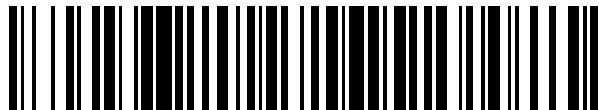


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 645 140**

51 Int. Cl.:

G21C 1/03 (2006.01)

G21C 1/22 (2006.01)

G21C 3/24 (2006.01)

G21C 3/54 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.02.2014 PCT/GB2014/050481**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.08.2014 WO14128457**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.02.2014 E 14709360 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.08.2017 EP 2959487**

54 Título: **Reactor de fisión de sal fundida práctico**

30 Prioridad:

25.02.2013 GB 201303279

09.07.2013 GB 201312281

18.10.2013 GB 201318470

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

04.12.2017

73 Titular/es:

SCOTT, IAN RICHARD (100.0%)

Lambourne House Lower Binton

Stratford on Avon, Warwickshire CV37 9TQ, GB

72 Inventor/es:

SCOTT, IAN RICHARD

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 645 140 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Reactor de fisión de sal fundida práctico

5 **Campo de la invención**

La invención se refiere a un reactor de fisión de sal fundida. En particular, la invención se refiere a un reactor de tipo piscina con un núcleo de sal fundida.

10 **Antecedentes**

Los reactores nucleares de sal fundida se basan en una masa crítica de un material fisionable disuelto en una sal fundida. Esto se conoce comúnmente como sal de combustible. Fueron pioneros en el Laboratorio Nacional Oak Ridge en los años 1950 a 1970, pero nunca han sido comercializadas con éxito. Tienen varias ventajas potenciales con respecto a otros tipos de reactores que incluyen la capacidad de producir ^{233}U fisionable a partir del torio, la producción mucho más baja de residuos de actínidos transuránicos que los reactores de uranio/plutonio, el funcionamiento a altas temperaturas, el evitar la acumulación de productos volátiles de fisión radiactiva en barras de combustible sólido y una combustión mucho más alta de material fisionable de lo que es posible en reactores convencionales.

Dos factores principales han impedido la comercialización de este tipo de reactores.

Muchos de los diseños de reactores de sales fundidas requieren plantas de reprocesamiento adjuntas para eliminar los productos de fisión continuamente de la sal de combustible. Esto es necesario ya que los productos de fisión actúan como venenos de neutrones, especialmente en reactores moderados basados en un espectro de neutrones térmicos. También es necesario eliminar los productos de fisión insolubles que, de otro modo, podrían dañar las bombas y los intercambiadores de calor. Tal planta de reprocesamiento es compleja, costosa y requiere un trabajo de desarrollo extenso.

En segundo lugar, las sales fundidas son altamente corrosivas. Mientras que las superaleaciones basadas en níquel son más resistentes a esta corrosión que los aceros estándar, a lo largo de largos períodos de tiempo la corrosión todavía se produciría. Por lo tanto, el diseño y la fabricación de componentes esenciales, como bombas e intercambiadores de calor, representan un importante reto para el desarrollo. En principio, los nuevos materiales compuestos a base de carbono y/o carburo de silicio tienen la resistencia química para soportar la sal fundida, pero la construcción de estructuras complejas tales como bombas e intercambiadores de calor eficientes a partir de tales materiales sigue siendo muy difícil.

Recientemente, Mattieu y Lecarpentier (Nuclear Science and Engineering: 161, 78-89 (2009)) demostró que un reactor de sal fundida no moderada podría funcionar durante una década o más sin reprocesamiento. Su diseño todavía sin embargo implicaba bombas e intercambiadores de calor y podría ser construido solamente después de la investigación y el importante desarrollo de materiales para tales componentes.

Un factor crítico en cualquier reactor alimentado a sal fundida es la extracción del calor producido por la fisión nuclear de la sal de combustible. Se han propuesto muchas maneras de lograrlo, y Taube (1978) (EIR Bericht n.º 332, "Fast reactors using molten chloride salts as fuel") ofrece un resumen particularmente bueno. Los métodos descritos son:

- El bombeo de un refrigerante fundido tal como plomo, mercurio o una sal volátil en la sal de combustible de manera que el refrigerante se mezcla y extrae el calor de la sal de combustible
- El bombeo de la sal de combustible a través de un intercambiador de calor externo
- El bombeo de una segunda sal fundida u otro refrigerante a través de tuberías que pasan a través de la sal de combustible con la sal de combustible que se bombea a la fuerza en un patrón de circulación alrededor de las tuberías de refrigerante

Todos estos diseños propuestos, que no sea el primero, requieren de bombeo de la sal fundida de alguna manera. El primer diseño, el contacto directo entre la sal de combustible y el refrigerante, ha sido ampliamente investigado y se considera poco práctico por una serie de razones, incluyendo que la sal de combustible queda atrapada en el líquido refrigerante.

Un diseño adicional de reactor de sal fundida fue propuesta por Romie y Kinyon (ORNL CF 58-2-46, 1958), donde se dejó circular la sal de combustible fundido a través de un intercambiador de calor por convección natural. Sin embargo, este diseño permitió solamente una salida de baja potencia y requirió un alto volumen de sal de combustible fuera del área crítica del núcleo. Grandes volúmenes de sal de combustible fuera del núcleo dan como resultado que la mayoría de los neutrones retardados se emiten fuera del área crítica del núcleo. La baja fracción de neutrones retardados resultante en el área crítica del núcleo hace que sea inestable y susceptible de sufrir un aumento rápido e incontrolable en el nivel de potencia que conduce a la destrucción explosiva del reactor.

Una característica común de muchos diseños de reactores de sales fundidas no convencionales es colocar el material combustible pasivamente en tubos, alrededor de los cuales circula el líquido de refrigeración, por lo general por bombeo, pero a veces solo por convección natural. El combustible en los tubos puede ser un sólido, como en la presente generación de reactores de agua presurizada, una pasta de material sólido en sodio fundido (GB 1.034.870), un metal (US 3.251.745) o una solución acuosa (US 3.085.966). Un conjunto como tal usando combustible de sal fundida fue considerada por el experimento del reactor de avión ("The Aircraft Reactor Experiment-Design and Construction", E. S. Bettis et al., Nuclear Science and Engineering 2, 804, 1957). Sin embargo, los investigadores concluyeron que requerirían tubos de combustible con un diámetro muy pequeño (del orden de 2 mm) para evitar el sobrecalentamiento de la sal de combustible debido a la baja conductividad térmica de la sal de combustible. Como resultado, el proyecto adoptó un sistema de bombeo de la sal de combustible rápidamente a través de intercambiadores de calor de manera que el flujo turbulento resultante permitió una transferencia de calor efectiva desde la sal de combustible a las paredes de los tubos mucho más grandes. Desde entonces, todos los diseños de reactores de sal fundida, incluyendo el Experimento de Reactor de Sal Fundido que realmente fue construido y operado (ORNL 5011 "Molten Salt Reactor Program", Informe Semestral de Avance, agosto de 1974) han usado un sistema similar de sal de combustible bombeado. Un reactor que utiliza pasta fisionable como combustible se describe mediante el documento DE1439107.

Sumario

No se ha hecho una propuesta efectiva para construir un reactor de este tipo con la sal de combustible fundida en tubos donde la sal de combustible no se bombea activamente a través de los tubos. En gran parte, esto se debe a la creencia de que la baja conductividad térmica de las sales fundidas no permitiría una transferencia de calor suficientemente rápida desde la sal a la pared del tubo sin la mezcla turbulenta forzada que permite el bombeo. Como se discutió anteriormente, la eliminación de bombas para la sal de combustible reduciría en gran medida el desafío de materiales en la construcción de un reactor de sal fundida práctico.

Según un aspecto de la presente invención, se proporciona un reactor de fisión nuclear que comprende un núcleo, una piscina de líquido refrigerante, y un intercambiador de calor para extraer calor del líquido refrigerante. El núcleo comprende una serie de tubos de combustible huecos, cada uno de los cuales contiene sal fundida de al menos un isótopo fisionable. El conjunto de tubos de combustible está al menos parcialmente sumergido en la piscina de líquido refrigerante. El conjunto de tubos de combustible comprende una región crítica, donde la densidad de los isótopos fisionables durante el funcionamiento del reactor es suficiente para provocar una redacción de fisión autónoma. El reactor está dispuesto de tal manera que la transferencia de calor desde la sal fundida en cada tubo de combustible al exterior de dicho tubo se consigue por una o más de la convección natural de la sal fundida, agitación mecánica de la sal fundida, flujo de sal de combustible oscilante dentro del tubo de combustible y la ebullición de la sal fundida dentro del tubo de combustible. La sal fundida de isótopos fisionables está contenida enteramente dentro de los tubos durante el funcionamiento del reactor.

Así, el calor puede ser transferido desde el interior hasta el exterior de los tubos de combustible no bombeado sin depender exclusivamente de la conductividad térmica de la sal fundida, y esto a su vez permite la provisión de tubos de un diámetro útil. En particular, se puede elegir que el diámetro del tubo sea suficientemente grande para optimizar la convección natural dentro del tubo.

De acuerdo con un aspecto adicional de la presente invención, se proporciona un reactor de fisión nuclear que comprende un núcleo, una piscina de líquido refrigerante, y un intercambiador de calor. El núcleo comprende una serie de tubos huecos que contienen sales fundidas de isótopos fisionables. El conjunto de tubos está al menos parcialmente sumergido en la piscina de líquido refrigerante. El conjunto de tubos comprende una región crítica, donde la densidad de los isótopos fisionables durante el funcionamiento del reactor es suficiente para provocar una reacción de fisión autosostenida. El líquido refrigerante contiene una proporción suficiente de un material absorbente de neutrones para proteger sustancialmente un depósito contenedor del líquido de los neutrones emitidos por el núcleo y el líquido refrigerante contiene un isótopo fértil de tal manera que el reactor actúa como un reactor de cría. Dicho material absorbente de neutrones es opcionalmente un isótopo fértil tal como ^{232}Th o ^{238}U de manera que el reactor actúa como un reactor de cría.

De acuerdo con un aspecto adicional de la presente invención, se proporciona un reactor de fisión nuclear que comprende un núcleo, una piscina de líquido refrigerante, y un intercambiador de calor. El núcleo comprende una serie de tubos huecos que contienen sales fundidas de isótopos fisionables. El conjunto de tubos está al menos parcialmente sumergido en la piscina de líquido refrigerante. El conjunto de tubos comprende una región crítica, donde la densidad de los isótopos fisionables durante el funcionamiento del reactor es suficiente para provocar una reacción de fisión autosostenida. El líquido refrigerante es una sal metálica fundida contenida dentro de un único depósito, y la circulación del líquido refrigerante es impulsada únicamente por convección natural.

De acuerdo con un aspecto adicional de la presente invención, se proporciona un reactor de fisión nuclear que comprende un núcleo, una piscina de líquido refrigerante, y un intercambiador de calor. El núcleo comprende una serie de tubos huecos que contienen sales fundidas de isótopos fisionables. El conjunto de tubos está al menos parcialmente sumergido en la piscina de líquido refrigerante que contiene uno o más isótopos fértiles. El conjunto de

tubos comprende una región crítica, donde la densidad de los isótopos fisionables durante el funcionamiento del reactor es suficiente para provocar una reacción de fisión autosostenida. El reactor comprende además una capa de metal fundido en contacto con el líquido refrigerante, siendo el metal fundido tal que el isótopo fisionable criado es soluble en el metal fundido y el reactor comprende un sistema para extraer el metal fundido.

5 De acuerdo con un aspecto adicional de la presente invención, se proporciona un método de funcionamiento de un reactor de fisión nuclear. El reactor comprende un núcleo, una piscina de líquido refrigerante y un intercambiador de calor, donde el núcleo comprende una serie de tubos de combustible hueco, cada uno de los cuales contiene la sal fundida de uno o más isótopos fisionables, el conjunto de tubos de combustible estando al menos parcialmente sumergido en la piscina de líquido refrigerante y que comprende una región crítica, donde la densidad de los isótopos fisionables durante el funcionamiento del reactor es suficiente para provocar una reacción de fisión autosostenida. El método consiste en contener la sal fundida enteramente dentro de los tubos de combustible y transferir calor de la sal fundida en cada tubo de combustible al exterior de dicho tubo y, por lo tanto, al refrigerante utilizando uno o más de: convección natural de la sal fundida, agitación mecánica de la sal fundida, flujo de sal fundido oscilante dentro del tubo de combustible, ebullición de la sal fundida dentro del tubo de combustible. El calor se extrae del refrigerante usando el intercambiador de calor.

Otros aspectos y características preferidas se exponen en la reivindicación 2 y siguientes.

20 Descripción de los dibujos

Algunas realizaciones preferidas de la invención se describirán ahora a modo de ejemplo solamente y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 25 La figura 1 es un diagrama de un reactor de sal fundida;
 La figura 2 es un diagrama de un tubo de combustible del reactor de la figura 1;
 La figura 3 muestra los resultados de los cálculos de ordenador de la dinámica de fluidos de temperaturas máximas de sal de combustible en tubos de combustible verticales de 2 m de altura de diámetros internos variables;
 30 La figura 4 muestra un tubo de combustible con deflectores perforados que dividen el tubo en segmentos;
 La figura 5 muestra un tubo de combustible con un tubo de sección transversal circular u ovalado dispuesto en una hélice poco profunda;
 La figura 6 muestra un tubo de combustible con deflectores accionados mecánicamente dentro del tubo de combustible;
 35 La figura 7 muestra un tubo de combustible en forma de un tubo en U con deflectores internos;
 La figura 8 muestra un tubo de combustible corrugado que demuestra el efecto de ondulación en la reducción de la temperatura de la sal de combustible cuando se compara con un tubo de pared recta: cada tubo es del mismo diámetro máximo y la producción de calor de fisión por ml es constante;
 La figura 9 muestra el punto de fusión de soluciones de NaCl, UCl₃ y PuCl₃; y;
 40 La figura 10 muestra la expansión térmica de mezclas de UCl₃ en comparación con la de otras sales fundidas incluyendo NaCl puro y UCl₄ puro (datos de G.J. Janz, Journal of Physical and Chemical Reference Data, vol. 17, supl. 2, 1988).

Descripción detallada

45 El núcleo nuclear refrigerado por convección

Un reactor puede estar construido de un núcleo nuclear utilizando un conjunto de tubos de combustible inmersos en una piscina de refrigerante fundido como se muestra en la figura 1. La figura 1 muestra un reactor 100 que comprende un depósito de refrigerante 101, un núcleo compuesto por un conjunto de tubos de combustible 102 y un intercambiador de calor (por ejemplo, tubos de vapor) 103. El refrigerante puede ser una amplia variedad de líquidos incluyendo agua, metales fundidos y sales fundidas. Los tubos pueden tener cualquier forma adecuada, pero en una realización tienen un diseño por el que tienen una región de diámetro grande 201 en la parte inferior y una región estrecha 202 hacia la parte superior (véase la figura 2). El resultado es que la parte inferior del conjunto alcanza la masa crítica mientras que la parte superior permanece subcrítica. Los tubos 102 pueden llenarse con sal de combustible fundido que contiene isótopos fisionables hasta la parte superior de la región estrecha 202, o pueden llenarse solo dentro de toda o parte de la región ancha 201. Si se llena la zona estrecha 202, entonces esto evita que los neutrones escapen pasando a través del espacio vacío dentro del tubo de combustible. Si la región estrecha no está llena de sal, entonces la región estrecha puede formarse en forma de espiral, hélice u otra forma no lineal para presentar neutrones que pasan directamente por el tubo y fuera del reactor. Los tubos están dispuestos en un conjunto que puede ser de cualquier dimensión y forma, aunque un conjunto cilíndrico tenga ciertas ventajas. La potencia de salida de diseño del reactor se puede ajustar variando el número de tubos de combustible en el conjunto.

65 El calor se puede extraer del conjunto de tubos por flujo convectivo del refrigerante (por ejemplo, una sal de manto). La parte superior estrecha 202 de los tubos permite el flujo lateral de la sal de manto calentada fuera del conjunto de

tubos con menos restricción de lo que sería el caso con tubos de combustible de diámetro uniforme. Además, la región subcrítica aumenta la distancia entre la región crítica del núcleo y la parte superior del depósito, permitiendo un blindaje de neutrones más eficaz. El calor se elimina de la sal de manto a través de un intercambiador de calor 103 tal como un conjunto de tubos de caldera sumergidos en la sal de manto, alrededor de la periferia del reactor. El refrigerante para el intercambiador de calor podría ser, por ejemplo, agua/vapor, que puede pasar directamente a las turbinas, un gas que se pasa directamente a una turbina cerrada de ciclo de Brayton, o un metal fundido o una sal de metal que se pasa a un generador de vapor para generar vapor para su uso en turbinas. Alternativamente, la sal de manto caliente puede ser bombeada fuera del reactor para su uso en otros procesos dependientes del calor y luego devuelta al depósito de reactor.

Ni la sal de combustible ni la sal de manto requieren bombas. Esta ventaja elimina lo que quizás sea el principal obstáculo técnico que ha impedido el desarrollo del reactor de sal fundida. Sin embargo, la aceleración del flujo conectivo natural del manto a través del conjunto de tubos de combustible mediante turbinas u otros sistemas de bombeo puede ser deseable para aumentar la potencia de salida del reactor. El flujo conectivo natural también se puede aumentar aumentando la profundidad del depósito.

Con el fin de lograr una tasa de convección adecuada dentro de la sal de manto, es necesario que haya una diferencia de temperatura sustancial entre la sal de combustible y la sal de manto. Esto incluye el principal inconveniente implícito en este diseño del reactor: simplicidad y baratura frente a la reducción de la eficiencia termodinámica. Sin embargo, dado que los costes de combustible de los reactores nucleares son esencialmente triviales, la reducción del coste de la construcción es mucho más importante para la economía del reactor que la eficiencia termodinámica; de hecho, la eficiencia termodinámica solo importa realmente en tales reactores hasta el punto de que se distribuye el coste de capital sobre más kW de capacidad.

La transferencia de calor de las sales de combustible a la pared del tubo puede conseguirse por conducción térmica y por convección, sin bombeo de las propias sales. La convección puede ser asistida de varias maneras, descritas adicionalmente a continuación.

Las dimensiones de los tubos de combustible se seleccionan para permitir la rápida convección natural de la sal de combustible a la temperatura de funcionamiento. Esto mejora el flujo de la sal desde el centro del tubo hasta la periferia, permitiendo que los tubos se enfríen por convección natural y por conducción solamente. En general, los tubos de menor diámetro permitirán una refrigeración más rápida de la sal de combustible. Sin embargo, esto no se aplica cuando el diámetro del tubo llega a ser suficientemente pequeño como para inhibir la convección del fluido. Para una sal fundida con una densidad de $4837-1,9537 T \text{ kg/m}^3$ un calor específico de $418 + 0,136 T \text{ J/kg.K}$, una viscosidad de $0,0259-0,00198 T \text{ kg/seg.m}$ donde T es la temperatura en grados Kelvin y una conductividad térmica de $0,81 \text{ w/mK}$, la convección no ocurre para diámetros de tubo por debajo de 5 mm. Es probable que otras sales fundidas tengan diámetros de convección mínimos de un orden similar, por lo que deberían usarse tubos con un diámetro de al menos 5 mm.

Otro factor que limita el diámetro de los tubos de combustible es el espesor de las paredes del tubo, y el efecto sobre la criticidad y la neutrónica del reactor. En un reactor de neutrones rápidos no moderado, la criticidad depende en gran medida del logro de una cierta concentración media de isótopos fisionables dentro de la región central. El espacio entre tubos no puede reducirse arbitrariamente a medida que se reduce el diámetro del tubo, ya que los espacios de menos de 5 mm dan como resultado una resistencia que aumenta rápidamente al flujo del refrigerante. Tampoco se puede reducir arbitrariamente el grosor de la pared en proporción al diámetro del tubo, ya que las paredes muy delgadas se perforarían fácilmente. Para un tubo de diámetro externo d (mm), un espesor de pared de 0,5 mm y una distancia mínima entre tubos de 5 mm, la fracción del volumen de núcleo total ocupado por la sal de combustible disminuye de 70 % para un diámetro de tubo de 46 mm (d) a 10 % para un diámetro de tubo de 4 mm. De este modo, un núcleo de reactor que comprende tubo de 4 mm necesitaría una sal de combustible que contenga una concentración siete veces mayor de material fisionable, que bien puede no ser obtenible. Además, todos los materiales absorben neutrones hasta cierto punto. Cuanto mayor sea la cantidad de material de pared dentro del núcleo del reactor, mayor será esta pérdida parasitaria de neutrones. Las mayores pérdidas parasitarias significan que se requieren concentraciones todavía más altas de material fisionable para lograr una masa crítica. Diámetros de tubo pequeños dan como resultado una mayor concentración de material de pared de tubo dentro de la región de núcleo. De este modo, tubos de combustible de menor diámetro resultan nuevamente en una mayor concentración de isótopos fisionables que se necesitan.

Los tubos de combustible pueden incorporar aletas en su superficie exterior con el fin de aumentar el área disponible para la transferencia de calor al refrigerante. La ondulación o formación de rebordes de la pared del tubo de combustible mejora de manera similar la transferencia de calor a la sal de refrigerante. La forma de las aletas, corrugación o estriado se puede elegir para aumentar la transferencia de calor dentro de la sal de combustible debido a la convección.

La mezcla conectiva de la sal de combustible dentro de la amplia región del tubo de combustible puede permitir niveles reales de transferencia de calor de la sal de combustible. Las diferencias de temperatura entre la sal de combustible en contacto con la pared del tubo de combustible y la del centro del tubo de combustible podrían ser de

500 °C o más sin riesgo de ebullición de la sal de combustible, lo que correspondería a una diferencia de densidad de aproximadamente 25 % para muchas composiciones de sal que permitan una convección significativa. Las sales fundidas con mayor expansión térmica pueden ser elegidas para permitir una convección más rápida. De forma similar, se pueden elegir sales fundidas con baja viscosidad para permitir una convección más rápida.

La transferencia de calor también podría ser mejorada por estriado de la pared interior del tubo de combustible o la adición de deflectores para desviar flujo convectivo desde la dirección vertical a la horizontal. La relación entre la longitud y el diámetro del tubo de combustible, la rugosidad y/o la estructura de la pared interior pueden afectar la eficacia de la transferencia de calor y pueden optimizarse para cualquier configuración particular del reactor mediante métodos estándar de dinámica de fluidos computacional.

La figura 3 muestra los resultados de cálculos de dinámica de fluido computacional llevados a cabo sobre un tubo redondo de paredes lisas de diámetro variable. La sal fundida tenía una densidad de $4837-1,9537 \text{ T kg/m}^3$, un calor específico de $418 + 0,136 \text{ T J/kg.K}$, una viscosidad de $0,0259-0,00198 \text{ T kg/seg.m}$ donde T es la temperatura en grados Kelvin y una conductividad térmica de $0,81 \text{ w/m.K}$. Se dan dos simulaciones para diferentes niveles de generación de calor en la sal de combustible. Se da una simulación adicional para una sal fundida notional similar con un coeficiente de expansión térmica de cero que muestra la temperatura máxima en ausencia de refrigeración convectiva. Esto demuestra el extraordinario efecto de la convección sobre la transferencia de calor dentro de la sal de combustible y también demuestra que, para cualquier geometría particular, composición de la sal de combustible y nivel de potencia, hay un intervalo de diámetros de los tubos donde los cambios de diámetro o de potencia tienen relativamente poco efecto sobre la temperatura máxima alcanzada por la sal fundida. Los diámetros de tubo en ese intervalo tienen ventajas que son significativas en ciertas realizaciones de la invención.

La figura 4 muestra un tubo de combustible según una realización, en el que el tubo de combustible contiene unos deflectores 400, perforados en el centro, que dividen el tubo de combustible en segmentos 401 con el fin de mejorar la convección de la sal de combustible, por ejemplo, segmentos 401 con una altura sustancialmente igual a, o al menos de un orden similar al diámetro del tubo de combustible. La convección dentro del segmento lleva calor más eficientemente a la pared del tubo de combustible mientras que la perforación ayuda a llenar y vaciar el tubo de combustible y permite mezclar la sal de combustible entre segmentos diferentes.

Los tubos de combustible pueden estar dispuestos de tal manera que la región crítica de los tubos es aproximadamente horizontal. Puede ser necesaria una ligera pendiente para permitir la eliminación de gas de los productos de fisión. Al disponer el tubo de combustible horizontalmente se reduce el tamaño vertical de las células de convección, reduciendo el tiempo necesario para que la sal de combustible en el centro del tubo alcance el borde. Un ejemplo de tubo de combustible de acuerdo con esta realización se muestra en la figura 5. El tubo de combustible puede formarse en una hélice superficial 501 con una sección transversal circular 502 u oval 503. Debido a que el tubo está ligeramente inclinado, cualquier gas evolucionado se elevará hasta la parte superior de la hélice, y se puede añadir material desde la parte superior del tubo como con los tubos de combustible rectos.

El diseño del reactor permite también la ebullición limitada de la sal de combustible en el centro caliente del tubo de combustible para conducir la convección y crear la mezcla. En esta opción, sería deseable que la sal de combustible llene solamente la parte inferior del tubo de combustible dejando una parte superior construida helicoidalmente del tubo de combustible para actuar como un condensador para cualquier vapor que se escape de la sal de combustible. Esta configuración del reactor permitiría el uso de una sal de combustible que fundiera a una temperatura relativamente alta, siempre que el vapor producido a partir de esa sal de combustible fundiera a una temperatura más baja que la temperatura de trabajo del refrigerante de modo que se condensara como un líquido que volvería a la sal de combustible. La inclusión de hasta aproximadamente un 40 % de haluro de zirconio en la sal de combustible es una de varias maneras efectivas de conseguir esto.

La transferencia de calor a partir de la sal de combustible a la pared del tubo de combustible también se puede aumentar mediante el uso del sistema de columna con deflectores oscilatorio. Hay muchas configuraciones posibles de tales columnas. Los deflectores pueden diseñarse de tal manera que el movimiento de los deflectores no se vea perjudicado por la deposición de productos de fisión, por ejemplo, asegurando una separación adecuada de las superficies móviles que están sumergidas en la sal de combustible.

La figura 6 muestra una realización de una columna oscilante deflector en la que una serie de deflectores 601 se inserta en el tubo de combustible, opcionalmente en forma de una hélice o una serie de placas perforadas 602, estando los deflectores mecánicamente accionados hacia arriba y hacia abajo en una dirección vertical, por ejemplo, mediante un accionador mecánico 603. La mezcla de remolinos creada por el movimiento de los deflectores aumenta la transferencia de calor desde la sal de combustible a la pared del tubo de combustible.

Otra realización de la columna de deflectores oscilatoria es formar el tubo de combustible en un tubo en forma de U 701 con ambos extremos del tubo anclado en la tapa del depósito de reactor como se muestra en la figura 7. La presión de gas oscilante 700 se aplica a uno o ambos extremos del tubo en forma de U 701 para crear un movimiento oscilante de la sal de combustible dentro del tubo. En una realización, la frecuencia de oscilación de la sal de combustible se ajusta a la frecuencia de resonancia de su oscilación para conseguir un movimiento máximo

con una presión de gas mínima aplicada. La eficiencia con la que el movimiento oscilante de la sal de combustible se convierte en una mayor transferencia de calor a la pared del tubo de combustible se puede incrementar mediante la inclusión de deflectores de diversas formas en el tubo de combustible, ondulando la pared del tubo de combustible o por otros métodos. En contraste con los tubos convencionales de combustible bombeado, la oscilación permite que la sal de combustible se mantenga dentro del núcleo y no requiere que pase a través de una bomba o un intercambiador de calor externo.

Se apreciará que el uso de los tubos de combustible en forma de U sin flujo oscilante y con los deflectores siendo opcionales también es posible. Tales tubos tienen la ventaja de una fabricación más sencilla ya que no se requiere el cierre del extremo. Si los tubos tienen secciones más estrechas donde se unen a la tapa del reactor, aquellas secciones más estrechas pueden estar entrelazadas de una manera helicoidal para evitar el paso de neutrones por el tubo. Una región más estrecha en la parte inferior donde el tubo se curva sobre sí mismo es también ventajosa, ya que puede aumentar la fuerza y reducir la resistencia al flujo de refrigerante en el fondo del conjunto de tubos de combustible.

La ondulación de la pared exterior del tubo de combustible también mejora la transferencia de calor de la sal de combustible a la pared del tubo de combustible como se muestra en la figura 8.

El flujo de neutrones a través de cualquier núcleo del reactor es inevitablemente más alto en el centro de la región crítica de lo que es en los bordes. Una ventaja particular de este diseño de reactor es que el efecto de este flujo desigual de neutrones sobre las tasas de fisión y por lo tanto la producción de calor puede ser mitigada de varias maneras. Por ejemplo, la separación de los tubos de combustible puede ser más ancha en el centro del conjunto que en la periferia. Los tubos en la periferia también pueden contener sal de combustible con una mayor concentración de isótopos fisionables y/o fértiles. En una realización, los tubos de combustible forman un conjunto cilíndrico con un diámetro similar a la altura de la región ancha del tubo de combustible, con tubos espaciados más ampliamente en el centro del conjunto con, opcionalmente, una zona vacía en el centro del conjunto de modo que el conjunto forme un anillo.

En otra realización, la separación de los tubos de combustible es uniforme, pero tubos seleccionados hacia el centro del conjunto se dejan vacíos de material fisionable.

La economía de neutrones del reactor y la uniformidad del flujo de neutrones en la región de núcleo puede también mejorarse mediante la colocación de un reflector de neutrones alrededor del conjunto de tubos de combustible de manera que los neutrones perdidos de la región de núcleo se pueden reflejar de nuevo en ella. El reflector de neutrones se puede combinar convenientemente en una estructura que restringe el flujo del refrigerante a un circuito que incluye el intercambiador de calor y el conjunto de tubos de combustible. La misma estructura puede soportar turbinas para acelerar el flujo convectivo natural del refrigerante y puede estar dispuesta de manera que sea fácilmente reemplazada levantándola fuera del depósito de reactor como una sola unidad o un juego de segmentos formando un anillo completo alrededor del conjunto de tubos de combustible.

El reactor como el descrito anteriormente es un reactor de neutrones rápidos con moderación solo limitada de los neutrones por los núcleos relativamente pesados de las sales de combustible y de refrigerante. Las configuraciones epitérmica y térmica del reactor también son posibles mediante la incorporación de material moderador tal como grafito en el núcleo del reactor. Esto puede lograrse, por ejemplo, sustituyendo algunos tubos de combustible por tubos de grafito o construyendo un núcleo de grafito sólido perforado por canales algo más anchos que el diámetro del tubo de combustible en el que se insertan los tubos de combustible de manera que queda un hueco entre la pared del tubo de combustible y el grafito a través del cual circula la sal de refrigerante.

Materiales de Constricción y Temperaturas

El análisis que sigue de los materiales y temperaturas es solamente a modo de ejemplo, con el fin de ilustrar las consideraciones técnicas en la selección de tales materiales. Cualquier material específico descrito no debe considerarse como limitativo del alcance de las reivindicaciones adjuntas de ninguna manera.

Elección de sales fundidas

La mayoría de los diseños de reactor de sal fundida utilizan sales de litio debido a sus puntos de fusión bajos. En el reactor se describe que el litio es idealmente evitado ya que produce ^3H sustancial en la irradiación de neutrones - incluso si se usa ^7Li purificado. ^3H en las sales fundidas penetra fácilmente en los metales y por lo tanto contamina el vapor en los tubos de la caldera, con costosas consecuencias de contención e ingeniería.

Evitar el litio tiene otras ventajas. El coste de ^7Li purificado no está claro (pero seguramente será alto) y las instalaciones para la purificación isotópica de litio están sujetas a restricciones reguladoras importantes.

Un ejemplo de una sal de manto adecuada sería una mezcla eutéctica de 10 % NaF/48 % KF/42 % ZrF₄ que tiene un punto de 385 °C de fusión y operaría de manera útil a través de un rango de temperatura de 450-900 °C. Dicha

mezcla tiene una viscosidad relativamente baja, solo ligeramente superior al agua, que mejora el flujo convectivo del manto. Hay muchas otras opciones para sales de refrigerante, incluyendo el uso de sales de cloruro que tienen puntos de fusión más bajos.

- 5 Las sales de los isótopos fértiles tales como ^{238}U uranio o ^{232}Th torio también se pueden incluir en la sal de refrigerante. Un ejemplo entre muchos otros de una sal de refrigerante fértil adecuada sería una mezcla eutéctica de tetrafluoruro de torio y fluoruro sódico.

10 La sal de combustible debe ser capaz de disolver cantidades sustanciales de sales de material fisionable (por ejemplo, de uranio o plutonio). Debe ser utilizable a temperaturas significativamente mayores que la sal de refrigerante, pero si la sal de combustible ocupa la región subcrítica de los tubos de combustible, la sal de combustible debería tener un punto de fusión no sustancialmente más alto que la temperatura de trabajo de la sal de refrigerante, la sal de combustible no se congela en las partes más frías del tubo de combustible. Si la sal de combustible no ocupa la región subcrítica de los tubos de combustible, entonces preferiblemente liberará un vapor
15 que se condensa a un líquido en lugar de un sólido a la temperatura de trabajo de la sal de refrigerante.

La convección más eficaz de la sal de combustible en el tubo de combustible puede lograrse si se selecciona una sal de combustible que tiene un gran coeficiente de expansión térmica. La mayor flotabilidad conseguida por el calentamiento de tales líquidos permite utilizar tubos de combustible de mayor diámetro o menos uso de dispositivos
20 tales como corrugación, deflectores, crestas, flujo oscilante, deflectores helicoidales internos, etc. para lograr una convección adecuada.

El NaCl forma líquidos que contienen 30-35 % $\text{UCl}_3/\text{PuCl}_3$ y 60-65 % de NaCl de fusión a 450-520 °C, como se muestra en la figura 9 (temperaturas en diagrama en °K). Como tales, éstos permiten la inclusión de una amplia
25 variedad de uranio, plutonio y otros cloruros de actínidos a concentraciones bastante altas. También es posible utilizar mezclas de UCl_3 y PuCl_3 con poco o ningún NaCl añadido. Las mezclas que contienen altas concentraciones UCl_3 exhiben particularmente alta expansión térmica como se muestra en la figura 10.

También se deben considerar las interacciones nucleares de las sales. Las principales interacciones para ^{35}Cl son
30 las (n, p) productoras de ^{35}S , las (n, a) productoras de ^{32}P y las (n, γ) productoras de ^{36}Cl . Los dos primeros tienen secciones transversales moderadamente bajas para los neutrones de fisión (96 mb y 56 mb, respectivamente) y producen isótopos de corta vida que no presentan problemas significativos de eliminación. La reacción (n, γ) que produce ^{36}Cl tiene una sección transversal muy pequeña para los neutrones rápidos (1 mb), pero el producto es de larga vida y requeriría la eliminación segura o la reutilización de la sal de cloruro al final de su vida útil. El uso de la
35 sal de cloruro enriquecida isotópicamente con ^{37}Cl es una opción por la que se puede mejorar la sal de cloruro para su uso en el reactor con menos absorción de neutrones y una producción de residuos radiactivos de menor vida útil.

Las sales de fluoruro son sustancialmente más favorables desde el punto de vista de los neutrones que las sales de cloruro. Las mezclas de $\text{UF}_4/\text{NaF}/\text{KF}$ con hasta un 30 % de UF_4 tienen puntos de fusión alrededor de 550 °C, lo que
40 las hace adecuadas para combustibles que comprenden uranio natural enriquecido en 235 uranio o 233 uranio procedentes de torio

El uso de sales de fluoruro de plutonio o transuránicos mixtos de combustible gastado es, sin embargo, más difícil. El plutonio es solo estable ya que el trifluoruro y las mezclas de este con NaF son líquidos solamente por encima de
45 aproximadamente 800 °C. Incluso permitiendo una depresión de punto de fusión modesta añadiendo KF y UF_4 a la mezcla esto haría probable la congelación de la sal en la parte estrecha del tubo de combustible. La inclusión de bajas concentraciones de plutonio en una mezcla de sal de fluoruro es posible, pero conseguir una masa crítica utilizando solo plutonio como isótopo fisionable sería un desafío.

Una modificación de menor importancia para el diseño de tubo de combustible sin embargo sería hacer uso práctico de tales mezclas de sal de alta fusión. Si el tubo se llenara solo parcialmente con sal de combustible, llenando
50 solamente la mayor parte de la parte ancha, se esperaría que la mezcla convectiva y la producción continua de calor de fisión en la sal de combustible impidieran la congelación de la sal de combustible. En este conjunto, sería deseable ajustar la composición de la sal de combustible de manera que cualquier vapor producido se condense a un líquido, en lugar de un sólido, en la parte superior del tubo. Esto podría conseguirse convenientemente mediante
55 la inclusión de aproximadamente 20 % ZrF_4 en la sal de combustible, aunque existen muchas otras opciones incluyendo la incorporación de concentraciones bajas de sales de cloruro.

La fisión puede provocar una liberación neta de halógeno de las sales combustibles fisionables, con los productos de fisión neutralizando solamente parte del halógeno liberado. Dejado solo, el halógeno acumulado atacará la mayoría
60 de los materiales del tubo de combustible y resultará en la volatilización de otros productos de fisión halógena como el yodo.

Dos maneras principales pueden ser usadas para neutralizar el exceso de halógeno. En primer lugar, es utilizar como sal de combustible los tricloruros o trifluoruros de los isótopos fisionables y fértiles. El trihaluro de uranio reaccionará con el exceso de haluro para producir tetrahaluro de uranio que es compatible con la mayoría de los
65

materiales de los tubos de combustible. En segundo lugar, se incluyen pequeñas cantidades de metal de reactividad intermedia con halógenos (intermedio entre los actínidos y el material del tubo de combustible) en el tubo o sal de combustible que reaccionará con el exceso de halógeno sin ser tan reactivo como para reducir los haluros fisionables o fértiles a su forma metálica. Los metales adecuados incluyen niobio, titanio y níquel, que podrían incorporarse como partículas sólidas en la sal de combustible o como recubrimiento en la pared interior del tubo de combustible o como constituyentes de estructuras deflectoras insertadas en los tubos de combustible.

Material del tubo de combustible

El tubo de combustible representa el principal desafío de materiales para el reactor. Debe ser resistente a la corrosión por las sales de combustible y de manto y debe tolerar el alto flujo de neutrones existente en el núcleo.

El material no tiene, sin embargo, que sobrevivir durante la vida útil del reactor. Los tubos de combustible se eliminan fácilmente y se sustituyen y probablemente tendrían que sustituirse al menos cada 20 años para el reprocesamiento del combustible. El desafío de los materiales es por lo tanto sustancialmente menos severo de lo que sería el caso para un componente de reactor permanente.

Hay una serie de materiales avanzados tales como materiales compuestos de metal y SiC_f/materiales compuestos de SiC que podrían tener excelentes propiedades para los tubos de combustible, pero todos estos son tecnológicamente inmaduros. El uso de tales materiales retrasaría el proceso de desarrollo del reactor, pero podría ser adecuado para futuras implementaciones.

Dos tecnologías maduras que podrían ser consideradas son C_f/materiales compuestos C y metales refractarios, por ejemplo, níquel o molibdeno, y sus aleaciones.

Los materiales compuestos C_f/C tienen una excelente resistencia química a las sales fundidas, aunque a temperaturas muy altas UCl₃ pueden reaccionar con el carbono para producir carburos. Están sin embargo sujetos a la pérdida severa de la fuerza en las dosis de neutrones altas y por lo tanto necesitarían substituir regularmente - quizás cada 2-4 años. Sin embargo, el coste de este reemplazo programado puede ser compensado por la transparencia del neutrón superior en comparación con otras opciones de tubos de combustible. Los tubos de combustible a base de carbono son especialmente atractivos cuando se incluyen isótopos fértiles en la sal de refrigerante, ya que permiten una menor captura parasitaria de neutrones por el material del tubo de combustible y, por lo tanto, una mejor reproducción de isótopos fisionables. En un reactor de este tipo es probable que sea aceptable una vida más corta del tubo de combustible, ya que sería también deseable un reprocesamiento más frecuente de la sal de combustible.

Al considerar los metales para los tubos de combustible dos factores dominan la elección - resistencia a la corrosión y la fuerza física a temperaturas altas. Es útil considerar los requisitos de resistencia física en un pequeño detalle ya que los requisitos son mucho menos estrictos de lo que normalmente se considera para el uso estructural de un metal.

Una de las características de los tubos de combustible es que experimentan esfuerzo mecánico mínimo. Los tubos cuelgan de los accesorios de la abrazadera en la tapa del reactor con la mayor parte del peso del tubo soportada por la sal de manto, que también lo aísla eficazmente de los choques. No se espera que el flujo lateral de la sal de manto en la región delgada de los tubos exceda de 1 m/s, lo que ejercería solo una baja fuerza lateral sobre los tubos. La fuerza lateral que aplicó la sal de manto móvil resultaría en gran medida en un momento de flexión en el que el tubo está anclado a la tapa del reactor. En esa ubicación el metal es más fresco y protegido del flujo de neutrones, lo que mejora considerablemente su resistencia física y longevidad. Finalmente, los tubos no tienen que soportar ninguna diferencia de presión y la superficie externa de los tubos se enfriará por debajo de aproximadamente 700 °C mediante la sal de manto, minimizando de ese modo el ablandamiento térmico total del metal.

Estos requisitos físicos muy modestos pueden hacer la selección de aleación relativamente no desafiante. Hay una literatura sustancial sobre las aleaciones de níquel y molibdeno, pero los requisitos de resistencia mínima de los tubos de combustible podrían incluso hacer uso de los metales puros práctico. La elección del metal puede ser dictada por la temperatura máxima de la sal del combustible a la que podrían estar expuestos. Se requieren cálculos detallados de flujos térmicos y fluidos dentro de la sal de combustible para determinar cuáles serán probablemente las temperaturas máximas. Las aleaciones de molibdeno pueden utilizarse hasta 1500 °C, lo cual está muy por encima de cualquier temperatura esperada de la sal de combustible.

El control de la corrosión es importante. La química de la sal de manto sería esencialmente constante y podría ajustarse fácilmente al estado redox óptimo para maximizar la vida de la aleación. Una manera sencilla de hacerlo sería incluir muestras de circonio metálico en la sal de refrigerante que reduciría cualquier especie oxidante introducida y, en particular, atraparía cualquier oxígeno del agua o aire que se disolviera en la sal de refrigerante en forma de óxido de circonio insoluble. La temperatura relativamente baja de la sal de manto también haría el control de la corrosión directamente.

El control de la corrosión a partir de la sal de combustible es bastante más complejo. La fisión da lugar a la creación de una mezcla compleja de elementos que se extienden en potencial redox del cesio al yodo. Los halógenos liberados de los haluros de actínidos fisionalizados pueden o no pueden ser totalmente neutralizados por productos de fisión de metal reactivos. Se requieren cálculos detallados de la evolución del material para establecer la naturaleza del desafío de la corrosión química y si existe la necesidad de sistemas, tales como la inclusión de metales de protección moderadamente reactivos en la mezcla de combustible, para manejar ese desafío. El uso de tricloruros o trifluoruros de uranio en la sal de combustible también proporcionaría una gran capacidad para absorber cualquier liberación neta de halógeno en forma de tetrahaluros.

10 Tubos de la caldera

Los tubos de la caldera están expuestos a temperaturas máximas en la región de 600-700 °C. Dado que la temperatura del vapor dentro de ellos sería de aproximadamente 350 °C y estarían algo protegidos de la temperatura completa de la sal de manto por una capa límite de sal más fría, que está cómodamente dentro de las capacidades de las aleaciones de níquel existentes. Dichas aleaciones ya se utilizan para tubos de calderas dentro de centrales de carbón donde se exponen a condiciones mucho más agresivas (incluyendo una mezcla compleja de sales fundidas condensadas a partir de la bola de fuego).

20 Sin embargo, los tubos de la caldera son propensos a tener una vida más corta que el reactor - aunque solo sea por los efectos del "lado del vapor" corrosión. Sin embargo, pueden hacerse en formato modular, lo que permite un reemplazo relativamente fácil.

Depósito del reactor

25 El depósito del reactor es uno de los pocos componentes permanentes del reactor, ya que ambos tubos de combustible y los tubos de caldera son reemplazables en una salida/caída de la base. Puede haber un recipiente de contención primario por encima del depósito lleno de gas inerte y que contenga mecanismos para la recogida/bombeo de gas de escape y el reemplazo del tubo de combustible/tubo de caldera.

30 A modo de ejemplo, un depósito de acero forrado de material compuesto de grafito o de carbono tendría la resistencia física y química necesaria para el depósito de reactor. Su vida útil se determinaría en última instancia por su exposición al flujo de neutrones que fragiliza el acero y eventualmente desintegra el carbono.

35 La protección contra el flujo de neutrones es por lo tanto más deseable y esto se considera a continuación. Siempre que la protección de neutrones fuera adecuada, una vida de reactor de un siglo es una perspectiva realista.

Flujo de neutrones

40 Los neutrones que escapan de la región del núcleo representan un desafío de detección significativo. Si se permite que lleguen a los tubos de la caldera podrían causar fragilización que sería un problema grave para los tubos de alta presión. Si llegaran a la pared del depósito del reactor, una fragilización similar del acero e hinchamiento del revestimiento de carbono limitaría su vida útil.

45 La construcción de blindaje absorbente de neutrones en el reactor es una opción para tratar con los neutrones en exceso, pero aumentaría la complejidad del diseño.

50 Otra opción potencialmente atractiva es incluir un absorbente de neutrones "no combustible" en la sal de manto. El hafnio es un clásico veneno que no se puede quemar, ya que la mayoría de sus isótopos se transmutan en otros isótopos estables neutralizadores de neutrones absorbentes. El hafnio es también un contaminante importante en los minerales de zirconio y tiene propiedades químicas casi idénticas. La preparación de zirconio libre de hafnio es difícil y costosa, razón por la cual el circonio del reactor es aproximadamente diez veces más caro que el metal de circonio "normal". En una realización, dicho absorbente de neutrones tendría una baja absorción de neutrones para neutrones rápidos, por lo que no reduciría la economía de neutrones en el conjunto de tubos de combustible donde el espectro de neutrones es rápido, pero que tiene una absorción significativa de neutrones más lenta de manera que absorbe neutrones escapando del conjunto de tubos de combustible antes de que lleguen a las estructuras permanentes del reactor.

60 Por lo tanto, este abre la oportunidad de ahorrar al mismo tiempo grandes costes y proporcionar la detección de neutrones efectiva por el simple uso de tetrafluoruro de zirconio, barato, contaminado con hafnio, en la sal de manto.

65 El nivel óptimo de hafnio en la sal de manto tendría que ser calculado basado en la dispersión de neutrones, la moderación y la absorción en la sal de manto. Habrá una compensación en el nivel que se utilizará ya que la sal común pasa a través de la región del núcleo y la presencia de un absorbente de neutrones en la sal de manto reduciría la economía de neutrones centrales (aunque solo marginalmente) y por lo tanto aumentar un poco el inventario fisionable inicial.

Sistemas de control

5 Los reactores convencionales usan barras de control para compensar el exceso de reactividad inicial de sus barras de combustible. La supervisión continua de la tasa de fisión a través de detectores de neutrones dentro y fuera del núcleo es necesaria para controlar los transitorios locales que pueden conducir al sobrecalentamiento.

10 El reactor descrito en este documento no requiere de tales sistemas de control. El conjunto de tubos de combustible contiene solo suficiente combustible fisionable para ser crítico a su temperatura de diseño en el reactor. A medida que el combustible se calienta se expande con un coeficiente que puede variar de aproximadamente 3×10^{-4} a 2×10^{-3} . Un aumento de temperatura de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ disminuye así la concentración de material fisionable dentro de la región del núcleo en un 3-20 %, lo que es más que suficiente para apagar la reacción en cadena. Si se utilizan sales de combustible tales como UCl_3 , el coeficiente de expansión térmica se aproxima al extremo superior del intervalo dado, dando al reactor una mayor estabilidad.

15 La física básica del reactor, por tanto, mantiene la temperatura del combustible a una temperatura media casi fijo independientemente de la velocidad a la que se transfiere calor desde el combustible al manto. Por lo tanto, el nivel de potencia del reactor se controla eficazmente por la velocidad de extracción de calor a través de los tubos de la caldera en la sal de manto. Si cesara el retiro de calor, entonces el combustible se calentaría y se expandiría hasta que la tasa de fisiones cayera a un nivel suficiente para mantener la nueva temperatura de combustible más alta
20 contra cualquier pérdida de calor restante del reactor.

25 El sistema de control del reactor primario puede ser un juego de sensores de temperatura, por ejemplo, sensores de temperatura espectrales, integrado en los conjuntos de tapa de tubo. Esto controlaría la temperatura de la sal de combustible en cada tubo de combustible. A medida que se consumía material fisionable y se acumulaban productos de fisión en los tubos de combustible, la temperatura de la sal de combustible en los tubos caería, la sal se contraería, la concentración de isótopos fisionables aumentaría y la reacción en cadena continuaría.

30 Otra opción para el sensor de temperatura es medir la expansión de la sal de combustible. Esto puede hacerse de varias maneras, pero una simple es medir la frecuencia acústica resonante de la columna de gas en el tubo entre la tapa de tubo y la superficie de la sal de combustible. Este método sería particularmente útil cuando la parte superior del tubo de combustible no fuera lineal.

35 Un número de barras de control de absorción o de moderación de neutrones puede incluirse en el diseño para permitir apagar del reactor a una temperatura más baja en caso de emergencia, en la clausura y cuando se sustituye el conjunto del tubo de combustible. El uso de moderación de neutrones en lugar de absorber el material de la barra de control es posible gracias a la presencia de fuertes absorbentes de neutrones más lentos, como el hafnio, en la sal de manto, aunque una barra de control estructurada con un núcleo moderador rodeado por una periferia de fuerte absorbente de neutrones podría ser preferible

40 Alternativamente, podría prescindirse de las barras de control enteramente. En caso de emergencia, se podría añadir una cantidad grande de un absorbedor fuerte de neutrones rápidos a la sal de refrigerante. Un ejemplo sería el fluoruro de europio. Para apagar la reacción en cadena durante el reabastecimiento de combustible o el desmantelamiento, la mitad de los tubos de combustible podría levantarse parcialmente del depósito, dejando la parte llena de combustible sumergida en la sal de refrigerante. El aumento del volumen de la región del reactor que
45 contiene la sal de combustible resultaría en volverla subcrítica.

50 Un aspecto importante de los sistemas de control es su funcionamiento durante la puesta en marcha del reactor. Es normal mantener un reactor subcrítico con barras de control hasta que se complete el llenado de combustible y, a continuación, retirar muy lentamente las barras de control. Un retiro demasiado rápido puede desencadenar un evento crítico rápido que puede ser desastroso. Un sistema similar podría ser utilizado en el MSR simple con una o más varillas de control que se retiraron completamente al final de la secuencia de inicio.

55 Sin embargo, sería posible prescindir de las barras de control en el arranque mediante la adición de tubos de combustible progresivamente al núcleo hasta que se alcanza la criticidad, luego continuar para añadir más tubos de combustible hasta que se alcanza la temperatura de la sal de combustible de diseño. Es vital evitar eventos críticos rápidos durante este proceso debido a la inserción demasiado rápida de la reactividad en el núcleo del reactor. El potencial de criticidad inmediata puede reducirse mediante una o más de las siguientes etapas.

60 Una fuente de neutrones puede ser incorporada en el núcleo de manera que el núcleo genere calor rápidamente cuando alcanza un estado crítico retardado en lugar de tener un tiempo de retraso potencialmente largo mientras el flujo de neutrones se acumula. Esto se puede hacer convenientemente mediante la incorporación de actínidos superiores tales como ^{244}Cm de combustible nuclear gastado en la sal de combustible.

65 Puede utilizarse una composición de combustible con una fracción de neutrones elevada retardada. Esto implicaría el uso de ^{235}U en vez de solo ^{239}Pu y/o la incorporación de ^{238}U en el combustible, que tiene una fracción de neutrones retardada particularmente alta cuando se fisiona por neutrones rápidos.

Los tubos de combustible se pueden añadir al inicio en primer lugar como un conjunto de núcleo ventral subcrítico central y luego como un conjunto periférico que se construye desde el exterior del núcleo hacia el interior. Esto aseguraría que cuando se añadiera el tubo de combustible final necesario para crear criticidad, estuviera a cierta distancia del grupo de tubo de combustible central principal, de manera que la inserción de reactividad era bastante pequeña y por lo tanto segura. La separación entre el grupo interno y externo de tubos de combustible se llenaría entonces con tubos de combustible haciendo que el núcleo alcanzara su temperatura de sal de combustible de diseño cuando los anillos se llenaran.

Un procedimiento de puesta en marcha alternativo sería precalentar la sal de refrigerante a una temperatura relativamente alta y luego construir el conjunto de tubos de combustible. La alta temperatura expandiría la sal de combustible haciendo que el núcleo fuera subcrítico. Cuando se montó el núcleo, la sal de refrigerante se pudo enfriar lentamente permitiendo que el núcleo se acercara a la criticidad de una manera lenta y controlada.

Elección de combustible y sistema de reaprovisionamiento/reprocesamiento

Es una característica de la mayoría de los reactores de sales fundidas que tienen una gran flexibilidad de combustible. Este reactor no es una excepción y podría ser alimentado con, por ejemplo, plutonio, uranio enriquecido o actínidos transuránicos mixtos a partir de combustible convencional de reactor.

La recarga del material fisionable en cada tubo a medida que se consumía el material fisionable durante el funcionamiento del reactor sería práctica, aunque representaría un sistema relativamente mecánicamente complejo en el reactor.

Un sistema de manipulación de combustible seguro, fácil de supervisar y controlar sería tener pastillas de combustible (sales fundidas congeladas simples) cargadas en un sistema de cartucho de radiación proyectado en una planta de procesamiento seguro central. El cartucho se montaría en el reactor en un mecanismo que rastrearía el conjunto de las tapas del tubo de combustible, se bloquearía en la relevante y descargaría las pastillas de combustible individuales en ese tubo de combustible.

La sal de combustible puede, a modo de ejemplo, contener aproximadamente un 30-35 % de cloruros actínidos totales, de las cuales la mayoría pueden ser fértiles ^{238}U . El consumo de los isótopos fisionables durante el funcionamiento del reactor tendería a reducir la producción de potencia que da como resultado el enfriamiento y la contracción de la sal de combustible, manteniendo así su masa crítica. La producción de nuevos isótopos fisionables a partir de isótopos fértiles en la sal de combustible podría mantener los niveles de isótopos fisionables y por lo tanto la potencia de salida del reactor. Si tal "crianza" era insuficiente para mantener la potencia de salida entonces los tubos de combustible podrían ser cubiertos añadiendo pequeñas cantidades de material fisionable fresco a cada tubo a través de su conjunto de tapa. Una alternativa a esta opción sería añadir tubos de combustible nuevo además de los que ya están en el reactor o bien en el centro del conjunto en el espacio anular o alrededor de la periferia del conjunto. Cuando el núcleo se ha diseñado con tubos que carecen de material fisionable hacia el centro del conjunto de tubos, estos tubos podrían reemplazarse por tubos que contengan material fisionable a medida que el reactor queme su carga fisionable inicial.

En general, pero en particular cuando se elige la sal de combustible para tener un gran coeficiente de expansión térmica, el enfriamiento sustancial de la temperatura media de sal de combustible debido al consumo de material fisionable se puede tolerar. La gran contracción resultante del volumen de la sal de combustible mantiene la criticidad del núcleo con solo una pérdida neta aceptable de potencia de salida. Los ejemplos de composiciones de sales tales combustible son 85 % UCl_3 / 15 % XCl_3 donde X representa plutonio, americio, curio y trazas de actínidos superiores mezclados a partir de combustible nuclear reprocesado.

Una opción adicional para la sal de combustible es el uso de una mezcla de tricloruros de uranio y plutonio poco enriquecidos como el combustible fisionable. Tanto ^{235}U como ^{239}Pu se consumen por fisión, pero la mayor parte del material fisionable producido es ^{239}Pu que tiene una contribución relativamente mayor a la criticidad del reactor que el ^{235}U debido a su sección transversal de fisión más alta y un mayor rendimiento de neutrones de fisión. El resultado es que una proporción de reproducción de menos de 1,0 puede mantener la sal de combustible con una concentración crítica de isótopos fisionables.

Sin embargo, una opción adicional para evitar la necesidad de añadir material fisionable fresco a los tubos de combustible sería incorporar un absorbedor de neutrones extraíble en la sal de refrigerante que puede ser eliminado progresivamente a medida que se consume el material fisionable. Una opción sería el fluoruro de cadmio que podría eliminarse fácilmente de la sal de refrigerante por reducción o reducción electrolítica por adición de un metal reactivo tal como sodio. El cadmio metálico resultante se fundiría a las temperaturas del reactor y podría eliminarse o dejarse acumular en el fondo del depósito.

Todavía otra opción sería incorporar barras de control absorbentes de neutrones en el núcleo del reactor, que podrían ser retiradas gradualmente a medida que se consumió el material fisionable.

En el caso de que el reactor funciona como un "sobrecruidor" que produce más material fisionable de lo que consume y por lo tanto hace que la potencia de salida aumente, pudiendo usarse la eliminación selectiva de los tubos de combustible individuales para llevar el reactor de nuevo a su nivel de potencia de diseño.

5 La acumulación de productos de fisión puede convertirse en el factor limitante que determina los intervalos de reprocesamiento en reactores de sal fundida. Los reactores rápidos como el aquí descrito son relativamente resistentes al problema de la intoxicación por neutrones por los productos de fisión, pero cuando los productos de fisión alcanzan su límite de solubilidad en la sal de combustible, precipitan. Esa precipitación es un problema importante para los reactores que necesitan bombear la sal a través de los intercambiadores de calor porque puede conducir a bloqueos, restricciones de flujo o acumulación de productos de fisión generadores de calor en regiones con refrigeración inadecuada. La prevención de tal precipitación puede ser en última instancia el factor clave que determina el máximo período de reprocesamiento posible. En el reactor descrito en este documento, sin embargo, cuando la sal de combustible no se bombea o canaliza, el material precipitado tendría poco efecto si se llevaba disperso en el combustible, extendido en la pared del tubo de combustible o acumulado como depósito en el fondo del tubo. En el caso en que la sal de combustible se agita mecánicamente, las partes móviles que están sumergidas en la sal de combustible pueden diseñarse de tal manera que las superficies que se mueven una con respecto a la otra no se aproximen lo suficiente para que la deposición sea un problema durante la vida del reactor.

Sistema de Gas de Escape

20 La mayoría de los diseños de reactores de sales fundidas tienen sistemas expulsión de gas relativamente complejas con burbujeo de helio del combustible, la separación de los metales espumados nobles y filtración y el procesamiento de los gases evolucionados. Debe prestarse especial atención al tritio que se produce en cantidades muy grandes a partir de la sal de litio utilizada, incluso si se utiliza el 99,995 % del caro ^7LiF .

25 Un sistema mucho más simple se puede utilizar en el reactor descrito en esta memoria. Debido a que el espectro de neutrones es rápido, el envenenamiento por neutrones por ^{135}Xe no es un problema significativo (la sección transversal de neutrones cae de 2.700.000 barnios para neutrones térmicos a 7600 barnios para neutrones en la región de ralentización y prácticamente cero para neutrones rápidos). Por lo tanto, la eliminación rápida del xenón no es necesaria ni para mejorar la economía de neutrones ni para evitar excursiones de reactividad debido a cambios en los niveles de potencia.

30 Por tanto, xenón y criptón se pueden permitir que construir hasta concentraciones de saturación (aproximadamente 10^{-5} mol/l) en el combustible fundido y luego a burbujear espontáneamente de la sal de combustible. En un diseño a modo de ejemplo, la velocidad de producción de gas noble a plena potencia saturaría el combustible en 30 minutos. El flujo resultante de gas noble de cada tubo de combustible sería de aproximadamente 13 ml por día a NTP o aproximadamente 50 ml/día a temperatura del reactor. Un espacio de gas por encima de cada tubo de combustible de aproximadamente 500 ml daría un tiempo de residencia medio del gas evolucionado en el tubo de combustible de 10 días lo que permitiría que la mayoría de los isótopos altamente radioactivos se deterioren dentro del tubo de combustible.

35 Otras especies de fisión volátiles estarían limitadas. El tritio se produciría solo por los raros eventos de fisión ternaria, pero cantidades muy pequeñas serían transportadas de la sal de combustible como HF por los gases nobles evolucionados. Cloruros volátiles tales como ZrCl_4 tendrían presiones bajas, pero no insignificantes de vapor sobre la sal caliente y por lo tanto pequeñas cantidades pueden transportarse con la corriente de gas noble. El yodo puede formar haluros mixtos con UCl_3 o reaccionar con un metal de barrido incluido en la mezcla de combustible. Sin embargo, pequeñas cantidades podrían ser llevadas con la corriente de gas no noble.

40 En general, un sistema de escape de gas totalmente pasivo fuera sería adecuado y requeriría solo es simple tubo de aleación de níquel conduce a un condensador/absorbedor para recoger los productos de escape de gas. La aceleración del proceso de escape de gas con un flujo de helio sería innecesaria y, de hecho, indeseable, ya que daría como resultado la pérdida por evaporación de la sal de combustible a lo largo del tiempo con la consiguiente deposición de material radiactivo en los tubos del sistema de gas de escape.

45 El sistema de gas de escape puede ser convenientemente combinado con el sistema de la oscilación de la presión de gas descrito anteriormente.

Seguridad del reactor

50 La física básica y la química del diseño del reactor le dan un muy alto nivel de seguridad intrínseca.

Algunos de estos factores son comunes a todos los sistemas de sales fundidas

- La fuerte retroalimentación negativa debida a la dilatación térmica del combustible apaga automáticamente la reacción en cadena en caso de sobrecalentamiento.

- No se necesitan barras de control (excepto posiblemente como una copia de respaldo si fuera necesario cerrar el reactor) ya que no hay reactividad en exceso en el reactor.
- 5 • El combustible y los productos de fisión están en formas físicamente y químicamente estables que no reaccionarían ni con agua ni aire a grados significativos en caso de fallo de contención.
- Los productos de fisión volátiles se retiran continuamente para su almacenamiento seguro y su descomposición, de manera que la radiactividad volátil resultante de cualquier fallo de contención sería mínima.
- 10 Algunos son comunes a la mayoría de los reactores de neutrones rápidos
- Los transitorios de xenón no serán significativos durante los cambios en la potencia de salida ya que el reactor funciona en un espectro de neutrones rápidos y la concentración de xenón en el combustible será constante en su concentración de saturación en todas las condiciones de carga.
- 15 Algunos son comunes a reactores de tipo "de piscina"
- La refrigeración primaria del núcleo es por convección pasiva de manera que incluso un fallo completo del sistema de refrigerante secundario no daría lugar a un sobrecalentamiento rápido del núcleo. La inmensa piscina de sal líquida fundida sería capaz de absorber el calor de desintegración residual del núcleo durante muchas horas antes de que se necesitara refrigeración auxiliar, si es que alguna vez lo fue.
- 20 Algunos son únicos para este diseño
- 25 • La absorción eficiente de neutrones por la sal de manto da como resultado una exposición mínima de las estructuras del reactor al flujo de neutrones; por lo tanto, las estructuras del reactor no se vuelven altamente radioactivas ni experimentan degradación física.
- Cualquier fallo de un tubo de combustible, o de hecho de todos los tubos de combustible simultáneamente, daría lugar a que el combustible fundido se mezcle con el gran exceso de sal de manto absorbente de neutrones. Esto extinguiría instantáneamente la reacción en cadena proporcionando al mismo tiempo una gran capacidad térmica para absorber el calor de desintegración de los productos de fisión.
- 30 • Todas las sales fundidas, en todo momento, se sumergen en la gran piscina de sal de manto. Por lo tanto, la congelación de sal en una tubería o intercambiador de calor en caso de fallo de la bomba, etc., no es posible y se puede usar un único sistema de calefacción para fundir la sal al arrancar y mantenerla fundida durante el tiempo de inactividad. Ese único sistema de calefacción representa una simplificación sustancial en comparación con otros diseños de reactor de sal fundida.
- 35 • Toda la sal de combustible se encuentra dentro del reactor de manera que se minimiza la pérdida de neutrones retardados que se emiten fuera de la región del núcleo. Esto aumenta sustancialmente la estabilidad del reactor y la resistencia a las excursiones de potencia "rápida".
- 40 Uno de los peligros potenciales intrínsecos al diseño se refiere a la presencia de los tubos de la caldera dentro del depósito reactor. Sería esencial establecer que la ruptura de uno de esos tubos no daría lugar a un accidente peligroso.
- 45 El vapor reacciona con bastante lentitud con ZrF_4 a la temperatura del manto, con una energía libre de Gibbs de aproximadamente cero. La mayor parte del vapor de agua por lo tanto la descarga en el espacio de cabeza por encima de la sal de manto fundido con una pequeña cantidad de HF y ZrF_4 vapor incluido. En el diseño de la tapa del reactor, por lo tanto, debe incluirse un sistema de liberación de presión, que se descarga en un depósito adecuado, junto con la desconexión automática de las bombas de agua en caso de pérdida de presión
- 50 (característica normal de los sistemas de calderas).

Costes de Capital del Reactor

- Las estimaciones de costes de capital exactas están, por supuesto, mucho más allá del alcance de esta descripción. Sin embargo, las principales diferencias de coste de los reactores nucleares convencionales pueden ser resaltadas y sugieren que el reactor sería sustancialmente más barato de construir. Deben considerarse las siguientes diferencias importantes.
- 55 • Reducción de la contención debido a la seguridad intrínseca del reactor
 - 60 • Costes de fabricación de combustible reducidos a una fracción de barras de combustible sólido
 - No hay sistema radioactivo de alta presión con bombas, plomería, etc.
 - No hay intercambiadores de calor de canal de alta eficiencia con costes asociados
 - Sistemas de control simplificados, sin necesidad de multiplicar la redundancia. No se requiere una red de detectores de neutrones.
 - 65 • No hay sistema de barra de control de precisión de acción rápida. Un pequeño número de varillas SCRAM simple

- es suficiente para emergencias y el reactor cerrado.
- Potencial para la producción en fábrica de la isla nuclear en lugar de construcción en sitio.

Infraestructura de la industria nuclear

5 La nueva infraestructura nuclear necesario para una flota de reactores de acuerdo con la presente descripción es relativamente modesto y debe costar una pequeña fracción del coste de la infraestructura actual. A largo plazo sería, pues, una buena inversión si permitiera una producción de electricidad nuclear competitiva con los combustibles fósiles. La infraestructura también apoyaría un lucrativo mercado de exportación de reactores si se pudiera lograr la ambición de producir energía a un coste menor que los combustibles fósiles.

Producción y purificación de combustibles

15 El combustible para el reactor es simplemente sales de los isótopos fisionables. Ninguna fabricación de barras de combustible está implicada y la pureza relativamente baja del material fisionable es aceptable. En el Reino Unido sería razonable utilizar inicialmente el stock de 100 toneladas de dióxido de plutonio que se considera actualmente como de valor neto cero. Sobre la base de las cifras para el diseño MSFR, el stock de plutonio del Reino Unido sería suficiente para alimentar quizás veinte reactores de 500 MWe. Una planta capaz de producir 10 toneladas por año permitiría alimentar dos reactores al año y sería de tamaño muy modesto.

20 A más largo plazo, los residuos de actínidos de las existencias actuales de combustible de óxido de uranio/plutonio podrían ser utilizados como materia prima. Puede ser económico utilizar instalaciones de reprocesamiento existentes para esto, aunque el proceso podría simplificarse sustancialmente, ya que una pureza más baja es aceptable, pero el piropcesamiento electrolítico probablemente sería más barato y más eficiente para la nueva planta.

Procesamiento de sal de combustible

30 El reprocesado de la sal de combustible del reactor sería poco frecuente, tal vez solo después de 10-20 años, aunque puede ser necesario un reabastecimiento más frecuente durante el tiempo de vida de los tubos de combustible. De hecho, el combustible usado podría almacenarse de la misma manera que el combustible usado actualmente, pero el reprocesamiento para separar los restantes actínidos de los productos de fisión y la sal utilizada sería relativamente sencillo, ya que una contaminación significativa de los actínidos recuperados con productos de fisión es perfectamente aceptable para reutilización de los actínidos.

Configuración de cría

40 Es probable que el reactor contendrá isótopos fértiles en la sal de combustible con el resultado de que nuevo material fisionable se cría continuamente durante el funcionamiento. Esto ocurre en la mayoría de los reactores nucleares. El presente reactor tiene el potencial de ser un criador más eficaz de nuevos isótopos fisionables si también se incluyen isótopos fértiles en la sal de refrigerante. El mismo diseño básico del reactor puede configurarse como un reactor de cría, pero con cambios significativos. El reactor sería más costoso y solo tendría sentido económico cuando el coste del material fisionable aumentara significativamente, como ocurriría inevitablemente si la energía nuclear reemplazara sustancialmente los combustibles fósiles para la generación de energía.

Elección de sales

50 La sal de manto sería un sitio importante de reproducción en el reactor. El torio sería un material fértil a modo de ejemplo por varias razones. Es barato, abundante y cría ²³³U que es ventajoso como un combustible, ya que genera menos residuos de actínidos de larga vida. El torio tiene una sección transversal de fisión muy pequeña incluso en reactores rápidos que aseguran una contaminación mínima de la sal de manto con productos de fisión. El uranio empobrecido podría utilizarse en lugar del torio, pero sería necesario un mayor cuidado para eliminar los productos de fisión de la sal de refrigerante, ya que el ²³⁸uranio tiene una sección transversal más grande para la fisión por neutrones rápidos que el torio,

55 Una mezcla de sal de ejemplo sería 22 mole % de THF₄ en NaF que tiene un punto de fusión de 620 °C. Esto requeriría tener una temperatura de trabajo de sal de combustible de aproximadamente 900 °C y una mezcla de fluoruro de NaF/actínido similar sería posible ya que la sal de combustible a través de una sal basada en cloruro sería todavía práctica y tendría ciertas ventajas como se ha expuesto anteriormente.

60 El torio en el manto habría absorbido eficazmente los neutrones que escapan del núcleo, proporcionando de este modo el mismo efecto de pantalla como el hafnio en el diseño de no cría. El gran volumen de la sal de manto requeriría cantidades mucho mayores de torio que la mayoría de los diseños actuales de reactores de sal fundida. Sin embargo, el torio es relativamente abundante y actualmente representa un desperdicio problemático, ligeramente radioactivo, de la extracción de tierras raras. El costo del torio importado a EE. UU. en 2011 varió de \$ 27 a \$ 250 por kg dependiendo de la pureza. Incluso a 250 dólares por kilo, 250 toneladas de torio costarían solo 40

millones de libras esterlinas.

Material del tubo de combustible

5 La alta temperatura de la sal de combustible en el ejemplo anterior haría inadecuadas las aleaciones de níquel para los tubos de combustible. Aleaciones de molibdeno, o incluso puro molibdeno podrían ser suficientes. Alternativamente, podrían usarse materiales compuestos C/C con la condición de que los tubos de combustible fueran reemplazados y el combustible reprocesado en un ciclo de 2-4 años. Esta sincronización sería consistente tanto con la prevención del debilitamiento de los tubos debida al daño de los neutrones como por la maximización de la eficacia de la cría mediante la eliminación de los productos de fisión. A más largo plazo, los materiales menos desarrollados como los materiales compuestos metálicos y los materiales compuestos de carburo de silicio podrían ser opciones superiores.

Tubos de caldera

15 A pesar de la temperatura de sal de manto superior, aleaciones de níquel probablemente todavía ser adecuado para los tubos de la caldera. La gran diferencia de temperatura entre el vapor y la sal fundida probablemente daría lugar a una cáscara congelada de sal que se forma alrededor de los tubos de la caldera. Esa capa protegería el tubo contra la corrosión.

Recuperación del ^{233}U criado

25 En comparación con la mayoría de las configuraciones de reactor de cría, este reactor tiene un volumen enorme de sal de manto. Esto resulta en que el ^{233}Pa producido a partir del ^{232}Th está diluido tanto que su probabilidad de experimentar la captura de neutrones antes de que se deteriore a ^{232}U es minúscula. Por lo tanto, la separación del ^{233}Pa no es necesaria.

30 La recuperación rápida del ^{233}U es sin embargo deseable a fin de evitar que someterse a la fisión en el manto y contaminando así el manto con productos de fisión. Hay muchas maneras de hacer esto, pero una opción atractiva es incluir una capa de aleación fundida del bismuto/del torio en el fondo del depósito. La extracción reductiva en bismuto de uranio por torio está bien establecida como un método para recuperar uranio a partir de sales fundidas. El uranio se podía dejar acumular durante muchos meses, protegido del flujo de neutrones por el torio en la sal de manto, antes de ser recuperado.

35 La separación de uranio de los fluoruros de torio por extracción reductora en bismuto fundido ha sido bien descrita (US 3.577.225). Normalmente esto se consigue bombeando la sal fundida a través de columnas altas de bismuto fundido. En un reactor en el que la crianza tiene lugar en un depósito de sales fundidas, tal como el reactor descrito aquí, solo sería necesario incluir una capa de metal fundido, tal como bismuto, en el fondo del depósito con un exceso de torio metal incorporado o dispersado en la capa de metal fundido. Opcionalmente, la capa de metal fundido puede ser extraída desde el fondo del depósito, pasada a través de un generador de vapor u otro intercambiador de calor y reintroducida en la parte superior del depósito como una pulverización o un número de columnas de líquido que caen a través del manto refrigerante absorbente de calor. Por lo tanto, este conjunto actúa como un intercambiador de calor, sin necesidad de separación física de la sal de manto y el refrigerante del intercambiador de calor, y mejora la recogida del material fisiónable del manto.

45 El uranio podría entonces ser recuperado del metal fundido bombeándolo del reactor y fluorándolo de manera que el uranio se volatilizara como el hexafluoruro. Una alternativa a este procedimiento convencional sería hacer circular el metal fundido de forma continua o periódica a través de un sistema de refrigeración que refrigeraba el metal por encima de su punto de fusión. Tanto el torio como el uranio disueltos en el metal precipitarían como bismutídidos o el complejo correspondiente con el otro metal que luego podría eliminarse y procesarse para recuperar el uranio. La ventaja de este proceso es la simplicidad y que se evita transportar o procesar grandes volúmenes de bismuto u otro metal.

Ejemplo de configuraciones de reactores

55 A continuación, se describirán varias configuraciones de reactor a modo de ejemplo para ejemplificar aún más los principios discutidos anteriormente.

Ejemplo 1

60 Un depósito reactor cilíndrico está construido a partir de 5 cm de espesor de acero revestido en la superficie interior con 10 cm de baldosas de grafito. Está aislado en el lado externo y está cerrado por debajo del nivel del suelo en un pozo forrado de hormigón y acero. Las dimensiones del depósito son de 6 m de diámetro por 4 m de profundidad. El depósito se llena con una mezcla de sal de refrigerante compuesta de 40 % de tetrafluoruro de zirconio y 60 % de fluoruro de sodio. El zirconio contiene entre 1 y 2 % de hafnio. La sal se funde inicialmente por inserción a través de la tapa del reactor de un sistema de calefacción eléctrico que se retira cuando el reactor está en funcionamiento.

Los conjuntos de tubos de vapor se colocan en forma de 6 conjuntos de tubos alrededor del perímetro interno del depósito de reactor. Cada conjunto ocupa 60 grados de curvatura del depósito y juntos forman un anillo completo de 1 m de espesor. Los tubos de vapor se forman a partir de tubos sin soldadura de aleación de níquel y se unen a tubos de alimentación por encima del depósito de modo que las soldaduras o juntas no se sumergen en la sal fundida. El agua a aproximadamente 300 °C se bombea a los tubos y emerge como una mezcla de vapor y agua a 350-400 °C. El vapor se separa en un tambor de vapor y el vapor vuelve a introducirse en otra parte del conjunto de tubos de vapor para recalentar. La porción del conjunto de tubos de vapor usada como sobrecalentador se sitúa por encima de la porción utilizada para producir la mezcla de agua/vapor de manera que está en contacto con la sal de refrigerante de temperatura más alta. El vapor sobrecalentado se canaliza a un juego convencional de turbina/generador de vapor. Las conexiones de las matrices de tubos de vapor con las turbinas de vapor se pueden separar remotamente de manera que las matrices de tubos de vapor pueden desconectarse remotamente, retirarse del depósito, reemplazarse con matrices frescas y reconectarse a los sistemas de turbina.

Los tubos de combustible están formados de 99 + % de molibdeno puro con un espesor de pared de 0,5 mm. Tienen un diámetro de 4 cm en el 1,5 m inferior del tubo y de 1,5 cm en el 1,5 m superior del tubo. El 1,5 m superior se forma en una espiral con un diámetro exterior de 4 cm y un paso de 40 cm. Se fijan a la tapa del reactor usando un accesorio de sujeción que tiene una conexión fácil y remotamente liberada a una red de tubos de aleación de níquel de 5 mm que está conectada a una trampa criogénica para condensar y almacenar cualquier gas que se haya desarrollado a partir de la sal de combustible. Los tubos de combustible están dispuestos en un patrón hexagonal con una separación de centro a centro de 5 cm en un conjunto cilíndrico de 3 m de diámetro. Los 2,8 m inferiores de los tubos se sumergen en la sal de refrigerante dejando un espacio de gas de 20 cm por encima de la sal de refrigerante que está llena de helio.

Barras de diámetro 3m x 2 cm, de metal de circonio se pasan a través de la tapa del reactor en el espacio entre los tubos de combustible y los tubos de vapor para actuar como captadores de sacrificio de productos químicos reactivos en la sal de refrigerante.

El 80 % de los tubos de combustible se llenan a una profundidad (a 1000 C) de 1,4 m con una mezcla de cloruro de uranio enriquecido al 5 % en el isótopo 235 de uranio y una mezcla de plutonio y tricloruros de actínido superior recuperados de óxido de uranio barras de combustible que se habían utilizado una vez en reactores moderados convencionales de agua ligera. Del cloruro de uranio, el 95 % es tricloruro con tetracloruro al 5 %. Las sales congeladas se envasan como gránulos en los tubos en una instalación de fabricación central y se insertan en el reactor cuando la sal de refrigerante se calienta por encima del punto de fusión de las sales de combustible, evitando así la posibilidad de la expansión de las sales a través de la fusión causando el agrietado de los tubos de combustible. La concentración de tricloruro de uranio cae desde el 80 % en los tubos de combustible en el centro del conjunto hasta el 70 % para los tubos en el perímetro exterior del conjunto, siendo el resto el plutonio y los tricloruros de actínidos superiores.

El 20 % restante de los tubos de combustible se llenan con la mezcla de sal de refrigerante y están distribuidos dentro del conjunto de modo que la proporción de sal de refrigerante tubos de combustible lleno aumenta desde cero en el borde exterior del conjunto a 30 % en el centro del conjunto.

Cada conjunto de abrazadera del tubo de combustible contiene un sensor de temperatura que funciona mediante la detección de la frecuencia de resonancia de la columna de gas por encima de la sal de combustible fundida, la expansión de la sal de combustible resultando en un acortamiento de la columna de gas. Los tubos de combustible se cargan en el reactor progresivamente con la temperatura siendo monitoreada a medida que se añaden tubos adicionales de manera que la serie completa de tubos de combustible alcanza la temperatura de diseño.

A medida que el reactor opera y se consume material fisionable, sal refrigerante tubos de combustible llenos están reemplazados con tubos llenos de sal de combustible a fin de mantener la sal de combustible a cerca de su temperatura de diseño.

La región por encima del depósito consiste en una cámara llena de helio de diámetro similar al depósito reactor y una altura de 5 m. Contiene un aparato de grúa operado a distancia que puede quitar los tubos de combustible o los bancos de tubos de vapor y un conjunto de esclusa de aire para permitir el movimiento de los tubos de combustible o los bancos de tubos de vapor dentro y fuera de la cámara. El helio se hace circular continuamente a través de un aparato de absorción/filtración para mantener niveles bajos de oxígeno, nitrógeno y humedad.

Las "válvulas de ráfaga" de baja presión se incorporan en la tapa del reactor con la tubería a las unidades de condensador de acero para permitir que cualquier liberación de vapor dentro del depósito reactor debido a un tubo de vapor ráfaga sea ventilada y condensada en lugar de acumular presión dentro del depósito reactor .

Ejemplo 2

El reactor es similar al descrito en el ejemplo 1 excepto en lo siguiente. Está especialmente diseñado para ser un criador neto de material fisionable.

Los tubos de combustible están fabricados de fibra de carburo de silicio/material compuesto de carburo de silicio con un espesor de pared de 1 mm y un recubrimiento de 50 µm de carbono pirolítico en cada superficie. La parte inferior tiene un diámetro de 20 mm y la parte superior de 10 mm. Están dispuestos en un conjunto hexagonal con un espacio entre centros de 28 mm. La sal de combustible es una mezcla 45/45/10 de fluoruro de sodio, tetrafluoruro de uranio (con el uranio que contiene 5 % de ²³⁵U y 10-20 % de ²³³U) y tetrafluoruro de zirconio. La sal refrigerante es una mezcla de fluoruro de sodio al 78 % y tetrafluoruro de torio al 22 %.

Una capa profunda de 10 cm de bismuto fundido es en la parte inferior del depósito de reactor y un aparato de bombeo está suspendido de la tapa del reactor que rocía continuamente el bismuto en la superficie de la sal de refrigerante en el espacio entre los tubos de combustible y los tubos de vapor. Una porción del bismuto bombeado se desvía a través de un sistema de refrigeración que enfría el bismuto a 50 °C por encima de su punto de fusión. El uranio precipitado y los bismútidos de torio se recogen y procesan para recuperar ²³³U. Los gránulos de torio metálico situados en el fondo del depósito aseguran que el bismuto esté siempre saturado de torio metálico, provocando así la extracción reductora del uranio producido en el refrigerante mediante la acción de neutrones en el torio en la capa de bismuto fundido.

Ejemplo 3

El reactor es similar al descrito en el ejemplo 1 excepto en lo siguiente. Está especialmente diseñado para permitir períodos sostenidos de funcionamiento sin sustitución de los tubos de combustible.

El 20 % de los tubos de combustible que no contengan inicialmente sal de combustible se llenan con 70% de tricloruro de uranio natural/5 % de tetracloruro de uranio/25 % de NaCl en lugar de sal de refrigerante. Esto da lugar a un nivel bajo de la fisión y por lo tanto a la producción de calor dentro del tubo debido a la fisión de los isótopos del uranio, pero a una absorción relativamente grande de neutrones por ²³⁸U. El reemplazo progresivo de estos tubos con tubos que contienen sal de combustible, por tanto, añade significativamente a la reactividad neta del núcleo que de otro modo disminuirá a medida que se agotan los isótopos fisionables.

La sal de refrigerante contiene fluoruro de cadmio, u otro fluoruro absorbente de neutrones, hasta un 5 % en moles al arrancar el reactor. A medida que la reactividad del núcleo disminuye debido al consumo de isótopos fisionables, el fluoruro de cadmio se reduce progresivamente a cadmio metálico mediante la adición de sodio metálico a la sal de refrigerante. El cadmio metálico se funde a la temperatura del refrigerante y se acumula como una capa delgada en el fondo del depósito.

Ejemplo 4

El reactor es similar al descrito en el ejemplo 1 excepto en lo siguiente. Está especialmente diseñado para permitir largos períodos entre reemplazos de tubos de combustible mientras se consume un inventario preexistente de isótopos transuránicos sin producir cantidades significativas de nuevos isótopos transuránicos.

La sal de combustible contiene 15-20 % de tricloruros de isótopos transuránicos y de 80 a 85 % de tetracloruro de torio. La producción de ²³³U dentro de la sal de combustible del torio no es suficiente para mantener la reactividad del núcleo, que por consiguiente cae en la temperatura muy rápidamente a medida que se consume el material fisionable. El material fisionable fresco en forma de gránulos de 5 mm de diámetro formado a partir de tricloruro transuránico congelado se añade periódicamente a cada tubo de combustible a medida que su temperatura media individual cae por debajo de un umbral definido. Los gránulos de combustible se insertan en cada tubo de combustible a través de un mecanismo en el conjunto de tapa del tubo de combustible y caen a través de la porción en espiral del tubo de combustible hasta que alcanzan la sal de combustible fundido en la que se disuelven y mezclan.

Aunque la invención se ha descrito en términos de formas de realización como se ha expuesto anteriormente, debe entenderse que estas realizaciones son ilustrativas y que las reivindicaciones no se limitan a estas realizaciones. Los expertos en la técnica serán capaces de realizar modificaciones y alternativas en vista de la descripción que se contempla como comprendida dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Cada característica descrita o ilustrada en la presente memoria descriptiva puede incorporarse en la invención, ya sea sola o en cualquier combinación apropiada con cualquier otra característica descrita o ilustrada en la presente memoria.

En particular, son identificadas las siguientes características que pueden ser utilizadas con una sal fundida alimentada reactor de fisión por separado o en combinación.

La transferencia de calor del combustible de la sal fundida se consigue por convección o agitación mecánica de las sales dentro de los tubos, es decir, las sales de combustible no se conducen a través de bombas externas o intercambiadores de calor como en los reactores de sal fundida convencionales.

El líquido de manto es una sal fundida que circula por convección dentro de un solo depósito.

En la configuración de criador, el líquido de manto actúa como refrigerante, absorbente de neutrones y manto de crianza para el reactor.

Una capa de metal fundido está presente en el manto, dentro del cual se disuelven los isótopos fisionables procreados, extrayéndolos del manto.

5 La lista anterior no es limitativa y el experto en la técnica apreciará que otras características de la descripción anterior se pueden usar solos o en combinación con otras características.

10 Cualquier discusión de materiales específicos, concentraciones, dimensiones, u otras propiedades específicas del reactor han de ser tomada a modo de ejemplo y no limitante, y el experto en la técnica reconocerán que otros materiales adecuados, las concentraciones, y las dimensiones será posible, y dentro del alcance de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Un reactor de fisión nuclear (100), comprendiendo el reactor un núcleo, una piscina (101) de líquido refrigerante y un intercambiador de calor (103) para extraer calor del líquido refrigerante, en el que:

el núcleo comprende un conjunto de tubos de combustible huecos (102), conteniendo cada uno sal fundida de uno o más isótopos fisionables, estando el conjunto de tubos de combustible sumergido al menos parcialmente en la piscina de líquido refrigerante, comprendiendo el conjunto de tubos de combustible una región crítica, donde la densidad de los isótopos fisionables durante el funcionamiento del reactor es suficiente para provocar una reacción de fisión autosostenida; y el reactor de fisión nuclear está dispuesto de tal manera que la transferencia de calor desde la sal fundida en cada tubo de combustible al exterior de dicho tubo se logra por uno o más de entre:

convección natural de la sal fundida;
 agitación mecánica de la sal fundida;
 flujo de sal fundida oscilante dentro del tubo de combustible; y
 ebullición de la sal fundida dentro del tubo de combustible;
 y tal que la sal fundida de isótopos fisionables está contenida enteramente dentro de los tubos de combustible durante el funcionamiento del reactor.

2. Un reactor de acuerdo con la reivindicación 1, en el que cada tubo de combustible comprende deflectores internos configurados para dividir en segmentos al menos una porción del tubo.

3. Un reactor de acuerdo con la reivindicación 2, en el que cada segmento tiene una altura y un diámetro que son del mismo orden de magnitud para facilitar la convección dentro del segmento y/o los deflectores internos son móviles con respecto al tubo de combustible para impartir fuerzas oscilantes a la sal fundida dentro del tubo.

4. Un reactor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada tubo de combustible tiene un diámetro de al menos 5 mm, y/o en el que cada tubo tiene forma de U, estando configurado el reactor para generar flujo de sal de combustible oscilante dentro del tubo aplicando una presión de gas oscilante a uno o ambos extremos del tubo.

5. Un reactor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que uno o más de los tubos se forman como una hélice poco profunda y/o una porción superior de cada tubo es no lineal para impedir que los neutrones pasen directamente hacia arriba del tubo y fuera del reactor.

6. Un reactor de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que cada tubo comprende un sensor de temperatura configurado para determinar la temperatura de la sal fundida de material fisionable por cualquiera de:

propiedades de la luz emitida por la sal fundida de material fisionable;
 una cantidad de expansión del material fisionable;
 una frecuencia acústica resonante de una columna de gas en el tubo.

7. Un reactor de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el líquido refrigerante contiene una proporción suficiente de un material absorbente de neutrones para proteger sustancialmente un depósito contenedor del líquido de neutrones emitidos por el núcleo y/o en el que el líquido refrigerante es una sal metálica fundida contenida dentro de un depósito único, y la circulación del líquido refrigerante es conducida solamente por convección natural.

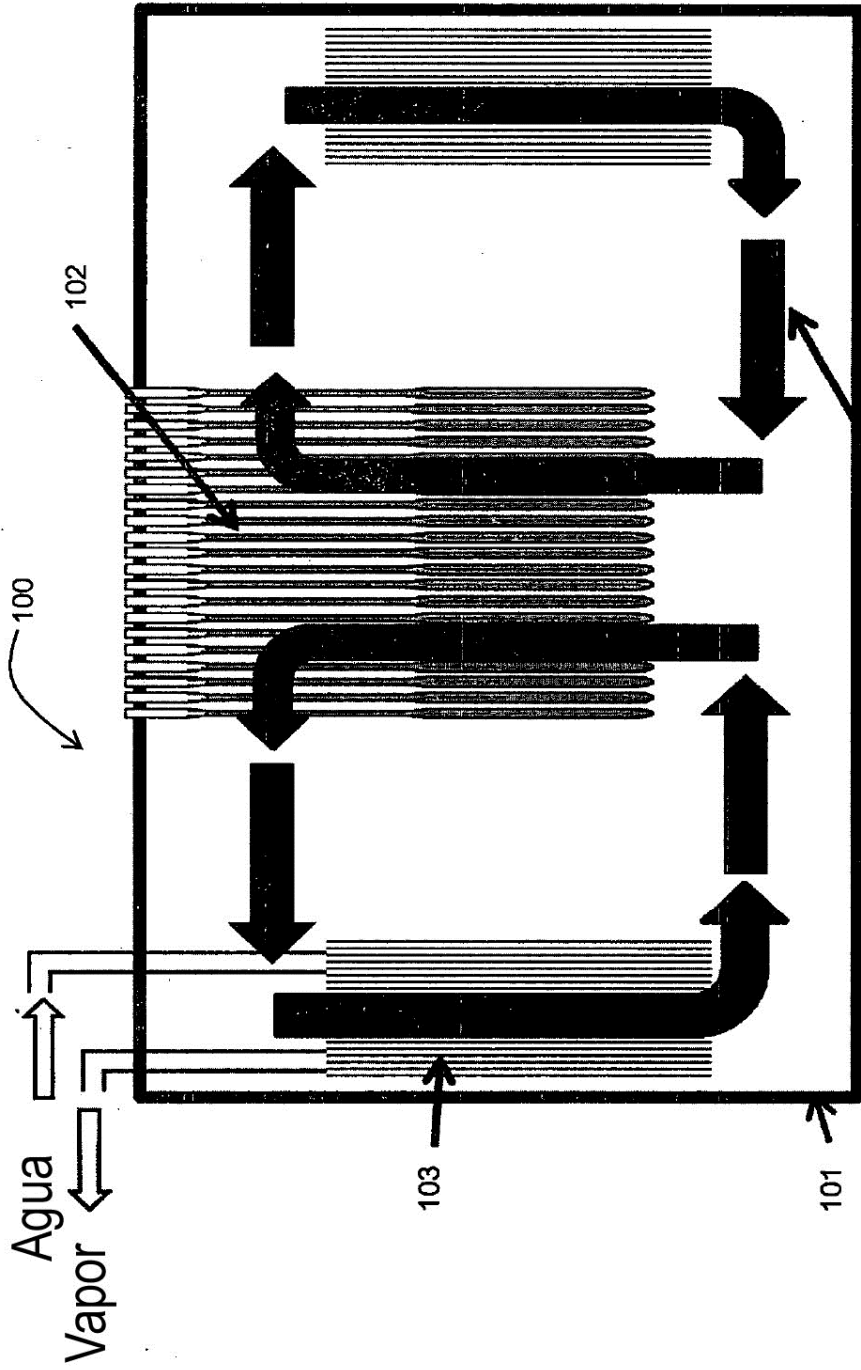
8. Un reactor de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el líquido refrigerante contiene un isótopo fértil que produce un isótopo fisionable criado bajo flujo de neutrones

9. Un reactor de acuerdo con la reivindicación 8, en donde el reactor comprende una capa de metal fundido en contacto con el líquido refrigerante, siendo el metal fundido tal que el isótopo fisionable criado es soluble en el metal fundido, comprendiendo además el reactor un sistema para extraer el líquido fundido metálico y que comprende opcionalmente un sistema para hacer circular el metal fundido de modo que se extrae de la capa de metal fundido y se reintroduce en el líquido refrigerante como una pulverización o una pluralidad de columnas, en donde el metal fundido se pasa al intercambiador de calor antes de ser reintroducido.

10. Un reactor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el intercambiador de calor comprende un conjunto de tubos dentro del líquido refrigerante, conteniendo los tubos un líquido y/o un gas que circulan a través del conjunto de tubos, en donde el líquido y/o el gas son cualquiera de:

agua;
 vapor;
 agua y vapor;

- helio;
dióxido de carbono;
aire;
nitrógeno;
5 un metal fundido o una sal metálica.
11. Un reactor de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que los tubos de combustible están formados de cualquiera de:
- 10 una aleación de molibdeno;
molibdeno puro;
un material compuesto de carbono; y
carburo de silicio
- 15 y/o en el que los tubos de combustible comprenden o contienen un metal que tiene una reactividad con halógenos intermedia entre el material del tubo de combustible y los isótopos fisionables.
12. Un reactor de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que el núcleo comprende además un material moderador de neutrones, en donde dicho material moderador de neutrones se proporciona opcionalmente en tubos moderadores dentro del conjunto de tubos de combustible.
- 20 13. Un reactor de acuerdo con cualquier reivindicación anterior, en el que la densidad de número de tubos de combustible se reduce hacia el centro del conjunto de tubos de combustible y/o la concentración de isótopos fisionables y/o fértiles dentro de los tubos de combustible aumenta hacia el exterior del conjunto de los tubos de combustible.
- 25 14. Un reactor de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las sales fundidas de isótopos fisionables comprenden trihaluros de los isótopos fisionables.
- 30 15. Un método de funcionamiento de un reactor de fisión nuclear que comprende un núcleo, una piscina de líquido refrigerante y un intercambiador de calor, comprendiendo el núcleo una serie de tubos de combustible hueco, cada uno de los cuales contiene la sal fundida de uno o más isótopos fisionables, estando la serie de tubos de combustible al menos parcialmente sumergidos en la piscina de líquido refrigerante y comprendiendo una región crítica, donde la densidad de los isótopos fisionables durante el funcionamiento del reactor es suficiente para provocar una reacción de fisión autosostenida, comprendiendo el método:
- 35 contener la sal fundida completamente dentro de los tubos de combustible;
transferir calor de la sal fundida en cada tubo de combustible al exterior de dicho tubo y, por lo tanto, al refrigerante usando uno o más de:
- 40 convección natural de la sal fundida;
agitación mecánica de la sal fundida;
flujo de sal fundida oscilante dentro del tubo de combustible; y
ebullición de la sal fundida dentro del tubo de combustible; y
- 45 extraer calor del refrigerante usando el intercambiador de calor.



Trayectoria de circulación de refrigerante

Figura 1

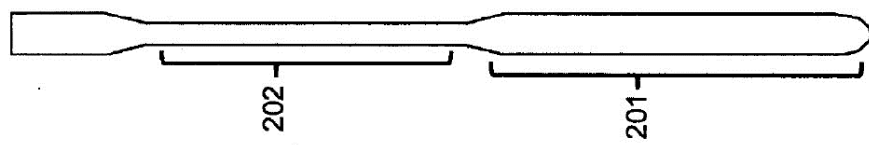


Figure 2



Figure 4

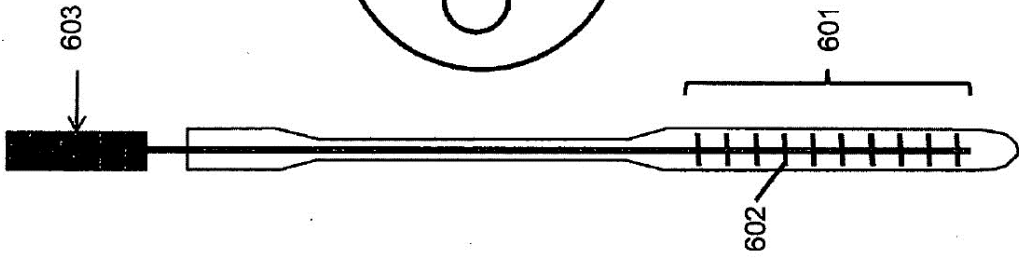


Figure 6

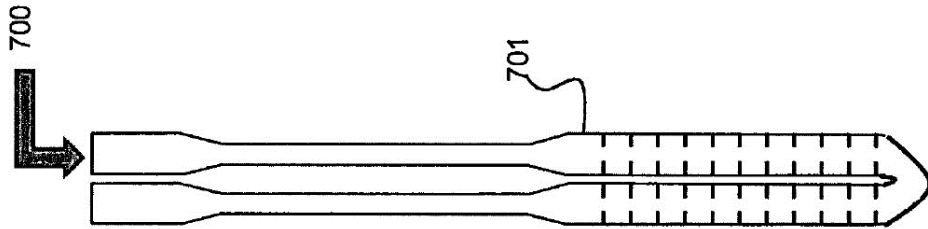


Figure 7

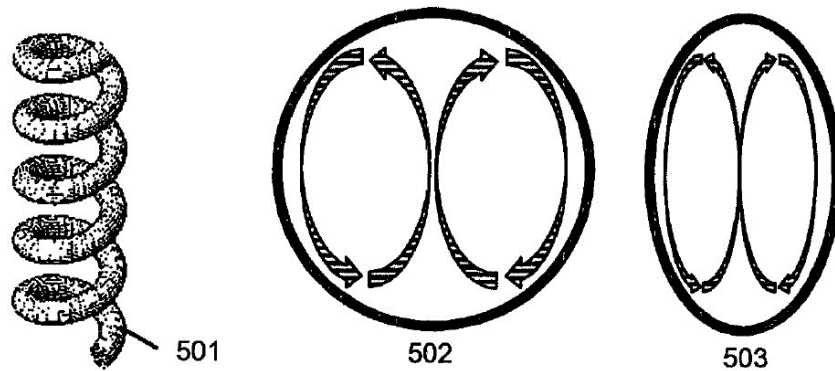


Figura 5

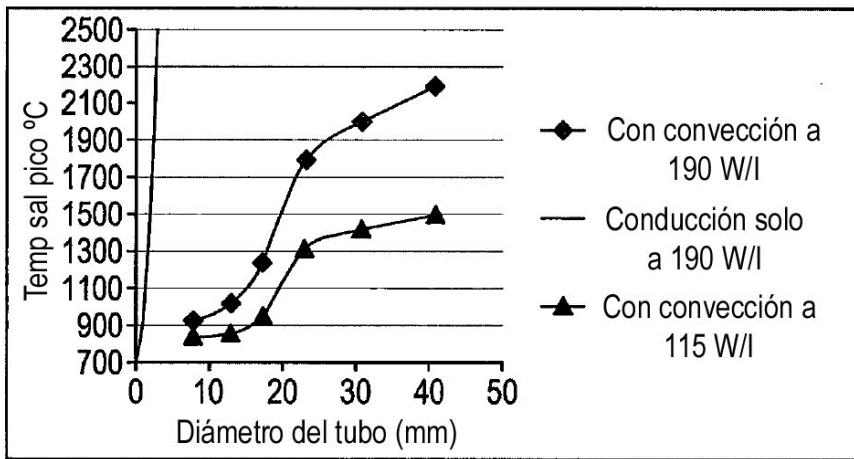


Figura 3

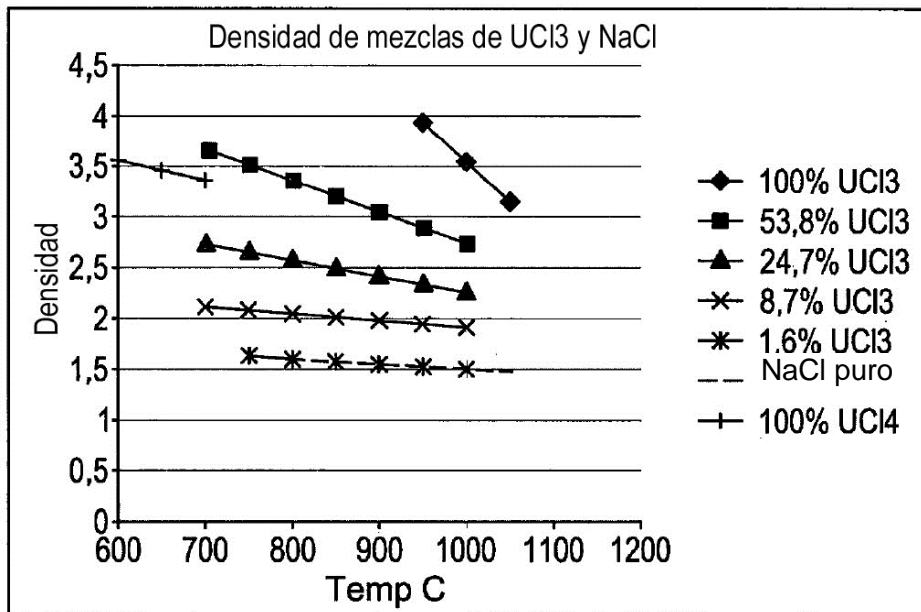


Figura 10

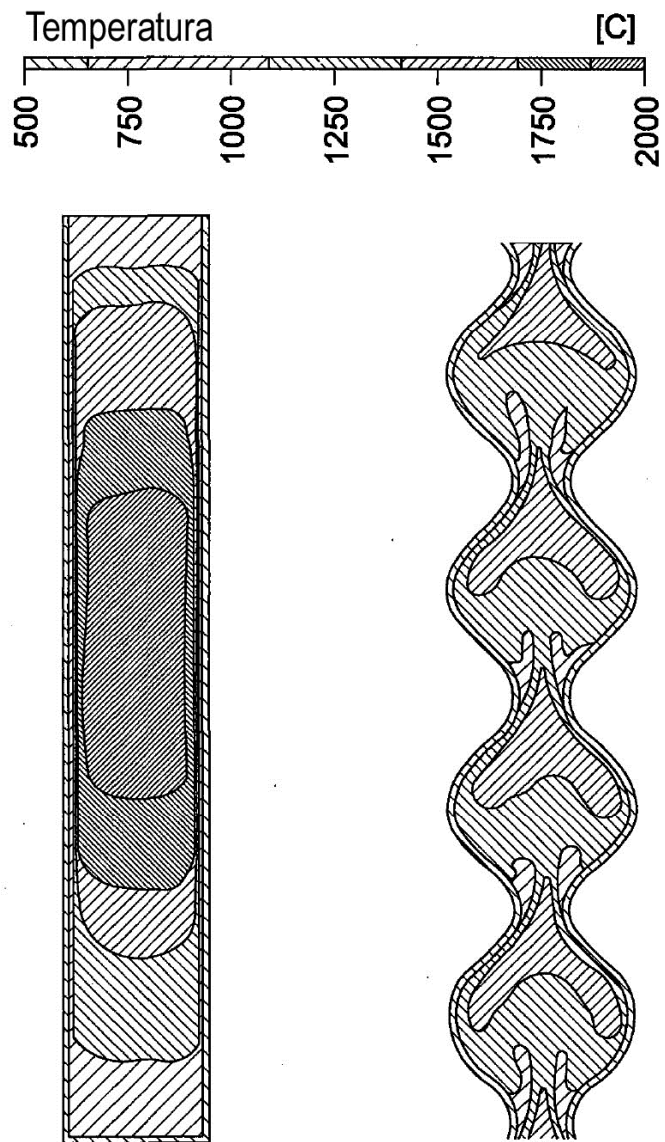


Figura 8

