

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 686 196**

51 Int. Cl.:

G21C 3/04 (2006.01)

G21C 3/62 (2006.01)

G21C 21/02 (2006.01)

G21C 3/18 (2006.01)

G21C 3/20 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **24.04.2015 PCT/EP2015/058940**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.03.2016 WO16037713**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.04.2015 E 15720661 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.06.2018 EP 3192077**

54 Título: **Método de fabricación de una pastilla de combustible nuclear para un reactor de energía nuclear**

30 Prioridad:
08.09.2014 US 201462047327 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
16.10.2018

73 Titular/es:
**WESTINGHOUSE ELECTRIC SWEDEN AB
(100.0%)
721 63 Västerås, SE**

72 Inventor/es:
**WIDEGREN, HANS;
LAHODA, EDWARD J. y
HALLSTADIUS, LARS**

74 Agente/Representante:
ARIAS SANZ, Juan

ES 2 686 196 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

Método de fabricación de una pastilla de combustible nuclear para un reactor de energía nuclear

5 **Antecedentes de la invención y técnica anterior**

La presente invención se refiere a un método de fabricación de una pastilla de combustible nuclear para un reactor de energía nuclear.

10 El experto en la materia conoce diferentes maneras de producir pastillas de combustible nuclear. Es normal fabricar la pastilla de combustible nuclear a partir de un material de combustible nuclear en forma de polvo. El material de combustible nuclear puede ser, por ejemplo, UO_2 , donde U está enriquecido con respecto a ^{235}U . El material en polvo también puede incluir aditivos, tales como U_3O_8 y material aglutinante. El polvo se prensa con el fin de formar la denominada pastilla en verde. El concepto "pastilla en verde" en este campo técnico significa la pastilla prensada antes de que se sinterice. De ese modo, la pastilla en verde se sinteriza a continuación en un horno. Las pastillas sinterizadas se pulen a continuación con el fin de obtener el diámetro y acabado superficial correctos.

También se conoce incluir algunos aditivos en el polvo con el fin de aumentar el tamaño de grano de la pastilla sinterizada. Por ejemplo, el documento de Patente WO 00/49621 A1 da algunos ejemplos de tales aditivos y describe la forma en la que se puede producir la pastilla de combustible nuclear.

Otros ejemplos de la forma de aumentar el tamaño de grano en el combustible nuclear se describen en los documentos de Patente GB 2177249 A, GB 2020641 A, GB 2107691 A, DE 3235944 A1, US 2004/0047445 A1 y US 2014/0185731 A1.

25 El documento de Patente GB 1 146 704 describe un proceso para la producción de elementos de combustible nuclear mediante fundición directa a partir de uranio o sus aleaciones. El documento describe que es importante que el grano de la denominada estructura "gamma" sea tan fino como sea posible. Esto se consigue, de acuerdo con un ejemplo del documento, mediante el uso de una aleación de uranio-molibdeno con una pequeña adición de boro.

30 El documento de Patente WO 2005/041208 A2 describe que una disposición de dióxido de uranio poroso está infiltrada en un líquido precursor en forma de alilhidruropolicarbosilano con el fin de mejorar la conductividad térmica en el combustible nuclear.

35 Otro fenómeno que se produce cuando se usa combustible nuclear en un reactor nuclear es una estructura en las pastillas de combustible nuclear usadas denominada estructura de alta combustión (HBS) o estructura de llanta. Cuando el combustible nuclear se ha usado durante un periodo prolongado de tiempo en un reactor nuclear (es decir, una alta combustión) aparece una nueva configuración reestructurada en la región delgada exterior de la pastilla de combustible. Este fenómeno se describe, por ejemplo, en el artículo "The high burn-up structure in nuclear fuel" de V.V. Rondinella *et al.* en *Materials Today*, diciembre de 2010, volumen 13, n.º 12, páginas 24-32. La estructura HBS significa que los granos en la región exterior de la pastilla de combustible nuclear se subdividen en granos muy pequeños. La región exterior en la que aparece la HBS puede ser, por ejemplo, menor de 100 μm de espesor. En el presente documento se mencionan diferentes problemas causados por la HBS.

45 Los documentos de Patente WO 97/13252 A1 y JP 9-127279 A describen diferentes formas de reducir los problemas de la estructura de llanta.

50 Cuando se menciona en el presente documento cierto porcentaje de un material, este se refiere a porcentaje en peso, si no se dice nada más.

Cuando se menciona en el presente documento cierto tamaño de grano, este se refiere al denominado tamaño de grano bidimensional (2D), es decir, el tamaño de grano medido en un plano, si no se dice nada más.

Sumario de la invención

55 Como se ha mencionado anteriormente, la HBS puede tener efectos negativos. Por ejemplo, la HBS puede tener un efecto perjudicial en la conductividad térmica, liberación de gas de fisión, y comportamiento durante un suceso de pérdida de refrigerante. Por lo tanto, existen normas que indican que el combustible nuclear solamente se puede usar hasta un cierto nivel de combustión.

60 Un objetivo de la presente invención es proporcionar un método de fabricación de una pastilla de combustible nuclear, método con el cual se puede producir combustible nuclear mejorado. De ese modo, un objetivo particular es fabricar un combustible nuclear con el que se prevenga o retrase la formación de la HBS. Un objetivo adicional es proporcionar un método tal que se pueda llevar a cabo de una forma relativamente simple.

65 Los objetivos anteriores se consiguen mediante un método que se define en la reivindicación 1.

Los inventores de la presente invención se han dado cuenta que la aparición de la HBS descrita anteriormente se puede prevenir, o retrasar, si la pastilla de combustible nuclear tiene granos más grandes al menos en la parte exterior de la pastilla de combustible nuclear (donde se produce la HBS).

5 Además, los presentes inventores se han dado cuenta de que puede existir una ventaja si los aditivos no permanecen en la pastilla sinterizada, o al menos no en la parte exterior de la pastilla. Por ejemplo, la presencia de aditivos puede afectar a la economía de neutrones; es decir, los aditivos pueden absorber neutrones. Por otra parte, como se ha explicado anteriormente, los granos grandes, al menos en la parte exterior de la pastilla de combustible nuclear, son ventajosos para prevenir la HBS. Por lo tanto, es una ventaja usar una sustancia que abandone al
10 menos una parte exterior de la pastilla antes o durante la etapa de sinterización.

La sustancia mencionada también puede abandonar, en las mismas extensiones que se mencionan en la reivindicación 1, la pastilla de combustible nuclear completa antes y/o durante la etapa de sinterización.

15 De ese modo, con una pastilla de combustible nuclear fabricada de acuerdo con la presente invención, la formación de HBS se puede prevenir o retrasar cuando se usa la pastilla de combustible nuclear en un reactor nuclear. Por lo tanto, el combustible nuclear producido de acuerdo con la presente invención se puede usar durante un periodo de tiempo más prolongado en el reactor nuclear, es decir, hasta una mayor combustión.

20 La sustancia puede estar incluida en un compuesto, de un modo tal que el aditivo sea un compuesto que incluye la sustancia que causa los granos más grandes. El resto del compuesto pueda actuar principalmente como portador de la sustancia que causa los granos más grandes. Por ejemplo, el aditivo puede ser UB_4 . En este caso B causará los granos más grandes, pero U como tal en el compuesto UB_4 no contribuirá básicamente a los granos más grandes. De ese modo, esta es la razón por la que se indica en la reivindicación que la sustancia causa los granos más
25 grandes. La sustancia es preferentemente un elemento químico, es decir B. El aditivo puede incluir más de una de tales sustancias.

El material de combustible nuclear en el polvo está basado en UO_2 como material de combustible nuclear real. El material de combustible nuclear en forma de polvo puede consistir hasta al menos un 60 %, preferentemente hasta
30 al menos un 70 %, mas preferentemente hasta al menos un 80 % o al menos un 90 %, en UO_2 . Como conoce el experto en la materia, el polvo también puede comprender otros materiales, tales como aglutinantes, U_3O_8 , absorbentes de neutrones combustibles, formadores de poro y adyuvantes de sinterización, por ejemplo Al_2O_3 .

Cuando se dice que se obtienen granos más grandes con el aditivo (en comparación con el tamaño de grano obtenido si una pastilla que se hubiera producido de la misma forma, pero sin la adición del aditivo, se sinterizara de la misma forma), esto significa que se obtienen granos básicamente más grandes, por ejemplo, el tamaño medio de grano (al menos en la parte de la pastilla, donde se añade el aditivo) puede ser al menos un 50 % más grande, preferentemente al menos un 100 % más grande, lo más preferentemente al menos un 200 % más grande, el tamaño medio de grano obtenido con la ayuda del aditivo puede ser, por ejemplo, al menos 20 μm , preferentemente
40 al menos 30 μm .

De acuerdo con el método de la invención, la pastilla de combustible nuclear producida tiene una forma básicamente cilíndrica con un radio r , en la que dicha parte exterior es la parte de la pastilla de combustible nuclear que está situada entre $0,8 r$ y r , o entre $0,9 r$ y r , o entre $0,95 r$ y r .

45 De acuerdo con el método de la invención, dicha sustancia está hecha de, o comprende, B. Esta sustancia es una sustancia ventajosa que aumentará el tamaño de grano.

De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, dicho aditivo hasta al menos un
50 60 %, preferentemente hasta al menos un 80 %, lo más preferentemente hasta un 100 %, se selecciona entre el grupo que consiste en B, UB_4 , B_4C y ZrB_2 , o las combinaciones de los mismos. Se ha descubierto que estos aditivos son particularmente ventajosos para obtener el tamaño de grano más grande, sin que la sustancia mencionada permanezca en al menos una parte exterior de la pastilla producida.

55 De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, al menos un 90 % de dicho B es ^{11}B . B en forma del isótopo ^{10}B actúa como absorbente de neutrones. Sin embargo, si el fin del B añadido es aumentar el tamaño de grano, pero no actuar como absorbente de neutrones, entonces es preferente usar el isótopo ^{11}B , dado que si permaneciera cierta cantidad de B en la pastilla sinterizada, este B no actuaría en este caso como absorbente de neutrones. B se puede seleccionar, por ejemplo, de un modo tal que esté presente en dicho aditivo hasta al
60 menos un 98 % en forma del isótopo ^{11}B .

De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, el método comprende disponer dicho aditivo de un modo tal que una parte exterior de la pastilla en verde contenga básicamente más aditivo que una parte interior de la pastilla en verde, de un modo tal que la pastilla sinterizada tenga un mayor tamaño de grano en la parte exterior que en la parte interior. Si el aditivo solo está presente en una parte exterior, es más fácil hacer que el aditivo abandone la pastilla, por ejemplo durante una etapa de calentamiento, tal como la etapa de
65

sinterización. Además, como se ha explicado anteriormente, la HBS se produce en la parte exterior de la pastilla de combustible nuclear. Por lo tanto, es suficiente tener granos más grandes en la parte exterior de la pastilla de combustible nuclear con el fin de prevenir o retrasar la formación de la HBS.

- 5 Las partes exterior e interior se pueden definir de diferentes maneras. Por ejemplo, si se considera una pastilla de combustible nuclear cilíndrica con un radio r , la parte interior puede ser, por ejemplo, la parte de la pastilla de combustible nuclear desde el centro de la pastilla hacia fuera hasta por ejemplo $0,6 r$ y la parte exterior puede ser, por ejemplo, la parte de la pastilla de combustible nuclear que está situada entre $0,8 r$ y r o entre $0,9 r$ y r , o entre $0,95 r$ y r (dependiendo de donde se desee que sean más grandes los granos). Cuando se indica que el tamaño de
- 10 grano es más grande en la parte exterior, esto también se puede definir de diferentes maneras. Por ejemplo, si se considera el tamaño medio de grano 2D en la parte exterior y el tamaño medio de grano 2D en la parte interior, el tamaño medio de grano en la parte exterior puede ser al menos un 50 %, preferentemente al menos un 100 %, mayor que el tamaño medio de grano en la parte interior.
- 15 De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, dicho aditivo se proporciona en forma de partículas. Tales partículas se pueden mezclar con el material de combustible nuclear en forma de polvo antes de prensar este polvo en la pastilla en verde. Alternativamente, las partículas se pueden añadir a la pastilla en verde.
- 20 De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, el método comprende proporcionar un líquido y disponer el aditivo en el líquido de un modo tal que dicho aditivo esté en forma de partículas dispersas en dicho líquido, en el que se añade el líquido con el aditivo a dicho material de combustible nuclear en forma de polvo o a la pastilla en verde. Es ventajoso usar un líquido como portador de tales partículas. Dado que las partículas se dispersan en el líquido, las partículas no se disuelven en el líquido.
- 25 De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, el método comprende añadir dicho líquido con el aditivo a la pastilla en verde poniendo en contacto la pastilla en verde con el líquido de un modo tal que el líquido, con el aditivo, penetre en la pastilla en verde y controlando la profundidad de penetración del líquido, y de ese modo del aditivo, en la pastilla en verde. De acuerdo con esta alternativa, el aditivo que aumenta el tamaño de
- 30 grano se añade de ese modo después de que se haya formado la pastilla en verde. Por lo tanto, no es necesario añadir el aditivo al polvo antes de prensar la pastilla en verde. Dado que el aditivo se proporciona en un líquido, se puede controlar la medida en que entra el aditivo en la pastilla en verde. Por lo tanto, se consigue un control mejorado de la adición del aditivo que aumenta el tamaño de grano. Además, es bastante fácil aplicar el líquido, con el aditivo, a la pastilla en verde. Mediante el control de la profundidad de penetración, es posible controlar la región
- 35 de la pastilla en la que está presente el líquido, con el aditivo. De ese modo, es posible controlar el lugar en el que está presente el aditivo en la pastilla.
- De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, dicha etapa de controlar la profundidad de penetración se realiza seleccionando una o ambas de las siguientes:
- 40 la viscosidad del líquido con el aditivo incluido,
la cantidad del líquido, con el aditivo, que se añade a la pastilla en verde cuando se pone en contacto la pastilla en verde con el líquido, con el aditivo.
- 45 Mediante la selección de un líquido con cierta viscosidad, es posible controlar la profundidad de penetración del líquido. La profundidad penetración también se puede controlar mediante el control de la cantidad de líquido que se añade a la pastilla en verde.
- La cantidad del líquido, con el aditivo, que se añade a la pastilla en verde se puede controlar, por ejemplo,
- 50 pulverizando cierta cantidad del líquido, con el aditivo, sobre la pastilla en verde, o exponiendo la pastilla en verde al líquido, con el aditivo (por ejemplo, por inmersión de la pastilla en verde en el líquido, con el aditivo) durante un tiempo predeterminado.
- La profundidad de penetración del líquido, con el aditivo, en la pastilla en verde se puede controlar de un modo tal
- 55 que una parte exterior de la pastilla en verde contenga básicamente más líquido, y de ese modo más aditivo, que una parte interior de la pastilla en verde, de un modo tal que la pastilla sinterizada tenga un mayor tamaño de grano en la parte exterior que en la parte interior.
- Dicho líquido con aditivo se puede seleccionar y dicho método se puede llevar a cabo de un modo tal que el líquido
- 60 con el aditivo penetre en los poros que existen entre los granos en la pastilla en verde.
- La pastilla en verde tendrá poros tanto entre los granos de la pastilla en verde como en el interior de los granos de la pastilla en verde. Los poros del interior de los granos son normalmente más pequeños que los poros que existen entre los granos. Por lo tanto, se puede controlar (por ejemplo, seleccionando cierta viscosidad) que el líquido
- 65 penetre en los poros que existen entre los granos.

Dicho líquido con aditivo se puede seleccionar y dicho método se puede llevar a cabo de un modo tal que el líquido con el aditivo no penetre, al menos no hasta cualquier grado sustancial, en los poros que existen en los granos de la pastilla en verde. De acuerdo con esta alternativa, el aditivo no entrará hasta un grado sustancial en los granos, sino que el aditivo se añadirá a los poros que existen entre los granos.

5 Alternativamente, dicho líquido con aditivo se puede seleccionar y dicho método se puede llevar a cabo de un modo tal que el líquido con el aditivo penetre también en los poros que existen en los granos de la pastilla en verde. De acuerdo con esta alternativa, el aditivo también entrará de ese modo en los poros de los granos. De ese modo, con la presente invención es posible controlar el lugar de la pastilla verde en el que se añade el aditivo.

10 De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, dicho líquido se selecciona y dicho método se lleva a cabo de un modo tal que el líquido abandone completamente, o al menos hasta un 99 %, la pastilla antes de o durante la etapa de sinterización. Dado que el líquido abandonará la pastilla, el líquido (y el material que constituye el líquido) no estará presente en la pastilla sinterizada. Por lo tanto, el líquido actúa como portador del aditivo y no influirá en las propiedades de la pastilla producida.

15 Preferentemente, el líquido abandona la pastilla durante una etapa de calentamiento de la pastilla. Esta puede ser una etapa de calentamiento separada antes de la etapa de sinterización o el calentamiento que se lleva a cabo durante la etapa de sinterización. La última alternativa tiene la ventaja de que no sea necesaria ninguna etapa de calentamiento separada.

Dicho líquido se puede seleccionar de un modo tal que el aditivo no se disuelva en el líquido, y de un modo tal que el material de combustible nuclear en la pastilla verde no sea disuelto por el líquido el líquido.

25 De acuerdo con una forma adicional de llevar a cabo el método de la invención, dicho líquido es un aceite, preferentemente un aceite mineral. Tales líquidos tienen propiedades ventajosas para actuar como portadores del aditivo.

30 Además, mediante la selección de un aceite mineral adecuado, se consigue una viscosidad adecuada.

La invención también se refiere a un método de fabricación y de uso de combustible nuclear. Este método comprende:

35 fabricar una pluralidad de pastillas de combustible nuclear de acuerdo con una cualquiera de las formas precedentes,
 disponer las pastillas de combustible nuclear en vainas tubulares,
 disponer las vainas tubulares, con las pastillas de combustible nuclear, en el núcleo de un reactor de energía nuclear en una planta de energía nuclear, de un modo tal que al menos un 20 %, preferentemente al menos un 50 %, lo más preferentemente un 100 %, del material de combustible nuclear en dicho núcleo esté compuesto por pastillas fabricadas de acuerdo con una cualquiera de las formas precedentes,
 40 operar el reactor nuclear para producir energía.

45 Mediante el uso de las pastillas de combustible nuclear ventajosas que se obtienen con el método de acuerdo con la presente invención en un reactor de energía nuclear real, se consiguen de ese modo las ventajas del combustible nuclear producido en una planta de reactor de energía nuclear para producir energía. El reactor de energía nuclear comprende preferentemente varios miles de vainas tubulares que comprenden pastillas de combustible nuclear producidas con el método de acuerdo con la presente invención. Mediante el uso de las pastillas de combustible nuclear que se producen de acuerdo con la presente invención en un reactor nuclear, el combustible nuclear se puede usar durante más tiempo, dado que se previene o retrasa la formación de HBS con la presente invención.

50 **Breve descripción de las figuras**

Figura 1 muestra esquemáticamente un diagrama de flujo de una forma de llevar a cabo un método de acuerdo con la invención.

55 Figura 2 muestra esquemáticamente un diagrama de flujo de otra forma de llevar a cabo un método de acuerdo con la invención.

60 Figura 3 muestra esquemáticamente un ejemplo de la forma en la que el tamaño de grano en una pastilla producida de acuerdo con una forma de llevar a cabo un método de acuerdo con la invención puede variar en la dirección radial de la pastilla.

Descripción de los ejemplos de la invención

65 Dado que el experto en la materia conoce la forma de producir pastillas de combustible nuclear a partir de un polvo, no se describirán en el presente documento todos los detalles de tal método. Sin embargo, se describen las etapas

principales que son pertinentes para la presente invención.

La Figura 1 muestra esquemáticamente las etapas principales de una forma de llevar a cabo un método de acuerdo con la presente invención.

5 Se proporciona un material de combustible nuclear en forma de polvo. El material de combustible nuclear está basado en UO_2 , que está enriquecido en ^{235}U . El polvo también puede comprender otros materiales, por ejemplo materiales aglutinantes y U_3O_8 .

10 Se proporciona un aditivo. El aditivo constituye o incluye una sustancia que aumentará el tamaño de grano de la pastilla sinterizada. Además, la sustancia es tal que abandonará al menos una parte exterior de la pastilla antes de y/o durante una etapa de sinterización.

15 El aditivo comprende B, por ejemplo en forma de UB_4 . De acuerdo con una realización, B está en forma de ^{11}B . B tiene la propiedad de aumentar el tamaño de grano cuando se sinteriza la pastilla en verde. Sin embargo, B también abandonará en gran medida la pastilla cuando se caliente durante el proceso de sinterización, o antes de la sinterización si se lleva a cabo una etapa de calentamiento antes de la sinterización real.

20 El aditivo está preferentemente en forma de partículas, es decir, un polvo.

El aditivo en polvo se mezcla con el material de combustible nuclear en forma de polvo.

El polvo mezclado se prensa de un modo tal que se forme la pastilla en verde.

25 El aditivo se puede mezclar con el material de combustible nuclear completo en forma de polvo. Alternativamente, es posible mezclar el aditivo solo con una parte del material de combustible nuclear en forma de polvo. De acuerdo con la primera alternativa mencionada, el aditivo se puede distribuir de ese modo en la pastilla en verde completa. De acuerdo con la segunda alternativa, es posible disponer el material de combustible nuclear en forma de polvo sin el aditivo en una parte interior y añadir la mezcla del aditivo y el material de combustible nuclear en forma de polvo a una parte exterior antes de que se presse la pastilla en verde. De acuerdo con la segunda alternativa, el aditivo estará presente de ese modo solo en una parte exterior de la pastilla en verde.

30 A continuación, se sinteriza la pastilla en verde. Esto se puede realizar, por ejemplo, en un horno que contiene diferentes zonas en las que la pastilla se calienta hasta una temperatura final de aproximadamente $1800\text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura y el tiempo se seleccionan de un modo tal que la sustancia en el aditivo que causa los granos más grandes en la pastilla sinterizada abandone (se evapore) básicamente al menos una parte exterior de la pastilla durante la etapa de sinterización. Alternativamente, se puede llevar a cabo una etapa de calentamiento separada antes de la sinterización real con el fin de conseguir esto.

40 La pastilla sinterizada se pule con el fin de obtener el diámetro y el acabado superficial correctos.

La pastilla de combustible nuclear tiene una forma básicamente cilíndrica con un radio r . La parte exterior de la pastilla puede ser, por ejemplo, la parte de la pastilla de combustible nuclear producido que está situada entre $0,9 r$ y r .

45 Cuando se ha fabricado una pluralidad de pastillas de combustible nuclear de acuerdo con la presente invención, las pastillas de combustible nuclear se disponen en vainas tubulares. Las vainas tubulares se sitúan a continuación en los montajes de combustible nuclear que se disponen en un reactor nuclear. A continuación, el reactor nuclear se opera con el fin de producir energía.

50 La Figura 2 muestra un diagrama de flujo de otra forma de llevar a cabo un método de acuerdo con la invención. La diferencia principal en el método de acuerdo con la Figura 2, en comparación con el método de acuerdo con la Figura 1, es que el aditivo se añade después de que se haya formado la pastilla en verde.

55 De acuerdo con la Figura 2, se proporciona un material de combustible nuclear en forma de polvo. Se puede usar el mismo material de combustible nuclear que se ha mencionado con respecto a la Figura 1.

El polvo se prensa de un modo tal que se forme una pastilla "en verde". La pastilla en verde puede ser porosa. Por ejemplo, un 50 % de la pastilla prensada puede consistir en poros.

60 Se proporciona un aditivo. El aditivo está compuesto por o incluye una sustancia que aumentará el tamaño de grano de la pastilla sinterizada. Además, la sustancia, que causa los granos más grandes, es tal que abandonará al menos una parte exterior de la pastilla antes de y/o durante una etapa de sinterización posterior. El aditivo puede comprender, por ejemplo, B, por ejemplo en forma de UB_4 . De acuerdo con una realización, B está en forma de ^{11}B .

65 El aditivo está preferentemente en forma de partículas, es decir, un polvo. El tamaño de las partículas debería ser lo

bastante pequeño para que las partículas puedan penetrar en los poros de la pastilla en verde, en los que se pretende que penetren las partículas. El tamaño de partícula puede ser, por ejemplo, aproximadamente 1 µm.

5 Se proporciona un líquido. El líquido puede ser un aceite mineral. El aceite mineral se puede seleccionar para que tenga una viscosidad deseada, por ejemplo, una viscosidad cinemática de 320 centistokes.

10 El aditivo se mezcla con el líquido. Preferentemente, las partículas de aditivo se dispersan en el líquido, es decir, el líquido se selecciona de un modo tal que las partículas de aditivo no se disuelvan en el líquido, y también de un modo tal que el material de combustible nuclear en la pastilla en verde no sea disuelto por el líquido.

La pastilla en verde se pone en contacto con el líquido con aditivo. Por ejemplo, la pastilla en verde se puede sumergir en el líquido con aditivo o el líquido con aditivo se puede pulverizar sobre la pastilla en verde.

15 Se controla la profundidad de penetración del líquido, y de ese modo del aditivo, en la pastilla en verde. Esto se puede realizar seleccionando una viscosidad adecuada del líquido o controlando la cantidad de líquido, con el aditivo, que se añade a la pastilla en verde. Esto se puede realizar, por ejemplo, pulverizando cierta cantidad del líquido sobre la pastilla o sumergiendo la pastilla en verde en el líquido, con aditivo, durante un tiempo predeterminado.

20 La profundidad de penetración se puede controlar de un modo tal que el aditivo se añada solo a una parte exterior de la pastilla en verde.

25 Mediante el control, por ejemplo, de la viscosidad del líquido, con el aditivo, o del tamaño de las partículas de aditivo, también es posible controlar los poros de la pastilla en verde en los que entrará el aditivo. Por ejemplo, se puede controlar que el aditivo entre solo básicamente en los poros que existen entre los granos en la pastilla en verde. Alternativamente, se puede controlar que el aditivo entre también en los poros que existen en los granos en la pastilla en verde.

30 A continuación, se sinteriza la pastilla en verde tratada de ese modo. Esto se puede realizar, por ejemplo, mediante un proceso de sinterización en un horno que contiene diferentes zonas en las que la pastilla se calienta hasta una temperatura final de aproximadamente 1800 °C.

35 El líquido se selecciona preferentemente de un modo tal que se evapore durante el proceso de calentamiento. Puede haber una etapa de calentamiento separada antes de la sinterización real con el fin de evaporar el líquido. Sin embargo, tal etapa de calentamiento separada puede no ser necesaria, dado que el líquido se evaporará durante el proceso de sinterización.

40 El tiempo y la temperatura para el proceso de calentamiento/sinterización se seleccionan de un modo tal que también (al menos) la sustancia que causa los granos más grandes abandone básicamente al menos una parte exterior de la pastilla antes de y/o durante la etapa de sinterización. La parte exterior de la pastilla puede ser, como se ha explicado anteriormente, por ejemplo, la parte de la pastilla de combustible nuclear producida que se sitúa entre 0,9 r y r.

45 Cuando se desea aumentar el tamaño de grano en la pastilla de combustible nuclear completa, el aditivo, y la viscosidad del líquido, se puede seleccionar de un modo tal que la pastilla completa se infiltre con el líquido con aditivo. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, es posible controlar la profundidad de penetración del líquido con aditivo. De acuerdo con una forma preferente de llevar a cabo la presente invención, la profundidad de penetración se controla de un modo tal que el aditivo entre básicamente solo en una parte periférica exterior de la pastilla en verde. Cuando la pastilla en verde se sinteriza a continuación, se obtendrán granos más grandes principalmente en una parte exterior de la pastilla.

50 La Figura 3 ilustra esquemáticamente la forma en la que puede variar el tamaño de grano en una pastilla producida de esta forma o en la forma que se describe de acuerdo con la Figura 1 (si el aditivo se añade en una parte exterior de la pastilla). El eje x muestra el radio de la pastilla sinterizada. De ese modo, el radio r 1,0 es la periferia exterior de la pastilla. El radio de la pastilla puede ser, por ejemplo, aproximadamente 4,6 mm. El eje y de la Figura 3 muestra el tamaño medio de grano 2D. La curva de la Figura 3 muestra de ese modo la forma en la que varía el tamaño medio de grano 2D con el radio. La Figura 3 ilustra de ese modo que, de acuerdo con esta realización de la invención, se obtiene un tamaño de grano básicamente mayor en la parte exterior de la pastilla sinterizada. En particular, esto tiene la ventaja de que se puede prevenir o retrasar la formación de la HBS descrita anteriormente.

60 De la misma forma que se ha descrito con respecto a la Figura 1, se produce una pluralidad de pastillas de combustible nuclear de acuerdo con el método de la presente invención.

65 Las pastillas producidas se disponen en vainas tubulares.

Las vainas tubulares se disponen en el núcleo de un reactor de energía nuclear, de un modo tal que el núcleo

incluya varios miles de vainas tubulares con las pastillas producidas de acuerdo con la presente invención.

El reactor nuclear se opera con el fin de producir energía.

- 5 La presente invención no se limita a los ejemplos que se describen en el presente documento, sino que se puede variar y modificar dentro del ámbito de las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Método de fabricación de una pastilla de combustible nuclear para un reactor de energía nuclear, comprendiendo el método las siguientes etapas:
- 5 proporcionar un material de combustible nuclear en forma de polvo, en el que el material de combustible nuclear se basa en UO_2 ,
proporcionar un aditivo,
prensar el polvo de un modo tal que se obtenga la denominada pastilla en verde,
- 10 en el que dicho aditivo se añade a dicho material de combustible nuclear en forma de polvo o a la pastilla en verde,
sinterizar la pastilla en verde obtenida de ese modo,
en el que dicho aditivo es tal que están presentes granos más grandes en el material de combustible nuclear en la pastilla después de la etapa de sinterización en comparación con el tamaño de grano obtenido si una pastilla,
- 15 que se produzca de acuerdo con la forma anterior pero sin la adición del aditivo, se sinterizara de la misma forma,
en el que dicho aditivo está compuesto por o incluye una sustancia que causa dichos granos más grandes en la pastilla sinterizada, en el que dicha sustancia se selecciona y el método se lleva a cabo de un modo tal que la sustancia abandone completamente, o al menos hasta un 90 %, preferentemente hasta al menos un 95 %, más preferentemente hasta al menos un 99 %, al menos una parte exterior de la pastilla antes de y/o durante la etapa de sinterización,
- 20 en el que la pastilla de combustible nuclear producida tiene una forma básicamente cilíndrica con un radio r y en el que dicha parte exterior es la parte de la pastilla de combustible nuclear que está situada entre $0,8 r$ y r , o entre $0,9 r$ y r , o entre $0,95 r$ y r , y
- 25 en el que dicha sustancia está compuesta por, o comprende, B.
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicho aditivo hasta al menos un 60 %, preferentemente hasta al menos un 80 %, lo más preferentemente hasta un 100 %, se selecciona entre el grupo que consiste en B, UB_4 , B_4C y ZrB_2 , o las combinaciones de los mismos.
- 30 3. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que al menos un 90 % de dicho B es ^{11}B .
4. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende disponer dicho aditivo de un modo tal que una parte exterior de la pastilla en verde contenga básicamente más aditivo que una parte interior de la pastilla en verde, de un modo tal que la pastilla sinterizada tenga un mayor tamaño de grano en la parte exterior que en la parte interior.
- 35 5. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicho aditivo se proporciona en forma de partículas.
- 40 6. Un método de acuerdo con la reivindicación 5, que comprende proporcionar un líquido y disponer el aditivo en el líquido de un modo tal que dicho aditivo esté en forma de partículas dispersas en dicho líquido, en el que el líquido con el aditivo se añade a dicho material de combustible nuclear en forma de polvo o a la pastilla en verde.
- 45 7. Un método de acuerdo con la reivindicación 6, que comprende añadir dicho líquido con el aditivo a la pastilla en verde poniendo en contacto la pastilla en verde con el líquido de un modo tal que el líquido, con el aditivo, penetre en la pastilla en verde y controlando la profundidad de penetración del líquido, y de ese modo del aditivo, en la pastilla en verde.
- 50 8. Un método de acuerdo con la reivindicación 7, en el que dicha etapa de control de la profundidad de penetración se realiza seleccionando una o más de las siguientes:
- 55 la viscosidad del líquido con el aditivo incluido,
la cantidad del líquido, con el aditivo, que se añade a la pastilla en verde cuando se pone en contacto la pastilla en verde con el líquido, con el aditivo.
9. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 6-8, en el que dicho líquido se selecciona y dicho método se lleva a cabo de un modo tal que el líquido abandone completamente, o al menos hasta un 99 %, la pastilla antes de o durante la etapa de sinterización.
- 60 10. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 6-9, en el que dicho líquido es un aceite, preferentemente un aceite mineral.
- 65 11. Método de fabricación y utilización de combustible nuclear, que comprende:

- 5 fabricar una pluralidad de pastillas de combustible nuclear de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes,
disponer las pastillas de combustible nuclear en vainas tubulares,
disponer las vainas tubulares, con las pastillas de combustible nuclear, en el núcleo de un reactor de energía nuclear en una planta de energía nuclear, de un modo tal que al menos un 20 %, preferentemente al menos un 50 %, lo más preferentemente un 100 %, del material de combustible nuclear en dicho núcleo esté compuesto por pastillas fabricadas de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes,
operar el reactor nuclear para producir energía.

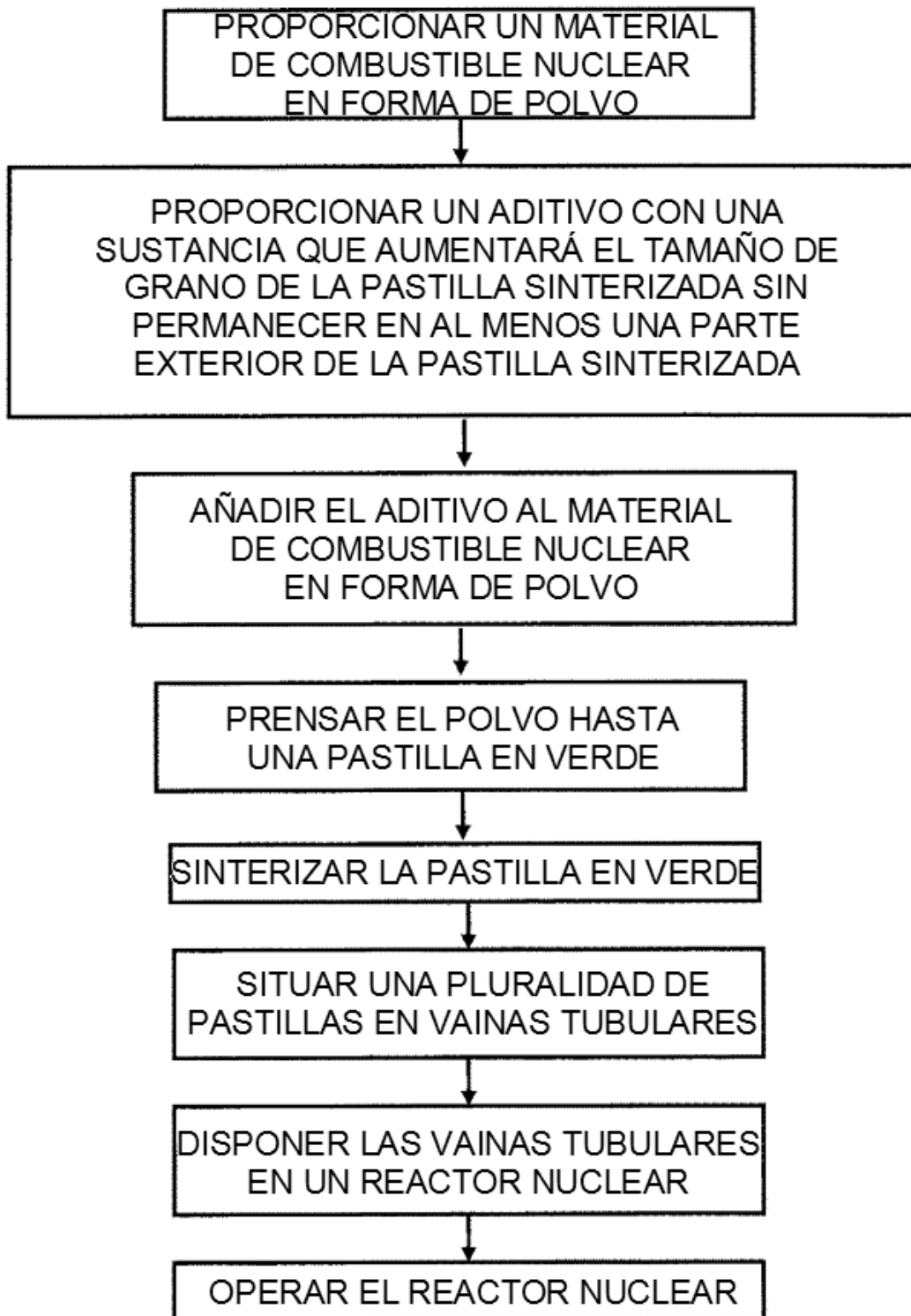


Fig. 1

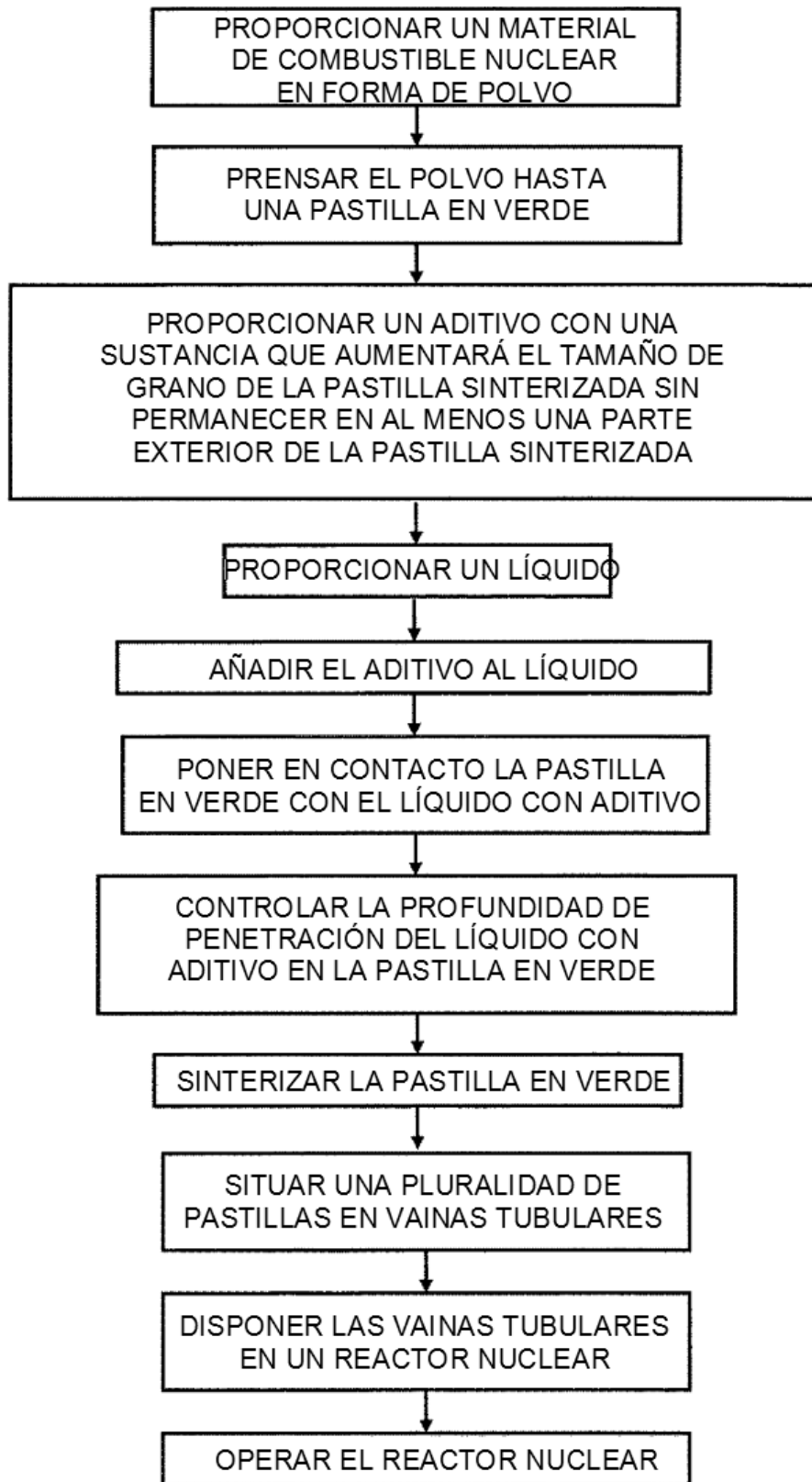


Fig. 2

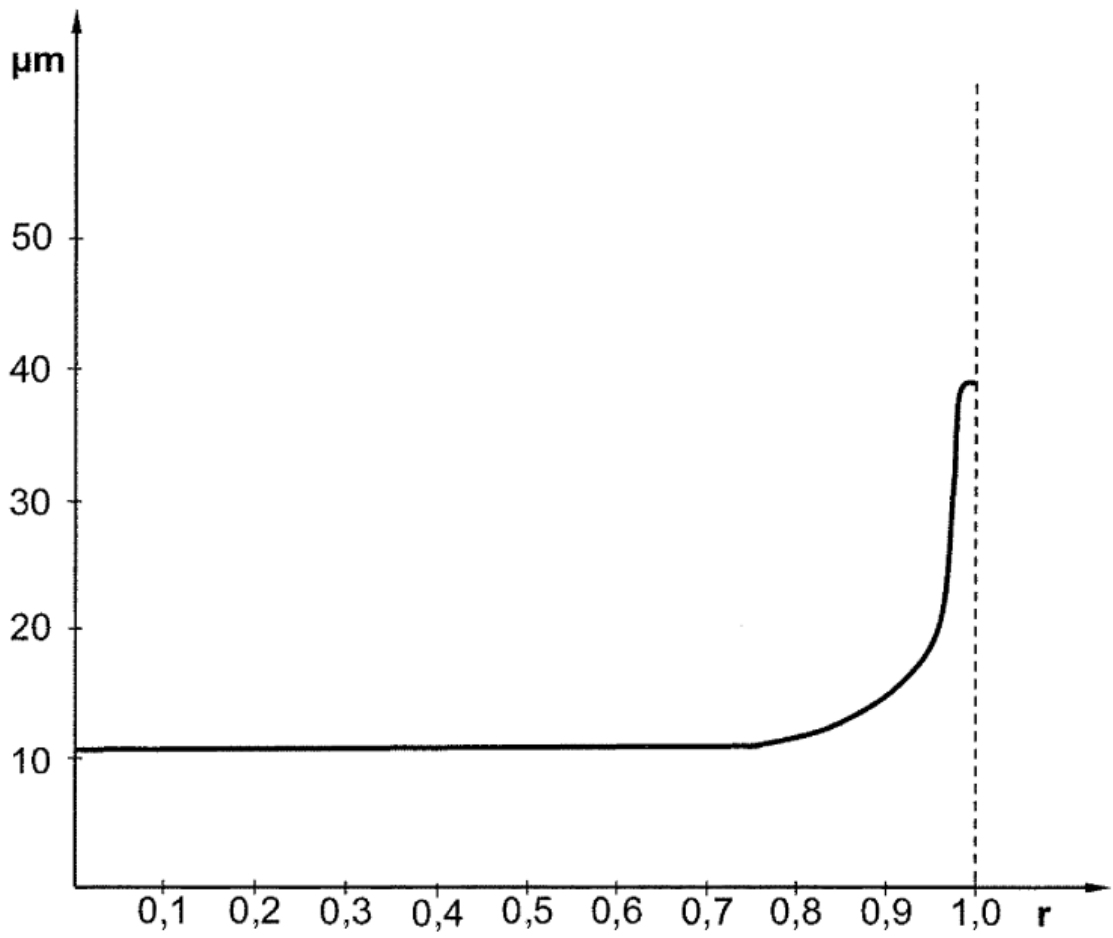


Fig. 3