

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 018 270**

51 Int. Cl.:

G21C 3/60	(2006.01)
G21C 3/04	(2006.01)
G21C 9/033	(2006.01)
G21C 3/07	(2006.01)
G21C 3/20	(2006.01)
G21C 7/04	(2006.01)
G21C 21/02	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.10.2018 PCT/US2018/058158**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **27.06.2019 WO19125604**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.10.2018 E 18892438 (5)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.12.2024 EP 3704714**

54 Título: **Sistema de combustible nuclear de alta temperatura para reactores térmicos de neutrones**

30 Prioridad:

31.10.2017 US 201762579340 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
14.05.2025

73 Titular/es:

**WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC
(100.00%)
1000 Westinghouse Drive Suite 141
Cranberry Township, PA 16066, US**

72 Inventor/es:

**LAHODA, EDWARD J.;
XU, PENG;
OELRICH, ROBERT L., JR.;
BOYLAN, FRANK A.;
SHAH, HEMANT;
RAY, SUMIT;
FRANCESCHINI, FAUSTO;
ROMERO, JAVIER y
WRIGHT, JONATHAN**

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 3 018 270 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

Sistema de combustible nuclear de alta temperatura para reactores térmicos de neutrones

5 **Declaración sobre los derechos gubernamentales**

Esta invención se realizó con apoyo gubernamental en virtud del contrato N.º DE-NE0008222 otorgado por el Departamento de Energía. El Gobierno de los Estados Unidos tiene ciertos derechos sobre esta invención.

10 **Antecedentes de la invención**

1. Campo de la invención

La invención se refiere a combustible nuclear y, más específicamente, a un combustible tolerante a accidentes para su uso en reactores de agua ligera y pesada.

2. Descripción del estado de la técnica

Entre los materiales fisibles para su uso como combustible nuclear figuran el dióxido de uranio (UO_2), dióxido de plutonio (PuO_2), nitruro de uranio (UN) con nitrógeno natural o con nitrógeno enriquecido en el isótopo ^{15}N , y/o disiliciuro de triuranio (U_3Si_2), típicamente en forma de pastillas. Las varillas de combustible están encerradas en un revestimiento que actúa como un contenedor para el material fisible. El revestimiento tiene preferiblemente la forma de una estructura alargada, tal como un tubo, y la varilla de combustible incluye una pluralidad de pastillas apiladas en el tubo de revestimiento. En una varilla de combustible típica, los extremos superior e inferior de la varilla están cerrados con extremos protegidos y un resorte u otro dispositivo para empujar las pastillas de combustible entre sí en la pila se coloca dentro del revestimiento en un extremo de la varilla de combustible. En un reactor, las varillas de combustible se agrupan en una matriz que está organizada para proporcionar un flujo de neutrones en el núcleo suficiente para soportar una alta tasa de fisión nuclear y la liberación de una gran cantidad de energía en forma de calor.

El UO_2 es actualmente un combustible nuclear ampliamente utilizado. Aunque es susceptible a la oxidación por agua y vapor, el U_3Si_2 es el material combustible preferido para los sistemas de combustible tolerantes a accidentes (ATF). El U_3Si_2 tiene una alta densidad ($12,2 \text{ g/cm}^3$), una conductividad térmica muy alta (hasta 5 veces la del UO_2) y un punto de fusión de $1665 \text{ }^\circ\text{C}$. Sin embargo, hasta la fecha, su uso se ha limitado a las varillas de ensayo de plomo en reactores de prueba, donde está enterrado en un grueso revestimiento de aluminio que hace poco probable la exposición al agua y al refrigerante, y donde los absorbedores integrales de combustible inflamable (IFBA) no son un componente obligatorio del combustible.

Para ser tolerantes a los accidentes, los componentes de combustible nuclear están diseñados para accidentes que pueden provocar temperaturas del combustible de aproximadamente $1700 \text{ }^\circ\text{C}$, suponiendo que se añada una cantidad mínima de refrigerante en el conjunto combustible. Los combustibles nucleares se han combinado con un revestimiento de aleación de zirconio recubierto. Debido a la capacidad del zirconio recubierto de expandirse con la pastilla en expansión durante la vida útil del material fisible, el espacio entre la pastilla y el revestimiento, que es una fuente importante de resistencia a la transferencia térmica de calor, puede ser pequeño, manteniendo la temperatura de la línea central por debajo del punto de fusión en todas las condiciones transitorias. Por lo tanto, el punto de fusión relativamente bajo del U_3Si_2 no es un problema porque la muy alta conductividad térmica del U_3Si_2 evita los problemas de fusión en la línea central del combustible durante transitorios de potencia inesperados.

En condiciones severas, como accidentes "más allá de lo previsto en el diseño"; el revestimiento metálico puede reaccionar exotérmicamente con vapor a más de $1093 \text{ }^\circ\text{C}$. Los metales de revestimiento de zirconio que protegen el combustible nuclear pueden perder fuerza durante un accidente por "pérdida de refrigerante", donde las temperaturas del reactor pueden alcanzar hasta $1204 \text{ }^\circ\text{C}$ y expandirse debido a los gases de fisión interna dentro de la varilla de combustible.

El punto de fusión de una mezcla de dos o más sólidos (como una aleación) depende de las proporciones relativas de los ingredientes. Se forma una mezcla eutéctica de bajo punto de fusión cuando los sólidos están en proporciones tales que el punto de fusión de la mezcla es lo más bajo posible. En el caso de aleaciones utilizadas en situaciones donde los puntos de fusión relativamente bajos pueden crear problemas imprevistos, idealmente se evita la formación de mezclas eutécticas o se minimizan idealmente las consecuencias indeseables de la formación de una mezcla eutéctica.

El documento US 4 717 534 enseña una varilla de combustible que incluye una capa de revestimiento intermedia que comprende una aleación de zirconio mezclada con un absorbedor integral de combustible inflamable que contiene boro.

Las sugerencias para proteger y fortalecer los revestimientos de Zr incluyen recubrir la aleación de Zr, pero la formación de una mezcla eutéctica puede presentar un problema para los revestimientos de aleación de Zr recubiertos. Si bien un revestimiento de aleación de Zr recubierto, por ejemplo, con Cr inicialmente proporciona hasta $300 \text{ }^\circ\text{C}$ más de tolerancia a la temperatura que un revestimiento de Zr solo, este aumento de tolerancia se produce a expensas de una menor resistencia del revestimiento debido a la formación de una capa eutéctica líquida formada entre el

recubrimiento de Cr y el revestimiento de aleación de Zr, lo que reduce la temperatura de fusión del revestimiento recubierto, dejando al combustible susceptible de sufrir accidentes por pérdida de refrigerante.

5 Si se va a utilizar U_3Si_2 en la generación de energía nuclear comercial, deben tenerse en cuenta las consideraciones que no son necesarias para los usos de prueba a menor escala.

Resumen de la invención

10 El siguiente resumen se proporciona para facilitar la comprensión de algunas de las características innovadoras exclusivas de las realizaciones descritas y no pretende ser una descripción completa. Se puede obtener una apreciación completa de los diversos aspectos de las realizaciones tomando la memoria descriptiva completa, las reivindicaciones y el resumen en su conjunto.

15 En el presente documento se describe una varilla de combustible mejorada tolerante a accidentes para su uso en reactores de agua ligera y pesada. La varilla de combustible incluye, en diversos aspectos, un combustible nuclear seleccionado del grupo que consiste en U_3Si_2 y UN, en forma de pastilla, un absorbedor integral de combustible inflamable que contiene boro entremezclado con el combustible nuclear de la pastilla, y un material de revestimiento que contiene zirconio para alojar el absorbedor integral de combustible inflamable entremezclado con el combustible nuclear de la pastilla, teniendo el material de revestimiento un recubrimiento aplicado al mismo.

20 El recubrimiento se puede seleccionar del grupo que consiste en Cr o una aleación de Cr. La aleación de Cr puede ser FeCrAl y FeCrAlY.

25 En ciertos aspectos de la varilla de combustible, se dispone una capa intermedia entre el material de revestimiento y el recubrimiento. La capa intermedia puede tener un espesor de 1 a 20 micrómetros. La capa intermedia se puede seleccionar del grupo que consiste en Mo, Ta, W y Nb.

30 La capa intermedia se puede aplicar a la superficie exterior del material de revestimiento mediante un proceso de pulverización en caliente, tal como un proceso de arco de plasma, o mediante un proceso de pulverización en frío.

En diversos aspectos, el recubrimiento puede tener un espesor de 5 a 50 micrómetros, y se puede aplicar al material de revestimiento, o a la capa intermedia en aquellas realizaciones donde se incluye una capa intermedia, mediante un proceso de pulverización en frío.

35 El absorbedor integral de combustible inflamable se puede seleccionar del grupo que consiste en UB_2 y ZrB_2 , y se mezcla con el combustible nuclear en la pastilla. El contenido del absorbedor inflamable entremezclado en la pastilla de combustible puede estar entre 100 ppm y 10000 ppm.

40 Es decir, la mayor parte del absorbedor puede estar en una fase distinta a la de UB_2 .

Breve descripción de los dibujos

45 Las características y ventajas de la presente descripción pueden entenderse mejor haciendo referencia a las figuras adjuntas.

La Figura 1A es una vista en sección lateral de una varilla de combustible ilustrativa que muestra una pila de pastillas de combustible recubiertas alojadas en un revestimiento recubierto.

50 La Figura 1B es una sección transversal de la varilla de combustible y de la pastilla de combustible a través de la línea 1B-1B de la Figura 1A.

55 La Figura 2A es una vista en sección lateral de una varilla de combustible ilustrativa que muestra una pila de pastillas de combustible sin recubrimiento alojadas en un revestimiento que tiene una capa intermedia dispuesta entre el revestimiento y el recubrimiento.

La Figura 2B es una sección transversal de la varilla de combustible y de la pastilla de combustible a través de la línea 2B-2B de la Figura 2A.

60 La Figura 3 es un diagrama de fases que muestra el rango de temperatura eutéctica para las concentraciones porcentuales atómicas relativas de combinaciones de niobio (Nb) y zirconio (Zr). El diagrama de fases representa las concentraciones relativas de Nb y Zr a lo largo del eje horizontal y la temperatura a lo largo del eje vertical. El punto eutéctico es el punto en que la fase líquida (L) limita directamente con la fase sólida (compuesta tanto de Nb como de Zr), lo que representa la temperatura mínima de fusión de cualquier posible aleación de Nb y Zr.

65 La Figura 4 es un diagrama de fases que muestra el rango de temperatura eutéctica para las concentraciones porcentuales atómicas relativas de combinaciones de niobio (Nb) y cromo (Cr).

Descripción de las realizaciones preferidas

- 5 Tal como se usa en el presente documento, la forma singular de “un”, “una”, “el” y “la” incluye las referencias en plural a menos que el contexto indique claramente lo contrario. Por tanto, los artículos “un” y “una” se usan en el presente documento para referirse a uno(a) o más de uno(a) (es decir, al menos uno(a)) del objeto gramatical del artículo. A modo de ejemplo, “un elemento” significa un elemento o más de un elemento.
- 10 Las expresiones direccionales utilizadas en el presente documento, tales como, por ejemplo y sin limitación, arriba, abajo, izquierda, derecha, inferior, superior, frontal, posterior y sus variaciones, se referirán a la orientación de los elementos que se muestran en el dibujo adjunto y no limitan las reivindicaciones a menos que se indique expresamente lo contrario.
- 15 En la presente solicitud, incluidas las reivindicaciones, excepto cuando se indique lo contrario, debe entenderse que todos los números que expresan cantidades, valores o características están modificados en todos los casos por el término “aproximadamente”. Por tanto, los números pueden leerse como si estuvieran precedidos por la palabra “aproximadamente”, aunque el término “aproximadamente” no aparezca expresamente con el número. En consecuencia, a menos que se indique lo contrario, cualquier parámetro numérico establecido en la siguiente descripción puede variar dependiendo de las propiedades deseadas que se buscan obtener en las composiciones y métodos según la presente descripción. Como mínimo, y no como un intento de limitar la aplicación de la doctrina de los equivalentes al alcance de las reivindicaciones, cada parámetro numérico descrito en la presente descripción debe al menos ser interpretado a la luz del número de dígitos significativos informados y aplicando técnicas de redondeo ordinarias.
- 20 Además, cualquier rango numérico mencionado en el presente documento pretende incluir todos los subrangos incluidos en el mismo. Por ejemplo, un rango de “1 a 10” pretende incluir todos y cada uno de los subrangos entre (e incluidos) el valor mínimo citado de 1 y el valor máximo citado de 10, es decir, tiene un valor mínimo igual o superior a 1 y un valor máximo igual o inferior a 10.
- 25 El combustible mejorado es adecuado para su uso en reactores de agua ligera y reactores de agua pesada. Los reactores de agua ligera (LWR) son reactores que utilizan agua corriente como refrigerante, incluidos los reactores de agua hirviendo (BWR) y los reactores de agua presurizada (PWR), los tipos más comunes que se utilizan en los Estados Unidos. Un reactor de agua pesada (HWR) usa agua pesada, es decir, óxido de deuterio (D_2O) como refrigerante y/o moderador. El refrigerante de agua pesada se mantiene bajo presión, lo que permite calentarlo a temperaturas más altas sin hervir, como en un reactor de agua presurizada.
- 30 Haciendo referencia a las figuras adjuntas, una varilla 10 de combustible mejorada y tolerante a accidentes combina las resistencias de cada uno de los revestimientos 12 de zirconio recubiertos, U_3Si_2 o pastillas 14 de combustible de UN, y un material que contiene boro, tal como el UB_2 o un ZrB_2 , como un absorbedor integral de combustible inflamable. Un espacio 16 separa el interior del revestimiento 12 de las pastillas 14 de combustible. El revestimiento 12 puede, en diversos aspectos, comprender zirconio o una aleación de zirconio. El absorbedor integral de combustible inflamable puede formar un recubrimiento 22 sobre la pastilla 14 de combustible, como se muestra en la Figura 1B, o puede entremezclarse con el material fisible de la pastilla 14, como se muestra en la Figura 2B.
- 35 El U_3Si_2 es particularmente útil para su uso con revestimientos de aleación de zirconio recubiertos porque el espacio inicial 16 entre la pastilla y el combustible puede ser pequeño, debido a la capacidad del revestimiento 12 de zirconio recubierto de expandirse a medida que la pastilla 14 crece a medida que aumenta la combustión del combustible durante su vida útil, y al hecho de que el revestimiento recubierto 12 se arrastrará hacia el combustible durante el período inicial de uso del combustible. En las diversas reacciones del proceso para fabricar U_3Si_2 , se pueden formar constituyentes distintos del U_3Si_2 .
- 40 El combustible U_3Si_2 en diversos aspectos tiene una densidad entre el 80 % y el 99 % de la densidad teórica. El U_3Si_2 tiene una densidad de $12,2 \text{ g/cm}^3$. La pastilla de combustible de U_3Si_2 puede tener una densidad entre $9,76 \text{ g/cm}^3$ y $12,08 \text{ g/cm}^3$.
- 45 Un combustible alternativo puede ser UN, en donde el contenido de nitrógeno puede ser uno o una combinación de nitrógeno natural y nitrógeno enriquecido en el isótopo de ^{15}N . El combustible de UN tiene una densidad entre el 80 % y el 99 % de la densidad teórica. El UN tiene una densidad aún mayor que el U_3Si_2 . La pastilla terminada 14 puede incluir constituyentes que contienen U y N distintos del UN entre el 0 % y el 100 %.
- 50 En diversos aspectos, la aleación de zirconio del revestimiento 12 puede recubrirse con ZIRLO™, fabricado según los procedimientos descritos en la patente estadounidense N.º 4.649.023. ZIRLO™ es una aleación que comprende, en porcentaje en peso, 0,5-2,0 de niobio, 0,7-1,5 de estaño, 0,07-0,14 de hierro y 0,03-0,14 de al menos uno de los componentes de níquel y cromo, y al menos 0,12 en total de hierro, níquel y cromo, y hasta 220 ppm de C, y el resto es esencialmente zirconio. Preferiblemente, la aleación contiene 0,03-0,08 de cromo y 0,03-0,08 de níquel. Los expertos en la materia apreciarán que otras aleaciones de zirconio pueden ser aceptables para su uso en una aplicación deseada. En ciertos aspectos, el revestimiento de aleación de Zr puede estar hecho de AXIOM™, una
- 55
- 60
- 65

- aleación basada en Zr que generalmente comprende del 0,2 al 1,5 por ciento en peso de niobio, del 0,01 al 0,6 por ciento en peso de hierro, del 0,0 al 0,8 por ciento en peso de estaño, del 0,0 al 0,5 por ciento en peso de cromo, del 0,0 al 0,3 por ciento en peso de cobre, del 0,0 al 0,3 por ciento en peso de vanadio, del 0,0 al 0,1 por ciento en peso de níquel y un resto de al menos el 97 por ciento en peso de zirconio, incluidas las impurezas. En ciertos aspectos, la aleación de Zr puede comprender del 0,4 al 1,5 por ciento en peso de niobio, del 0,4 al 0,8 por ciento en peso de estaño, del 0,05 al 0,3 por ciento en peso de hierro, del 0,0 al 0,5 por ciento en peso de cromo y el resto al menos el 97 por ciento en peso de zirconio, incluidas las impurezas. Véase, por ejemplo, las patentes estadounidenses N.º 9.284.629 y 9.725.791.
- El absorbedor integral de combustible inflamable puede ser UB_2 o ZrB_2 . El UB_2 tiene una alta densidad ($12,7 \text{ g/cm}^3$) y un alto punto de fusión ($2430 \text{ }^\circ\text{C}$), pero no se puede utilizar como combustible debido a su reactividad con el agua. El boro se presenta naturalmente como isótopos estables B10 y B11, siendo el B11 aproximadamente el 80 % y el B10 aproximadamente el 20 % del boro natural. El isótopo B10 no se puede usar en un combustible en grandes cantidades porque el isótopo B10 tiene una sección transversal de neutrones muy grande que haría imposible iniciar un reactor si hubiera una gran cantidad de UB_2 en el núcleo. Por lo tanto, si se utilizara el UB_2 como combustible, habría que eliminar la mayor parte de B10 para que solo quedaran entre 100 y 1000 partes por millón (ppm). Esto aumentaría el coste del combustible y lo haría antieconómico en relación con el UO_2 o el U_3Si_2 . El boro, cuando se usa como un absorbedor integral de combustible inflamable, se puede pulverizar en cantidades muy pequeñas en el exterior de las pastillas de combustible en forma de UB_2 o ZrB_2 para formar el recubrimiento 22. Se sabe que el ZrB_2 , al igual que el UB_2 , interactúa con el oxígeno (por ejemplo, en el UO_2 en los casos en que se usa el UO_2 como material fisible) para formar BO_x (donde x es un número indicativo de una fase diferente) durante el proceso de sinterización, expulsando el boro contenido en la pastilla 14. En el proceso de fabricación del UB_2 , se pueden formar otros constituyentes. Cuando el absorbedor integral inflamable es UB_2 , puede haber componentes UB_x donde x es un número entero o una fracción de los mismos, como $UB_{1,5}$, UB_4 , UB_6 o UB_{12} , o alguna otra fase.
- En el sistema de combustible descrito en el presente documento, los componentes que contienen boro pueden añadirse al polvo de material fisible que forma la pastilla 14 de combustible, proporcionando así un enorme ahorro de costes en comparación con la pulverización de compuestos de boro como un recubrimiento uniforme y muy fino sobre la superficie exterior de todas las pastillas. El absorbedor integral inflamable que contiene boro descrito en el presente documento no interactúa con el U_3Si_2 cuando se usa U_3Si_2 como material fisible. Por lo tanto, se puede añadir directamente al polvo de U_3Si_2 antes de la granulación y se puede sinterizar con un gran ahorro de costes y un aumento de la calidad debido a la uniformidad lograda mediante este enfoque en comparación con los métodos de pulverización utilizados hasta ahora. Dado que se puede añadir más UB_2 y ZrB_2 a la pastilla, no es necesario enriquecer el contenido de isótopos B10 que había sido necesario para minimizar el espesor del recubrimiento, lo que se traduce en un importante ahorro de costes adicional. El absorbedor integral inflamable que contiene boro usado en el sistema de combustible descrito en el presente documento puede tener un contenido de isótopos B10 del 1 % al 90 % del boro. Como el UB_2 también tiene una densidad muy alta, las tasas de adición más altas no afectan significativamente a la densidad total de uranio de la pastilla de U_3Si_2 .
- Haciendo referencia a las Figuras 2A y 2B, la varilla 10 de combustible utiliza un revestimiento 12 de aleación de zirconio con un recubrimiento 18, pero más preferiblemente un recubrimiento 18 con una capa intermedia 20. La capa intermedia puede tener un espesor de 1 a 20 micrómetros. El recubrimiento se puede seleccionar del grupo que consiste en Cr y aleaciones de Cr. La aleación de Cr puede ser, por ejemplo, FeCrAl o FeCrAlY.
- La capa intermedia se puede seleccionar del grupo que consiste en Mo, Ta, W y Nb. Cuando la capa intermedia es de Nb, por ejemplo, proporciona muy pocos fallos de fuga y resistencia a temperaturas muy altas ($\sim 1700 \text{ }^\circ\text{C}$) durante accidentes que van más allá del diseño. La capa exterior 18 de Cr duro o aleación de Cr proporciona una tasa de fallos por fuga muy baja que permite el uso de U_3Si_2 y UB_2 o ZrB_2 sensibles al agua. El U_3Si_2 proporciona la alta densidad para una excelente economía de operación y la alta conductividad térmica y la temperatura de fusión razonable requeridas para una buena operatividad del reactor.
- En diversos aspectos, la pastilla 14 con o sin recubrimiento 22 puede combinarse con el revestimiento 12 que tiene tanto la capa intermedia 20 como la capa exterior 18. En diversos aspectos, la pastilla 14 con o sin recubrimiento 22 puede combinarse con el revestimiento 12 que tiene la capa 18 de recubrimiento, sin la capa intermedia 20.
- En ciertas realizaciones, el combustible de U_3Si_2 revestido con aleación de zirconio recubierto que tiene un absorbedor integral de combustible inflamable que contiene boro descrito en el presente documento aprovecha los puntos fuertes de cada uno de los componentes. El combustible de U_3Si_2 tiene una temperatura operativa baja, una alta conductividad térmica y una alta densidad. El revestimiento 12 recubierto de Zr tiene una alta temperatura de descomposición, que protege el combustible de U_3Si_2 . El punto de fusión y el contenido de boro del absorbedor integral inflamable que contiene boro UB_2 o ZrB_2 produce un combustible que optimiza el rendimiento durante la operación normal y proporciona un alto nivel de tolerancia a los accidentes en comparación con la combinación actual de componentes de combustible nuclear alimentados con UO_2 /revestidos con Zr.
- Esta combinación de características de la varilla 10 de combustible mejorada descrita en el presente documento utiliza las mejores características del U_3Si_2 , con recubrimiento de Zr y del UB_2 o ZrB_2 para superar las debilidades inherentes

de cada uno. Por ejemplo, no es factible utilizar combustibles de U_3Si_2 y absorbedores integrales de combustible inflamables de UB_2 en los revestimientos metálicos actuales debido a la tasa de fuga relativamente alta del revestimiento, lo que provoca reacciones inaceptables con el refrigerante, dando como resultado una falla en la varilla de combustible. El uso del revestimiento 12 recubierto de aleación de Cr o Cr con una capa intermedia 20 de Mo, Ta, W o Nb proporciona un revestimiento muy duro con un punto de fusión eutéctico muy alto que reduce drásticamente la posibilidad de fugas de combustible al tiempo que aumenta la capacidad de temperatura del combustible en más de 300 °C por encima del recubrimiento actual de solo Cr. Haciendo referencia a la Figura 3, un diagrama de fases ilustra el eutéctico para la combinación Zr, Nb. El diagrama de fases representa las concentraciones relativas de Nb y Zr a lo largo del eje horizontal y la temperatura a lo largo del eje vertical. El punto eutéctico es el punto en que la fase líquida (L) limita directamente con la fase sólida (compuesta tanto de Nb como de Zr), lo que representa la temperatura mínima de fusión de cualquier posible aleación de Nb y Zr.

La Figura 4 ilustra el diagrama de fases que muestra el eutéctico para la combinación de Nb y Cr. El diagrama de fases representa las concentraciones relativas de Nb y Cr a lo largo del eje horizontal y la temperatura a lo largo del eje vertical. El punto eutéctico es el punto en que la fase líquida (L) limita directamente con la fase sólida (compuesta tanto de Nb como de Cr), lo que representa la temperatura mínima de fusión de cualquier posible aleación de Nb y Cr.

El uso de un absorbedor integral de combustible inflamable que contiene boro, como UB_2 o ZrB_2 , proporciona un medio para controlar la alta reactividad nuclear inicial del U_3Si_2 debido a su alta densidad al proporcionar un medio económico de añadir boro al U_3Si_2 y, en diversos aspectos, añadir suficiente boro al U_3Si_2 en polvo antes de convertirlo en pastilla. Además, el U_3Si_2 no reacciona con el UB_2 o el ZrB_2 , por que, en diversos aspectos alternativos, permite añadir partículas de un absorbedor integral de combustible inflamable que contiene boro al polvo de U_3Si_2 antes de la sinterización.

Los tubos, varillas, gránulos y pastillas descritos en el presente documento pueden mecanizarse o formarse mediante cualquier método conocido por los expertos en la materia. Debido a las estrechas tolerancias de tamaño, configuración y otras propiedades identificadas en el presente documento y a las que se sabe que son relevantes en la industria nuclear, se deben usar métodos de fabricación de precisión.

Las pastillas 14 de combustible pueden formarse mediante métodos conocidos de fabricación de pastillas en otros contextos comerciales. Por ejemplo, el combustible U_3Si_2 , en forma de polvo o de partículas, se puede formar en una pastilla homogeneizando primero las partículas para garantizar una uniformidad relativa en términos de distribución del tamaño de partículas y el área de superficie. Al absorbedor integral de combustible inflamable, UB_2 o ZrB_2 , por ejemplo, también en forma de polvo o partículas, y en ciertos aspectos, se añadirían otros aditivos, tales como lubricantes y agentes formadores de poros. El contenido del absorbedor integral de combustible inflamable en la pastilla de U_3Si_2 puede estar entre 100 ppm y 10000 ppm y, en diversos aspectos, puede ser de aproximadamente 1000 ppm.

Las partículas del absorbedor integral de combustible inflamable de U_3Si_2 y que contiene boro pueden formarse en forma de pastillas comprimiendo la mezcla de partículas en prensas mecánicas o hidráulicas adecuadas disponibles en el mercado para lograr la densidad y resistencia "verdes" deseadas.

Una prensa básica puede incorporar una platina de troquel con capacidad de acción única, mientras que los estilos más complejos tienen múltiples platinas móviles para formar partes "multinivel". Las prensas están disponibles en una amplia gama de capacidades de tonelaje. El tonelaje requerido para prensar el polvo en la forma de pastilla compacta deseada se determina multiplicando el área de superficie proyectada de la parte por un factor de carga determinado por las características de compresibilidad del polvo.

Para comenzar el proceso, la mezcla de partículas se llena en un troquel. La velocidad de llenado del troquel se basa en gran medida en la fluidez de las partículas.

Una vez que se llena el troquel, un punzón se mueve hacia las partículas. El punzón aplica presión a las partículas, compactándolas según la geometría del troquel. En ciertos procesos de granulación, las partículas pueden introducirse en un troquel y prensarse biaxialmente para formar pastillas cilíndricas usando una carga de varios cientos de MPa.

Tras la compresión, las pastillas 14 se sinterizan calentándolas en un horno a temperaturas que varían con el material que se sinteriza en una atmósfera controlada, normalmente compuesta de argón. La sinterización es un proceso térmico que consolida las pastillas verdes al convertir los enlaces mecánicos de las partículas formadas durante la compresión en enlaces más fuertes y pastillas muy reforzadas. Las pastillas comprimidas y sinterizadas se enfrían a continuación y se mecanizan a las dimensiones deseadas. Las pastillas ilustrativas pueden tener aproximadamente un centímetro, o un poco menos, de diámetro y un centímetro, o un poco más, de longitud.

En ciertos aspectos, el absorbedor integral de combustible inflamable no se mezcla con el material fisible en la pastilla 14, sino que se aplica como un recubrimiento 22 a la superficie exterior de la pastilla 14. La aplicación del UB_2 o ZrB_2 a la superficie de la pastilla 14 puede realizarse mediante cualquier método conocido, tal como un método de pulverización u otro método de recubrimiento.

Las pastillas 14 de combustible, recubiertas o entremezcladas con el absorbedor integral de combustible inflamable, se apilan en un revestimiento 12 de aleación de Zr o Zr. El revestimiento 12 se habrá recubierto con un recubrimiento 18 de Cr, que se puede aplicar mediante un proceso de deposición térmica, tal como un proceso de pulverización en frío. Cuando hay dos capas, la capa intermedia 20 de Nb se depositará primero sobre el revestimiento 12 de Zr y se puede moler y pulir antes de la deposición de la capa exterior 18 de Cr, que se puede moler y pulir posteriormente. La capa intermedia 20 puede depositarse usando un método de deposición física de vapor, tal como la deposición física de vapor por arco catódico, o un proceso de pulverización en caliente, tal como un método de pulverización por arco de plasma.

La deposición de vapor por arco catódico implica un material fuente y un sustrato a recubrir colocados en una cámara de deposición evacuada. La cámara contiene solo una cantidad relativamente pequeña de gas. El cable negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (CC) está conectado al material fuente (el "cátodo") y el cable positivo está conectado a un ánodo. En muchos casos, el conductor positivo está unido a la cámara de deposición, convirtiendo así a la cámara en el ánodo. El arco eléctrico se usa para vaporizar el material del objetivo del cátodo. El material vaporizado se condensa entonces sobre el sustrato, formando la capa deseada.

Un método de pulverización en frío puede proceder suministrando un gas vehículo a un calentador donde el gas vehículo se calienta a una temperatura suficiente para mantener el gas a una temperatura deseada, por ejemplo, de 100 °C a 500 °C, después de la expansión del gas a medida que pasa a través de una boquilla. En diversos aspectos, el gas vehículo puede precalentarse a una temperatura entre 200 °C y 1200 °C, con una presión, por ejemplo, de 5,0 MPa. En ciertos aspectos, el gas vehículo puede precalentarse a una temperatura entre 200 °C y 1000 °C, o en ciertos aspectos, entre 300 °C y 900 °C y, en otros aspectos, entre 500 °C y 800 °C. La temperatura dependerá del coeficiente de enfriamiento Joule-Thomson del gas particular usado como vehículo. El hecho de que un gas se enfríe o no al expandirse o comprimirse cuando se somete a cambios de presión depende del valor de su coeficiente de Joule-Thomson. Para los coeficientes Joule-Thomson positivos, el gas vehículo se enfría y se debe precalentar para evitar un enfriamiento excesivo que pueda afectar el rendimiento del proceso de pulverización en frío. Los expertos en la materia pueden determinar el grado de calentamiento usando cálculos bien conocidos para evitar un enfriamiento excesivo. Véase, por ejemplo, para el N₂ como gas vehículo, si la temperatura de entrada es de 130 °C, el coeficiente de Joule-Thomson es de 0,1 °C/bar. Para que el gas impacte en el tubo a 130 °C, si su presión inicial es de 10 bar (~146,9 psia) y la presión final es de 1 bar (~14,69 psia), entonces es necesario precalentar el gas a aproximadamente 9 bar * 0,1 °C/bar o de aproximadamente 0,9 °C a aproximadamente 130,9 °C.

Por ejemplo, la temperatura del gas helio como vehículo es preferiblemente de 450 °C a una presión de 3,0 a 4,0 MPa, y la temperatura del nitrógeno como vehículo puede ser de 1100 °C a una presión de 5,0 MPa, pero también puede ser de 600 °C a 800 °C a una presión de 3,0 a 4,0 MPa. Los expertos en la materia reconocerán que las variables de temperatura y presión pueden cambiar dependiendo del tipo de equipo usado y que el equipo puede modificarse para ajustar los parámetros de temperatura, presión y volumen.

Los gases vehículos adecuados son aquellos que son inertes o no son reactivos, y aquellos que particularmente no reaccionarán con las partículas de Cr o la capa intermedia de Nb o el sustrato de Zr que se va a recubrir. Los ejemplos de gases vehículos incluyen nitrógeno (N₂), hidrógeno (H₂), argón (Ar), dióxido de carbono (CO₂) y helio (He).

Existe una flexibilidad considerable con respecto a los gases vehículos seleccionados. Se pueden usar mezclas de gases. La selección está impulsada tanto por la física como por la economía. Por ejemplo, los gases de peso molecular más bajo proporcionan velocidades más altas, pero se deben evitar las velocidades más altas, ya que podrían provocar un rebote de partículas y, por lo tanto, disminuir el número de partículas depositadas.

En un proceso ilustrativo de pulverización en frío, un gas a alta presión entra a través de un conducto hasta un calentador, donde el calentamiento se produce rápidamente; sustancialmente de forma instantánea. Cuando se calienta a la temperatura deseada, el gas se dirige a un instrumento similar a una pistola. Las partículas del material de recubrimiento deseado, en este caso, el Cr, se mantienen en una tolva y se liberan y se dirigen a la pistola, donde son forzadas a través de una boquilla hacia el sustrato de varilla o tubo mediante un chorro de gas presurizado. Las partículas de Cr pulverizadas se depositan sobre la superficie de la varilla o del tubo para formar un recubrimiento compuesto por las partículas.

Tras la deposición del recubrimiento 18, el método puede incluir además el recocido del recubrimiento. El recocido modifica las propiedades mecánicas y la microestructura del tubo recubierto. El recocido implica calentar el recubrimiento en el rango de temperatura de 200 °C a 800 °C, pero preferiblemente entre 350 °C y 650 °C.

El sustrato recubierto también se puede esmerilar, pulir o procesar adicionalmente de otro modo después de las etapas de recubrimiento o recocido mediante cualquiera de una variedad de medios conocidos para lograr un acabado superficial más liso.

La presente invención se ha descrito según varios ejemplos, que pretenden ser ilustrativos en todos los aspectos y no restrictivos. Por lo tanto, la presente invención es capaz de muchas variaciones en la implementación detallada, que pueden derivarse de la descripción contenida en el presente documento por un experto en la materia.

La presente invención se ha descrito con referencia a varias realizaciones de modo de ejemplo e ilustrativas. Se entiende que las realizaciones descritas en el presente documento proporcionan características ilustrativas con detalles variables de varias realizaciones de la invención divulgada.

- 5 Por consiguiente, los expertos en la materia reconocerán que pueden realizarse diversas sustituciones, modificaciones o combinaciones de cualquiera de las realizaciones ilustrativas. Por lo tanto, la invención no está limitada por la descripción de las diversas realizaciones, sino más bien por las reivindicaciones

REIVINDICACIONES

1. Una varilla (10) de combustible tolerante a accidentes para reactores de agua ligera y pesada que comprende:
 - 5 un combustible nuclear seleccionado del grupo que consiste en U_3Si_2 y UN, en forma de pastilla (14);
 - un absorbedor integral de combustible inflamable que contiene boro entremezclado con el combustible nuclear en la pastilla (14); y
 - 10 un material de revestimiento (12) que contiene zirconio para alojar el absorbedor integral de combustible inflamable entremezclado con el combustible nuclear en la pastilla (14), teniendo el material de revestimiento (12) un recubrimiento (18) aplicado al mismo.
2. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1 comprende además una capa intermedia (20) dispuesta entre el material de revestimiento (12) y el recubrimiento (18).
3. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 2, en donde la capa intermedia (20) tiene un espesor de 1 a 20 micrómetros.
4. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 2, en donde la capa intermedia (20) está hecha de molibdeno, tántalo, tungsteno y niobio.
5. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 2, en donde la capa intermedia (20) se aplica al material de revestimiento (12) mediante un proceso de pulverización en caliente.
- 25 6. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 5, en donde el proceso de pulverización en caliente es un proceso de arco de plasma.
7. La varilla de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el recubrimiento se selecciona del grupo que consiste en cromo y una aleación de cromo.
- 30 8. La varilla de combustible mencionada en la reivindicación 7, en donde la aleación de cromo se selecciona del grupo que consiste en FeCrAl y FeCrAlY.
9. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el recubrimiento (18) tiene un espesor de 5 a 50 micrómetros.
- 35 10. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el recubrimiento (18) se aplica al material de revestimiento (12) mediante un proceso de pulverización en frío.
- 40 11. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el absorbedor integral de combustible inflamable se selecciona del grupo que consiste en UB_2 y ZrB_2 .
12. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el contenido del absorbedor integral de combustible inflamable en la pastilla (14) es entre 100 ppm y 10000 ppm.
- 45 13. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el contenido de isótopos B10 del absorbedor integral inflamable está entre el 1 % y el 90 %.
14. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el combustible nuclear comprende U_3Si_2 con una densidad entre el 80 % y el 99 % de la densidad teórica.
- 50 15. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el combustible nuclear comprende UN, seleccionándose el nitrógeno entre nitrógeno natural y nitrógeno enriquecido en el isótopo de ^{15}N , y teniendo el UN una densidad entre el 80 % y el 99 % de la densidad teórica.
- 55 16. La varilla (10) de combustible mencionada en la reivindicación 1, en donde el absorbedor integral de combustible inflamable es UB_2 .

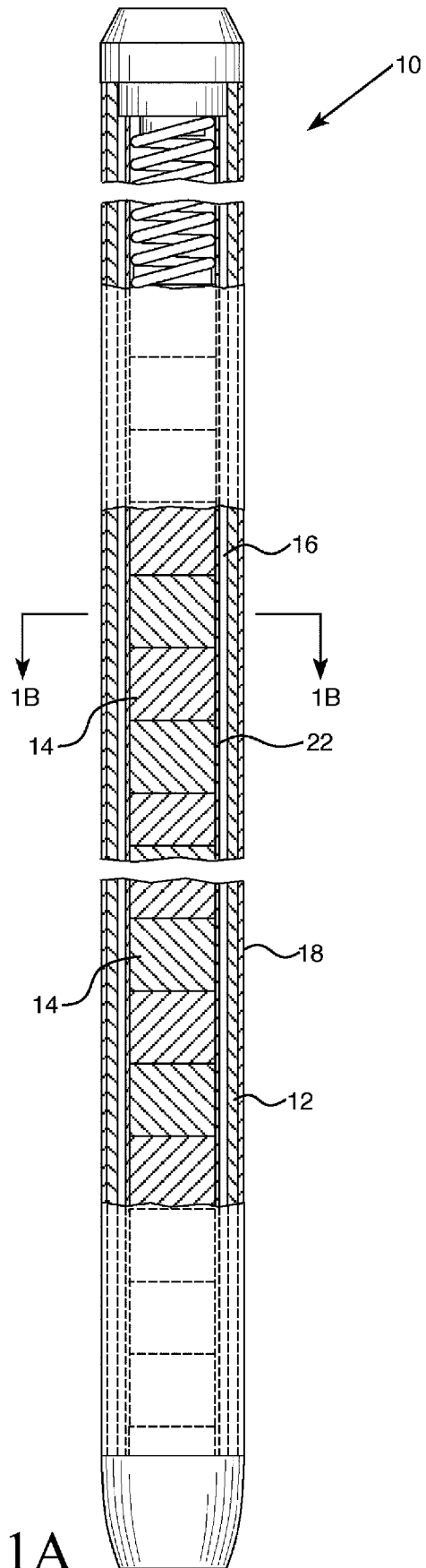


FIGURA 1A

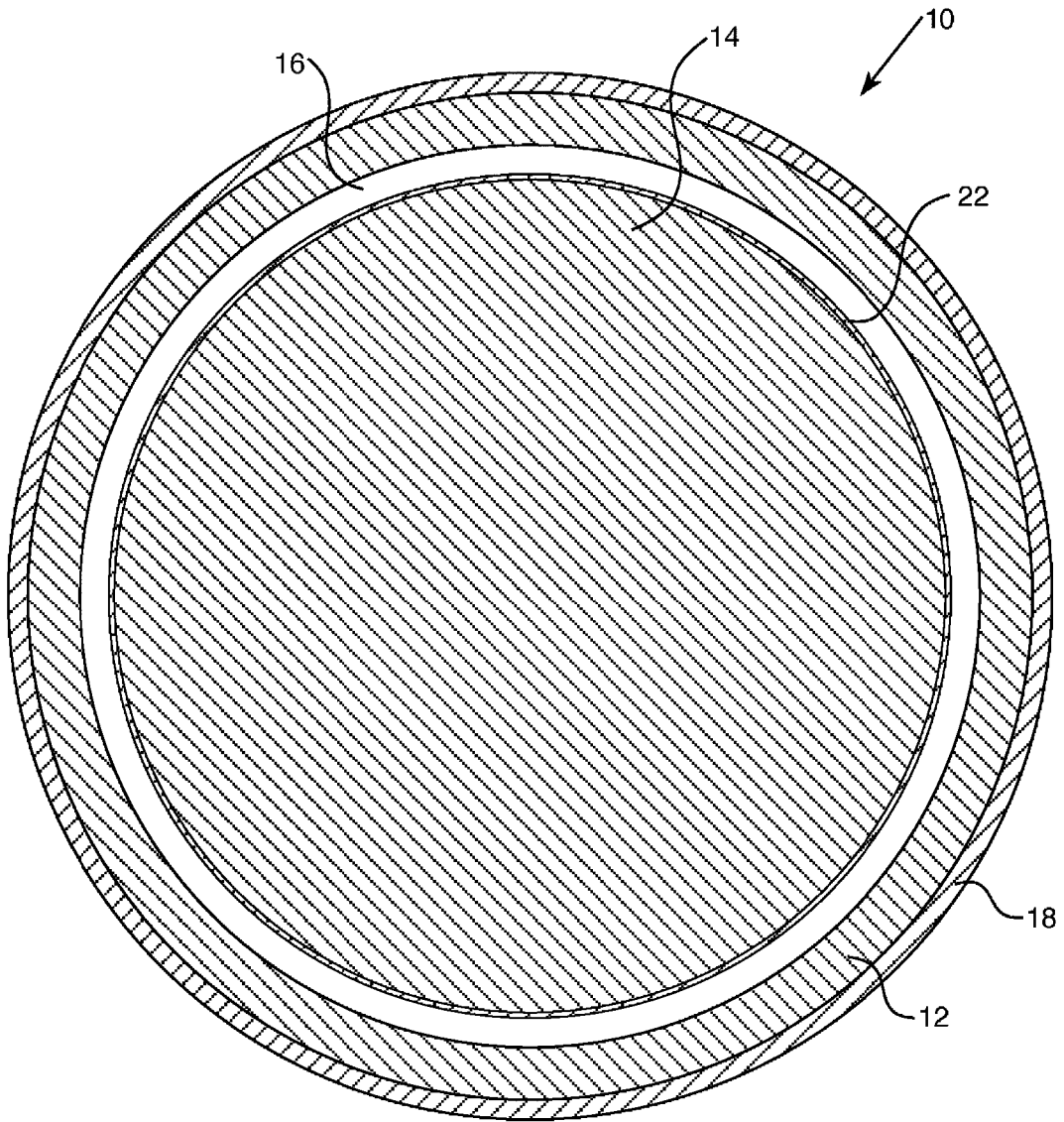


FIGURA 1B

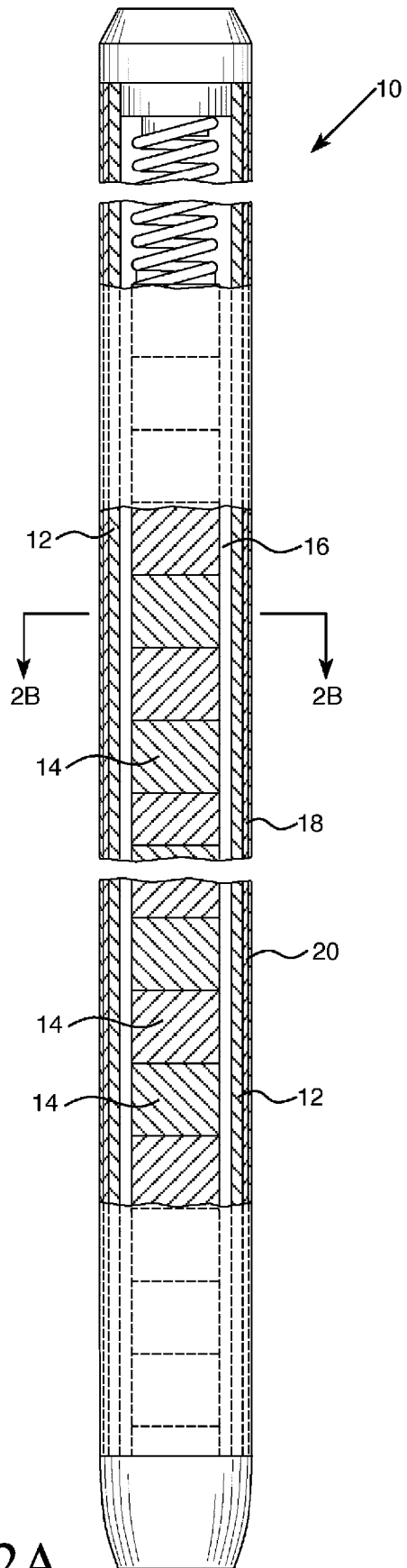


FIGURA 2A

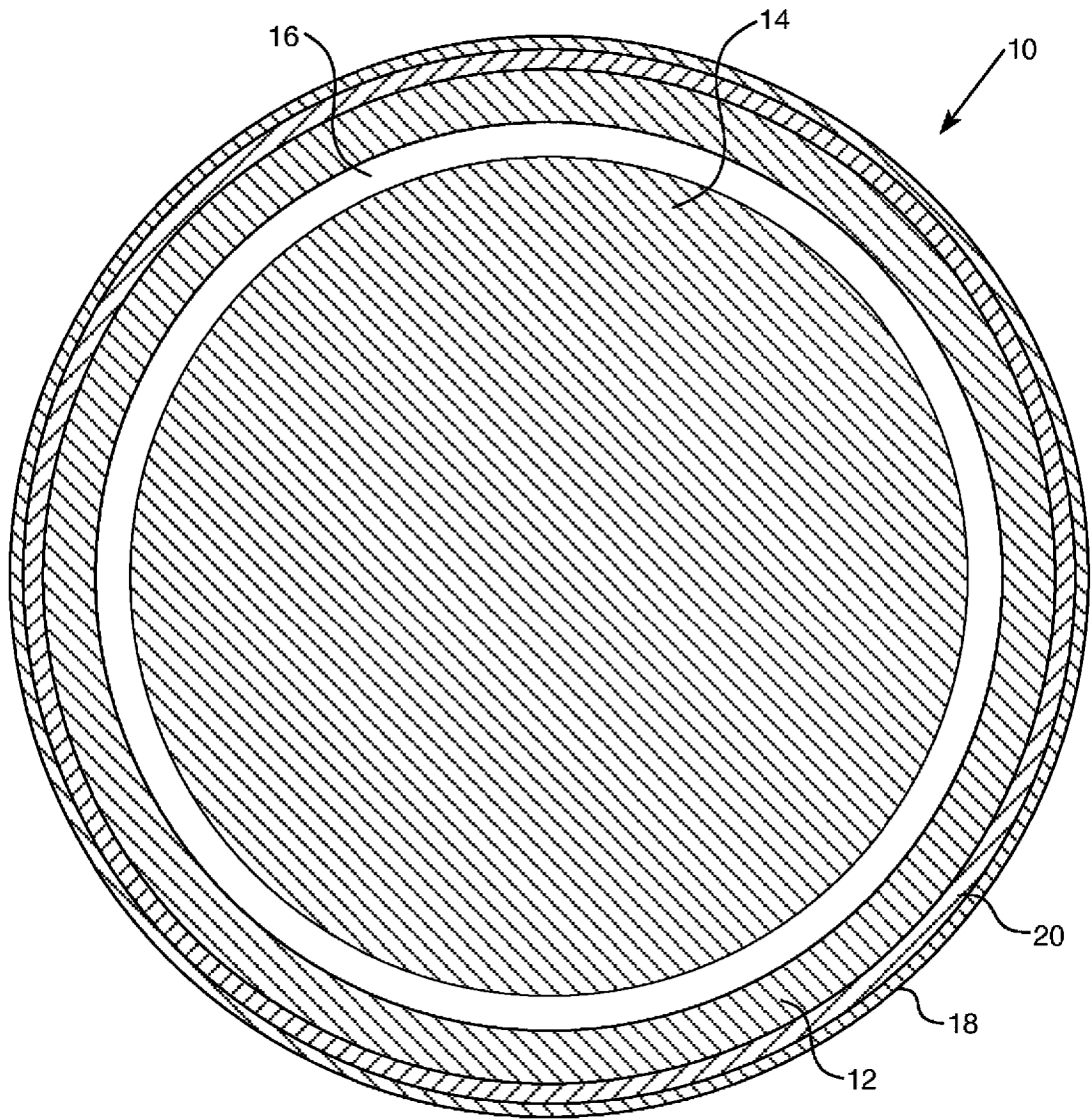


FIGURA 2B

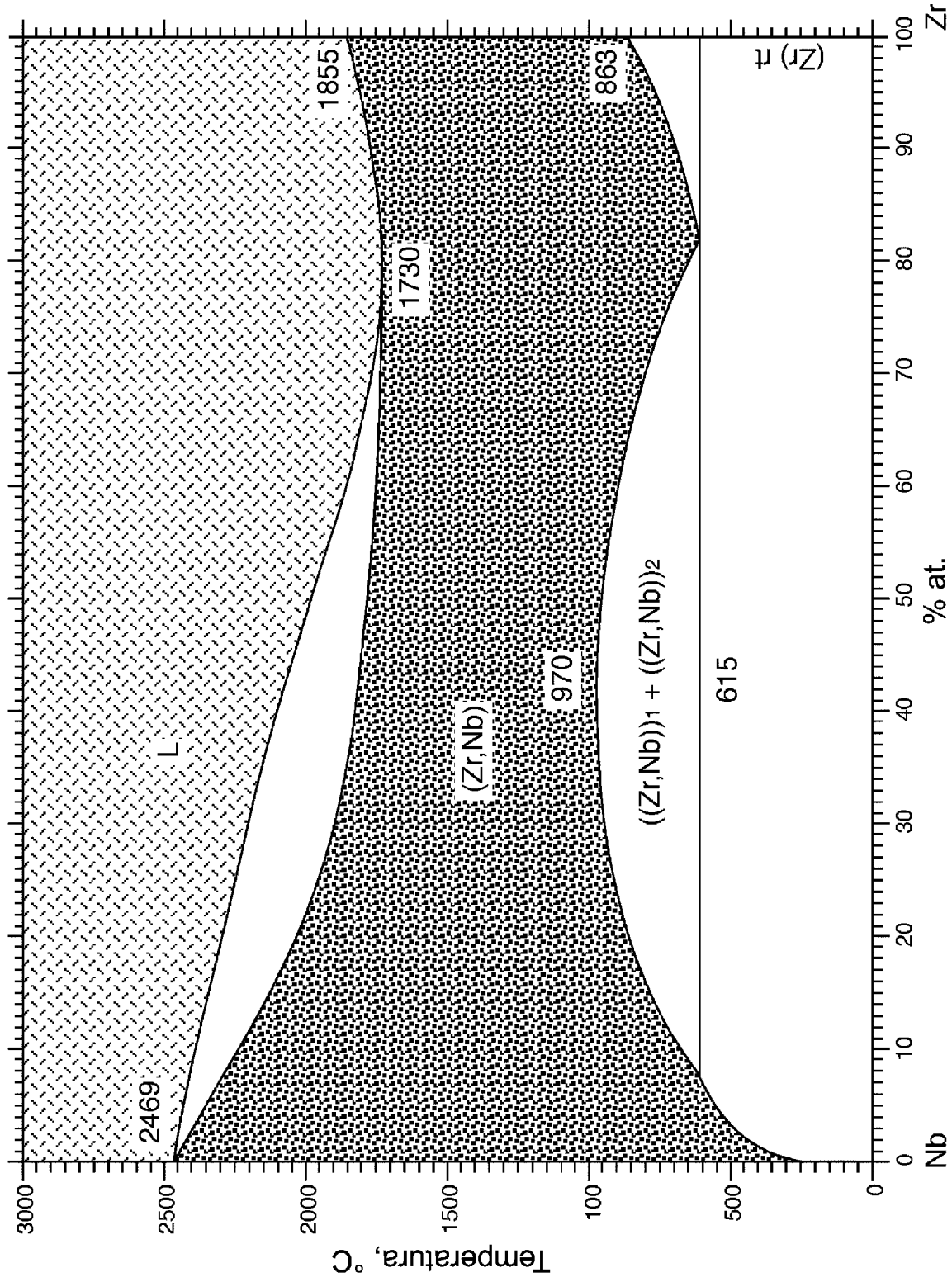


FIGURA 3

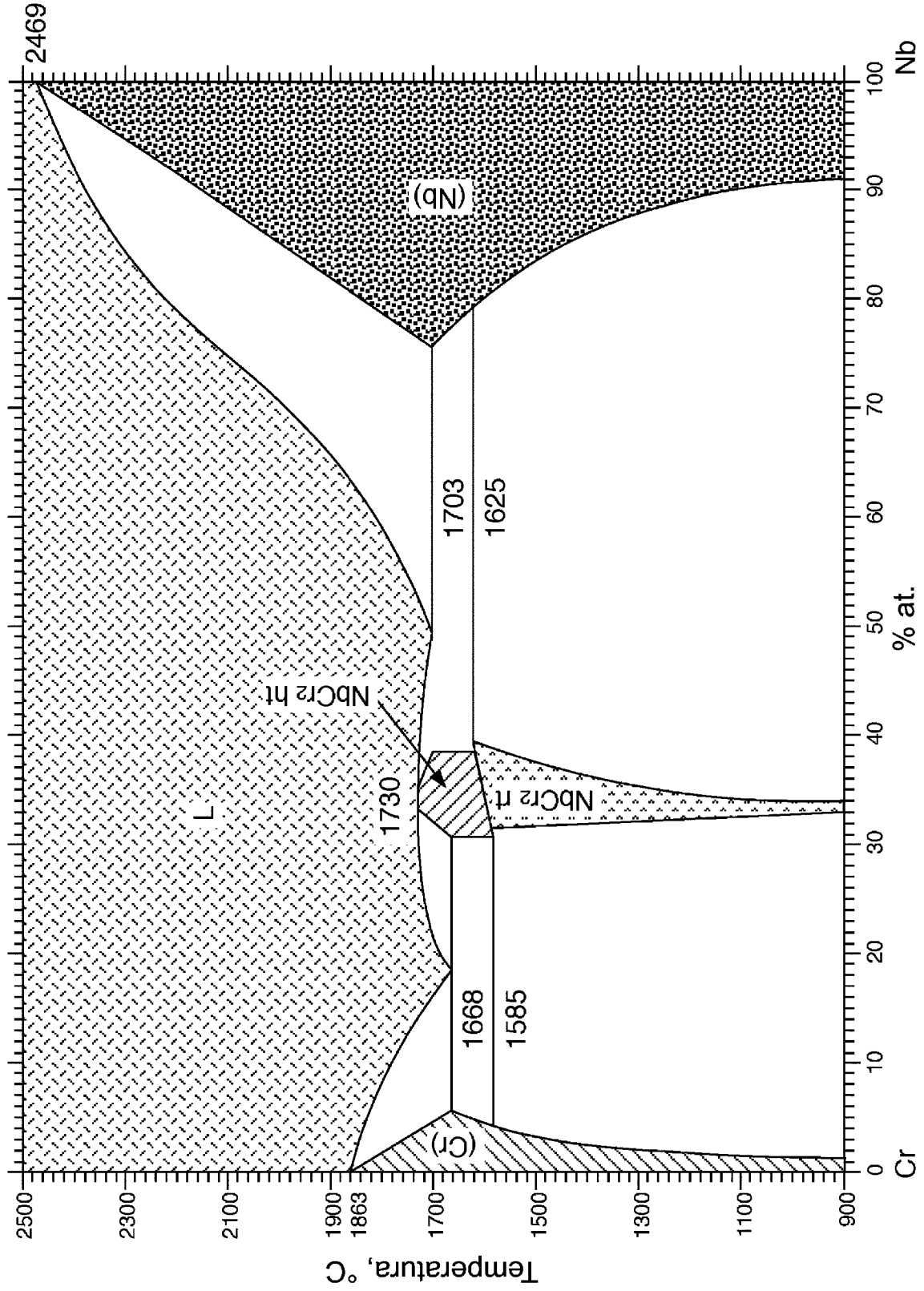


FIGURA 4