conocidas por los expertos en la técnica, tales como las técnicas utilizadas en el sistema de soporte lógico BEACON, disponible en Westinghouse Electric Company LLC, Cranberry Township, Pensilvania, EE. UU.

10 Por lo tanto, los principios operativos termoacústicos del conjunto de sensores permiten que la presente invención produzca información instantánea de la distribución de la potencia del núcleo en diseños actuales de reactor sin requerir una distribución de potencia o conductores externos de señales que necesiten penetraciones en la vasija del reactor. La implementación de la presente invención permitirá la eliminación completa de todos los sistemas actuales de medición de la distribución de la potencia del núcleo utilizados en todos los diseños de reactores de agua a presión, de reactores de agua en ebullición, reactores de metal líquido y reactores de gas a alta temperatura.

15 Resultará más rentable instalar estos conjuntos de sensores en el interior de cada conjunto de combustible o canal de combustible en el núcleo del reactor sin la necesidad de penetraciones asociadas en la vasija del reactor, aparatos asociados en el recorrido de la guía de sensores dentro de la vasija, conductores eléctricos y actividades asociadas de mantenimiento durante la recarga. Para una modificación retroactiva de este sistema de sensores, los equipos existentes pueden ser bien retirados o bien dejados en su lugar en función de los factores económicos más

20 favorables para la compañía explotadora.

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 esos detalles en vista de las enseñanzas generales de la divulgación. En consecuencia, se concibe que las realizaciones particulares divulgadas sean únicamente ilustrativas y no limitantes en cuanto al alcance de la invención, al que se le debe dar toda la amplitud de

25 las reivindicaciones adjuntas y de cualquier equivalente de las mismas.

REIVINDICACIONES

1. Un conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear que comprende:

una pluralidad de motores termoacústicos (86) soportados en una disposición separada en tándem y dimensionada para caber dentro de un manguito (68) para instrumentos en un conjunto (22) de combustible nuclear, teniendo sustancialmente cada uno de dicha pluralidad de motores termoacústicos una vaina externa (88) con una fuente autónoma (98) de calor soportada en el interior de la vaina sustancialmente en un lado del interior de la vaina, separado de una cámara (90) de resonancia en otro lado del interior de la vaina con una pila (92) de intercambio de calor que separa la fuente de calor de la cámara de resonancia, estando dimensionada la vaina para caber con holgura dentro del manguito para instrumentos para permitir que el refrigerante fluya en torno a una superficie exterior de la vaina, diseñada cada una de las cámaras de resonancia para generar una frecuencia distinta de sonido cuya amplitud es representativa de la diferencia en temperatura entre una primera ubicación en el interior de la cámara de resonancia sustancialmente en el lado de la pila de intercambio de calor y una segunda ubicación sustancialmente en el otro lado de la pila de intercambio de calor, siendo la vaina en torno a la cámara de resonancia térmicamente conductora de forma sustancial; y una pieza (110) de separación intercalada entre cada uno de un par adyacente de los motores termoacústicos (86).

2. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 1, en el que una porción de la vaina (88) que rodea la fuente autónoma de calor está aislada térmicamente (102).

3. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 1, en el que las piezas (110) de separación están configuradas para aislar térmicamente la fuente de calor de uno de un par adyacente de los motores termoacústicos (86) del segundo del par de motores termoacústicos.

4. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 1, en el que la fuente autónoma (98) de calor de al menos algunos de la pluralidad de motores termoacústicos (86) está soportada en una porción de un extremo inferior de la vaina (88).

5. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 1, que incluye un sistema (106) de telemetría acústica para recibir el sonido generado por sustancialmente cada uno de la pluralidad de motores termoacústicos (86), en una ubicación remota.

6. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 1, en el que la disposición separada en tándem de la pluralidad de motores termoacústicos (86) abarca sustancialmente una altura del manguito (68) para instrumentos del conjunto de combustible nuclear.

7. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 6, en el que la disposición en tándem de la pluralidad de motores termoacústicos (86) comprende siete motores termoacústicos.

8. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 1, en el que la fuente autónoma (98) de calor comprende material físil.

9. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 1, en el que la fuente autónoma (98) de calor está formada de un material con propensión a convertir la radiación gamma de fisión en calor.

10. El conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear de la Reivindicación 9, en el que la fuente autónoma (98) de calor comprende tungsteno.

11. Un sistema de generación de potencia nuclear que comprende:

un reactor nuclear (10) que tiene un núcleo (14); una pluralidad de conjuntos (22) de combustible nuclear soportados en el núcleo (14), teniendo al menos algunos de los conjuntos de combustible un manguito (68) para instrumentos que abarca una altura del conjunto correspondiente de combustible; un conjunto (108) de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear colocado en al menos algunos de los manguitos (68) para instrumentos, comprendiendo el conjunto de medición termoacústica de la distribución de potencia nuclear:

una pluralidad de motores termoacústicos (86) soportados en una disposición separada en tándem y dimensionada para caber en un manguito (68) para instrumentos en un conjunto (22) de combustible nuclear, teniendo sustancialmente cada uno de dicha pluralidad de motores termoacústicos una vaina externa (88) con una fuente autónoma (98) de calor soportada en el interior de la vaina sustancialmente en un lado del interior de la vaina, separada de una cámara (90) de resonancia en otro lado del interior

de la vaina con una pila (92) de intercambio de calor que separa la fuente de calor de la cámara de resonancia, estando dimensionada la vaina para caber con holgura en el interior del manguito para instrumentos para permitir que el refrigerante fluya en torno a una superficie exterior de la vaina, estando diseñada cada una de las cámaras de resonancia para generar una frecuencia distinta de sonido cuya amplitud es representativa de la diferencia en temperatura entre una primera ubicación en el interior de la cámara de resonancia sustancialmente en un lado de la pila de intercambio de calor y una segunda ubicación sustancialmente en el otro lado de la pila de intercambio de calor, siendo la vaina en torno la cámara de resonancia térmicamente conductora de manera sustancial; y una pieza (110) de separación intercalada entre cada uno de un par adyacente de los motores termoacústicos (86).

12. El sistema de generación de potencia nuclear de la Reivindicación 11, en el que una porción de la vaina (88) que rodea la fuente autónoma de calor está aislada térmicamente (102).

13. El sistema de generación de potencia nuclear de la Reivindicación 11, en el que las piezas (110) de separación están configuradas para aislar térmicamente la fuente de calor de uno de un par adyacente de los motores termoacústicos (86) del segundo del par de motores termoacústicos.

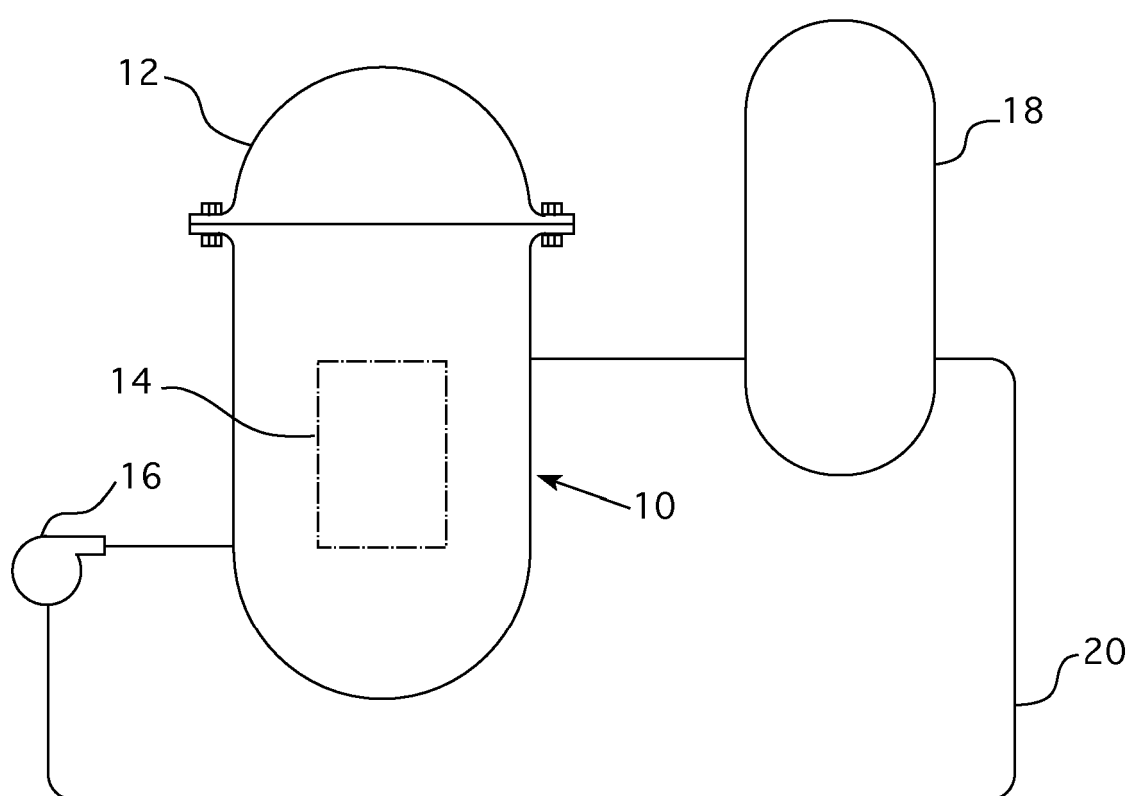


FIG. 1 Técnica anterior

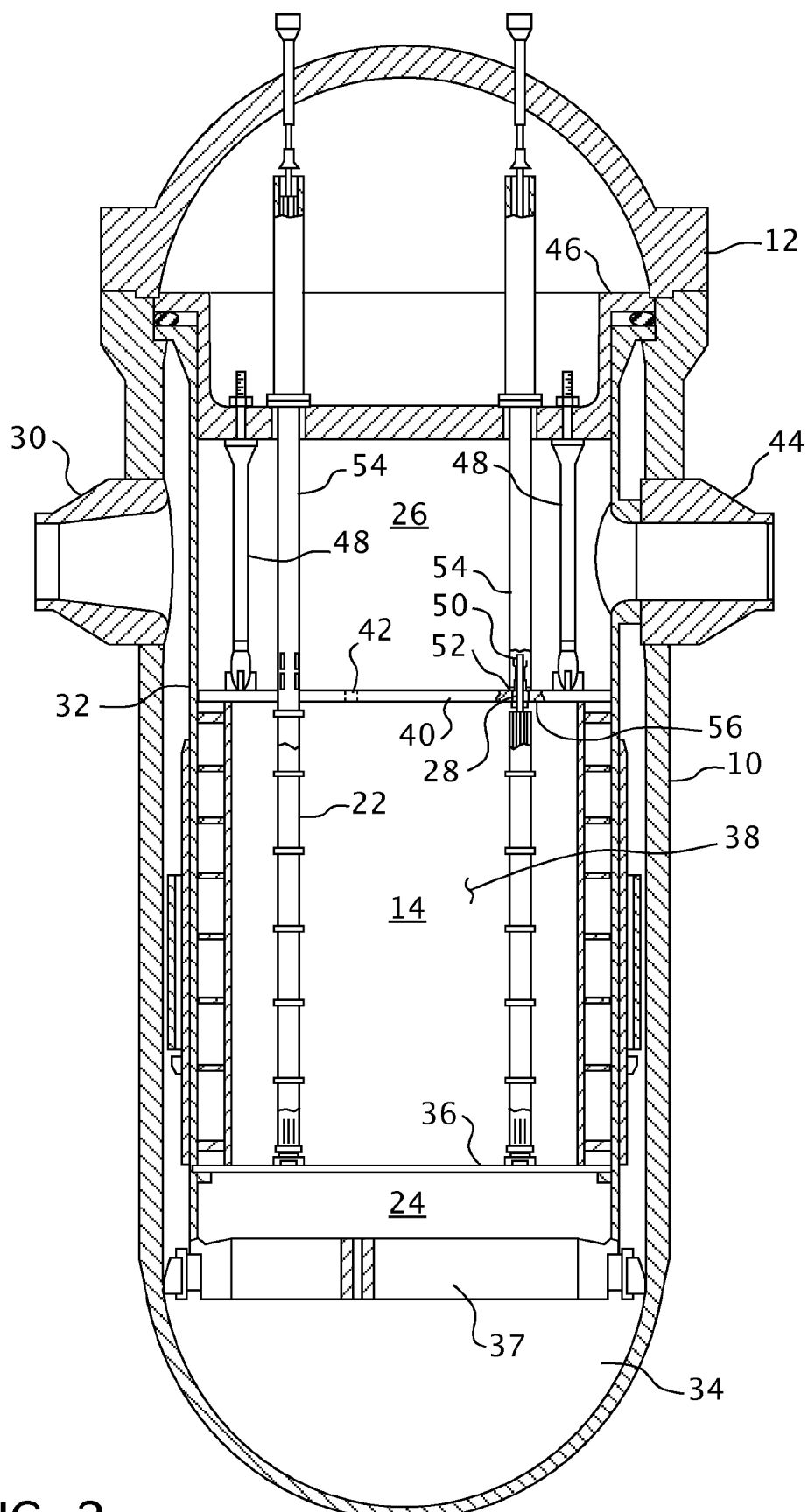


FIG. 2 Técnica anterior

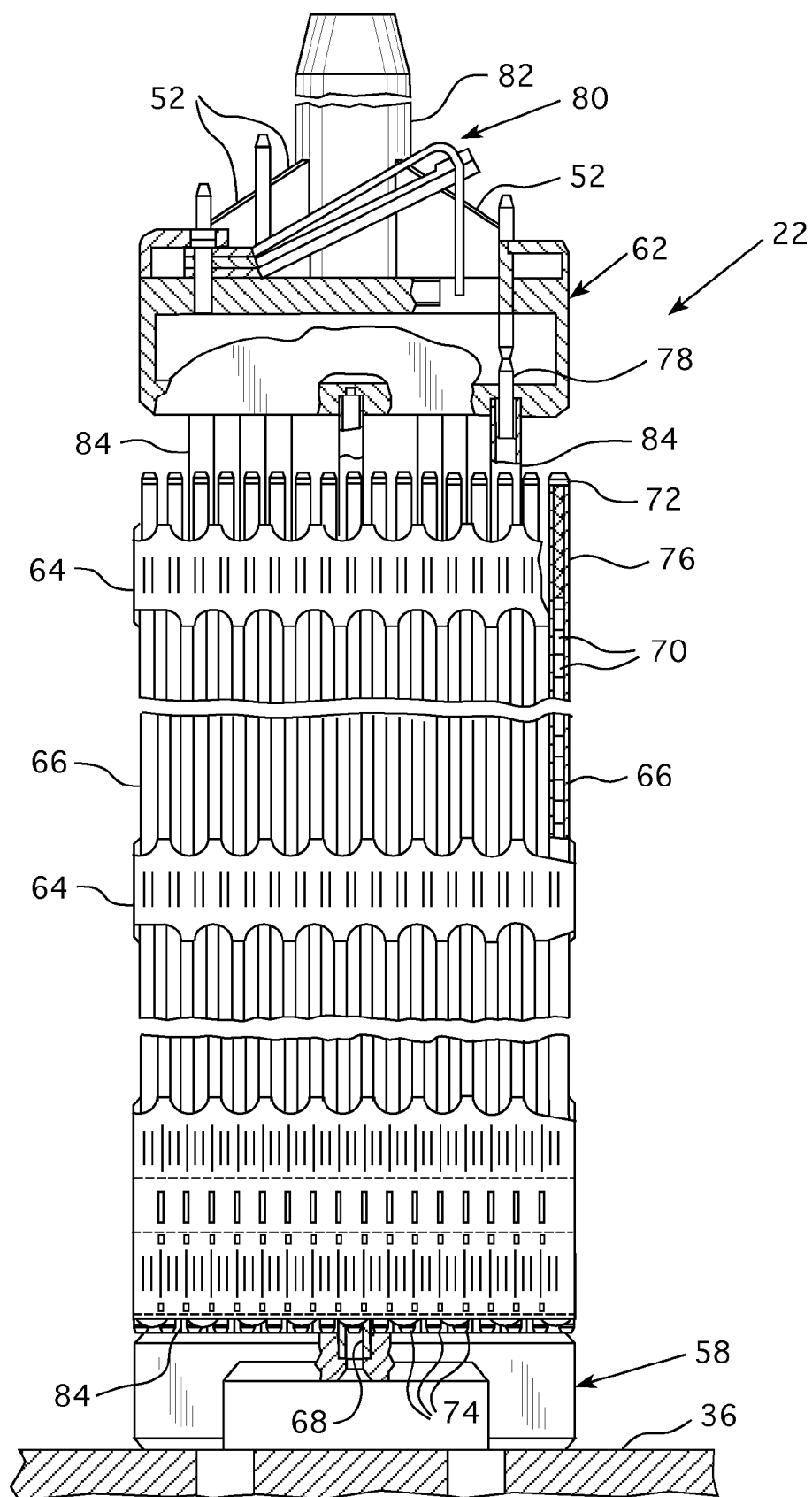


FIG. 3 Técnica anterior

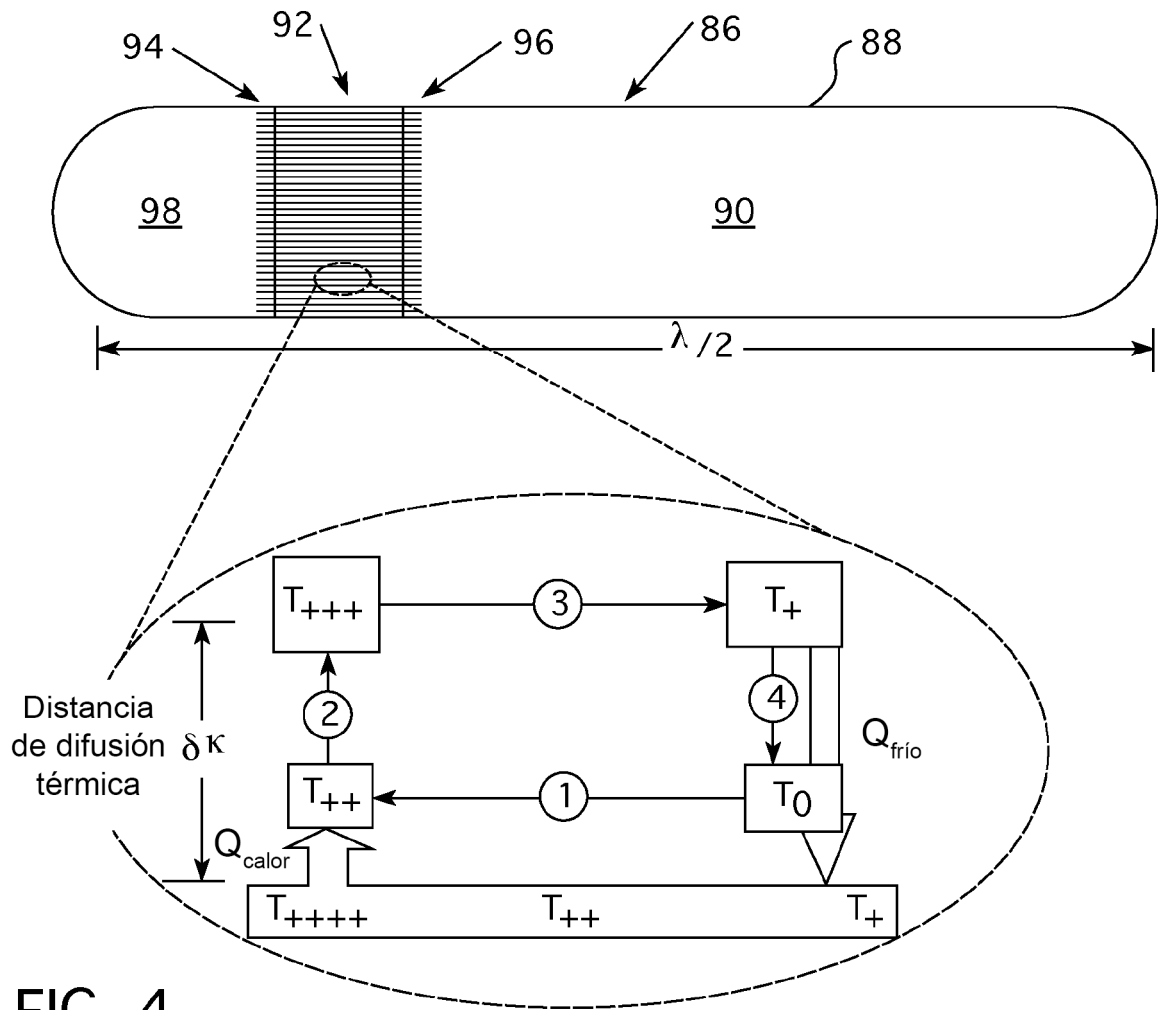


FIG. 4

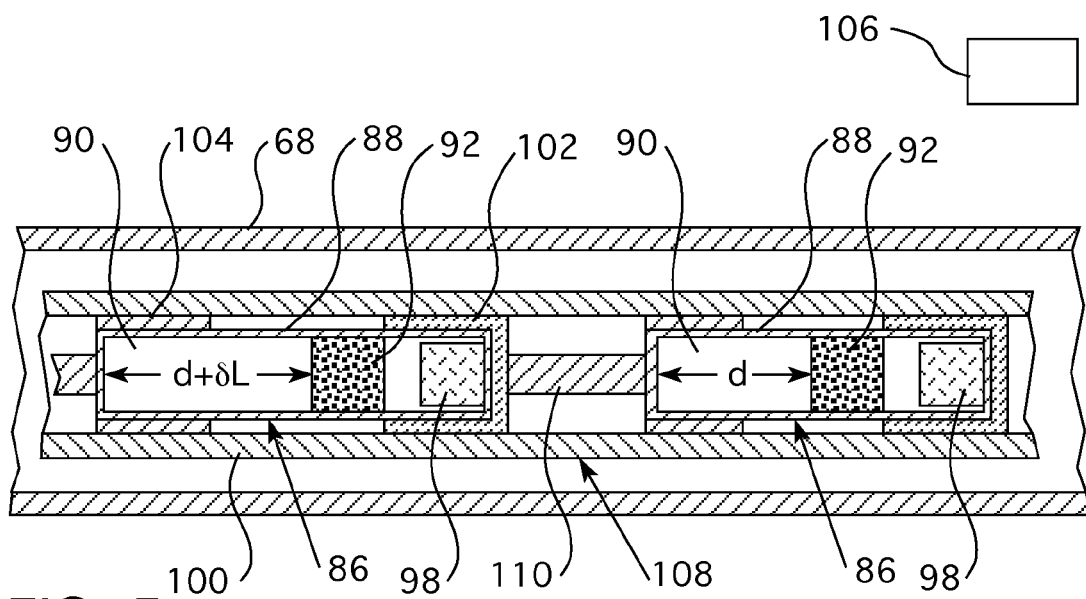


FIG. 5