

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 648 588**

51 Int. Cl.:

G21C 3/58 (2006.01)

G21C 3/62 (2006.01)

G21C 3/326 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.10.2014 E 14189385 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.10.2017 EP 3010025**

54 Título: **Elemento combustible para un reactor nuclear de agua en ebullición**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
04.01.2018

73 Titular/es:

**THOR ENERGY AS (100.0%)
Karenslyst Allé 9C
0278 Oslo, NO**

72 Inventor/es:

**INSULANDER BJÖRK, KLARA y
ASPHJELL, ØYSTEIN**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 648 588 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

Elemento combustible para un reactor nuclear de agua en ebullición

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

La presente invención se refiere a un elemento combustible para un reactor nuclear de agua en ebullición. La invención se refiere también a un reactor nuclear de agua en ebullición y a una manera de hacer funcionar un reactor nuclear de agua en ebullición en una central nuclear.

10 Existen principalmente dos tipos de reactores modernos de agua ligera: reactores de agua en ebullición (BWR) y reactores de agua a presión (PWR). En este tipo de reactores existen diferentes condiciones. Por lo tanto, hay requisitos diferentes sobre las partes que están incluidas en los diferentes tipos de reactores. En un PWR, las barras de combustible son enfriadas principalmente con agua que está en una fase líquida bajo una presión alta. En un
15 BWR, la presión es menor y el agua que enfría las barras de combustible se evapora de tal manera que las barras de combustible están rodeadas tanto por agua en fase líquida como en fase de vapor. Puesto que el agua fluye normalmente desde abajo hacia arriba a través del elemento combustible, la cantidad de vapor es mayor en la parte superior del elemento combustible. Debido a los diferentes principios de trabajo en un PWR y un BWR, los elementos combustibles tienen diseños diferentes y difieren entre sí con respecto a muchos detalles. Por lo tanto,
20 resulta evidente para un experto en la técnica si un determinado elemento combustible es para un PWR o para un BWR.

En un elemento combustible para un reactor nuclear de agua en ebullición, hay una serie de barras de combustible, que comprenden un material de combustible nuclear. Como se ha mencionado anteriormente, cuando el elemento
25 combustible está en funcionamiento en un reactor nuclear, fluye un medio de refrigeración, normalmente agua, a través del elemento combustible. Esta agua cumple varias funciones. Funciona como un medio de refrigeración para enfriar las barras de combustible de manera que no se sobrecaliente. El agua sirve también como un moderador de neutrones, es decir, el agua desacelera los neutrones a una velocidad más baja. De este modo, aumenta la probabilidad de que los neutrones induzcan una reacción de fisión.

30 El uranio es el combustible nuclear predominantemente utilizado en los reactores nucleares actualmente en funcionamiento. El núcleo de tal reactor nuclear tiene un gran número de elementos combustibles con barras de combustible que contienen combustible de uranio. Una cierta fracción de los elementos combustibles es retirada a intervalos regulares y reemplazada por nuevos elementos combustibles con el fin de compensar la pérdida de reactividad que se produce con la irradiación durante el funcionamiento del reactor nuclear.

35 Un combustible basado en uranio se basa normalmente en ^{238}U que se enriquece en ^{235}U . En un elemento combustible para un BWR, el grado de enriquecimiento es normalmente diferente para diferentes barras de combustible, dependiendo de la posición de las barras de combustible en el elemento combustible. Debido al diseño de un BWR, la proporción entre el volumen del medio moderador de neutrones (agua) y el volumen del combustible es diferente para diferentes posiciones en el elemento combustible. Por lo tanto, el enriquecimiento varía de manera que las barras de combustible más moderadas tienen un enriquecimiento más bajo y las barras de combustible menos moderadas tienen un mayor enriquecimiento.

45 El material de combustible nuclear en algunas de las barras de combustible de un elemento combustible incluye normalmente, además del uranio, un absorbente consumible, es decir, un isótopo que tiene una sección transversal de absorción de neutrones elevada. Tras la absorción de un neutrón, el isótopo se convierte en un isótopo con una sección transversal de absorción de neutrones baja. El propósito de tales absorbentes consumibles consiste en reducir la reactividad de los elementos combustibles mientras son nuevos, mientras que la reactividad más tardía,
50 después de que los núcleos absorbentes consumibles hayan absorbido un neutrón, ya no se reduce sustancialmente por ningún absorbente consumible. La ventaja de utilizar un absorbente consumible consiste en que la distribución de energía entre los elementos combustibles en el núcleo del reactor nuclear es más uniforme de lo que hubiera sido en ausencia de absorbentes consumibles. La distribución uniforme de la energía da como resultado mayores márgenes de parada, ya que pueden evitarse agrupaciones de elementos combustibles de alta reactividad. Además,
55 un pico de energía más bajo en el núcleo permite un nivel de energía promedio más alto sin riesgo de superar localmente un cierto límite de energía. El inconveniente del uso de absorbentes consumibles consiste en que la energía de las barras de combustible que contienen absorbentes consumibles se reduce mucho. Esto da como resultado un pico de energía interna mayor en el elemento combustible y una reactividad ligeramente rebajada también durante la última parte de la vida útil del elemento combustible, debido a los isótopos absorbentes restantes
60 relacionados con los isótopos absorbentes consumibles originales y debido a la masa reducida de U fisible en estas barras de combustible.

El uso de Th como combustible nuclear, mezclado con uranio u otros materiales fisibles, se ha propuesto en numerosas patentes y publicaciones académicas.

65 Los documentos WO 85/01826 A1 y WO 97/08711 A2 describen reactores nucleares del tipo de capa fértil-capa

sembrada que tienen un núcleo activo que comprende regiones sembradas de material fisible y regiones de capa fértil de material fértil capaz de convertirse en material fisible por captura de neutrones. Las regiones de capa fértil comprenden Th.

5 El documento US 3211621 describe un reactor neutrónico de tipo reproductor o convertidor heterogéneo. El núcleo del reactor tiene elementos combustibles de capa sembrada y elementos combustibles de capa fértil. Los elementos combustibles de capa fértil pueden comprender Th.

10 El documento GB 903142 describe un PWR. Se describe que el sobrecalentamiento de elementos de combustible en regiones de flujo mejorado causado por un exceso local de moderador de agua se evita reduciendo la concentración de material fisible o proporcionando un absorbente de neutrones en esas regiones. Para evitar el sobrecalentamiento en una cierta zona (zona I) de las barras de combustible, otra zona (zona II) contiene combustible que es menos enriquecido que una tercera zona (zona III) y puede contener también una gran proporción de ^{232}Th , por ejemplo como ThO_2 mezclado con UO_2 .

15 El uso de Th para reemplazar algunos de los absorbentes consumibles en elementos combustibles de uranio ha sido propuesto en una tesis doctoral por Cheuk Wah Lau, ISBN 978-91-7385-990-5. En este trabajo se propone un elemento combustible para un PWR en el que todas las barras de combustible de uranio y algunas de las barras de combustible que contienen absorbente consumible se reemplazan por barras que contienen uranio enriquecido y una fracción menor de Th (menor o igual a 50%). El enriquecimiento del uranio y la fracción de Th es igual para todas las barras que contienen torio.

Sumario de la invención

25 En vista de la técnica anterior, un objetivo de la presente invención consiste en proporcionar un elemento combustible para un reactor nuclear de agua en ebullición en el que se reduzca la necesidad de absorbentes consumibles con el fin de controlar la reactividad. Otro objetivo consiste en proporcionar un elemento combustible de este tipo en el que se obtenga una distribución de energía más uniforme. Un objetivo adicional consiste en proporcionar un elemento combustible de este tipo en el que se reduzca la necesidad de utilizar una variación en el enriquecimiento del U. Otro objetivo consiste en proporcionar un elemento combustible de este tipo en el que se reduzca la variación en la reactividad a lo largo del tiempo.

Los objetivos anteriores se consiguen mediante un elemento combustible según se define en la reivindicación 1.

35 Según la presente invención, la proporción entre Th y U en el material de combustible nuclear varía, por tanto, entre diferentes barras de combustible. Dado que el Th cumple una función de absorción de neutrones, la necesidad de absorbentes consumibles se reduce mediante la presente invención. Al reducir la cantidad de absorbentes consumibles, el perfil de energía interna dentro del elemento combustible se hace más uniforme, puesto que menos barras deben tener su reactividad muy reducida por el absorbente consumible. La variación en la proporción mencionada puede utilizarse para disponer las barras de combustible con las diferentes proporciones en el elemento combustible de tal manera que se obtenga una distribución de energía uniforme. Por lo tanto, se reduce la necesidad de utilizar un enriquecimiento variable en el U. Además, puesto que, cuando el elemento combustible se utilice en un reactor nuclear, el Th se transformará en ^{233}U , es decir, un material fisible, se reduce la variación de la reactividad con el tiempo. La mayor reactividad al final de la vida útil ocasionada por la producción de ^{233}U disminuye la diferencia de reactividad entre los elementos combustibles de diferente antigüedad, produciendo una distribución de energía más uniforme en el núcleo.

50 Preferentemente, todas las barras de combustible en el elemento combustible comprenden material de combustible nuclear en forma de U enriquecido en ^{235}U .

Preferentemente, todo el Th, o al menos más del 99% del Th, es ^{232}Th .

55 Según una realización preferente, el elemento combustible tiene más de 3 m de longitud. Preferentemente, la mayoría de las barras de combustible (más del 50%, preferentemente más del 70% de las barras de combustible) tienen más de 3 m de longitud. El elemento combustible también puede comprender algunas barras de combustible más cortas, denominadas barras de combustible de longitud parcial. Preferentemente, las barras de combustible del elemento combustible están dispuestas paralelas entre sí. Durante el uso, estas y todo el elemento combustible se extienden normalmente en la dirección vertical. Preferentemente, el elemento combustible comprende uno o más canales para agua no en ebullición.

60 En este documento, el elemento combustible definido y la proporción de isótopos diferentes, se refieren al nuevo elemento combustible que se utilizará en un reactor nuclear de agua en ebullición. Durante el uso, algunos isótopos se transforman en otros isótopos (u otros elementos), por lo que la proporción de, por ejemplo, los isótopos fisibles cambia.

65 El concepto de "material de combustible nuclear" se utiliza en el presente documento para referirse tanto al material

5 fisible (por ejemplo, ^{235}U en UO_2) como al material fértil (por ejemplo, ^{232}Th en ThO_2). Las barras de combustible también pueden comprender otros componentes, tales como pastillas de capa fértil y resortes, que no constituyen material de combustible nuclear. Sin embargo, por ejemplo, los absorbentes consumibles, que pueden estar incluidos en el material de combustible nuclear, y otros aditivos, tales como material aglutinante, potenciadores de sinterización, lubricantes, U_3O_8 y formadores de poros forman parte del material de combustible nuclear, tal como se utiliza el concepto en este documento.

10 Según una realización del elemento combustible según la invención, dicho primer grupo de barras de combustible comprende también un tercer subgrupo de barras de combustible, en el que la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible de dicho tercer subgrupo, es inferior a la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible de dicho segundo subgrupo.

15 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, dicho primer grupo de barras de combustible comprende también un cuarto subgrupo de barras de combustible, en el que la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible de dicho cuarto subgrupo es inferior a la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible de dicho tercer subgrupo.

20 Al tener más subgrupos de este tipo, con una proporción variable entre Th y U en el material de combustible nuclear, se logra un elemento combustible aún más mejorado. Las diferentes barras de combustible con diferentes proporciones se pueden posicionar entonces de tal manera que la distribución de energía se vuelva aún más uniforme, también con el tiempo. También se reduce adicionalmente la necesidad de variar el enriquecimiento en U.

25 Debe observarse que el elemento combustible puede comprender también más (o menos) de cuatro de tales subgrupos con proporciones diferentes, con respecto al peso, entre Th y U.

Si, por ejemplo, el elemento combustible tiene cuatro subgrupos de este tipo, las proporciones, con respecto al peso, entre Th y U en el material de combustible nuclear para los diferentes subgrupos pueden ser, por ejemplo, las siguientes:

30 primer subgrupo: la proporción es tal que la relación $\text{Th}/(\text{Th}+\text{U})$, con respecto al peso, es 0,35-0,60, por ejemplo 0,41;
segundo subgrupo: la proporción es tal que la relación $\text{Th}/(\text{Th}+\text{U})$, con respecto al peso, es 0,29-0,34, por ejemplo 0,32;
35 tercer subgrupo: la proporción es tal que la relación $\text{Th}/(\text{Th}+\text{U})$, con respecto al peso, es de 0,15-0,28, por ejemplo 0,26;
cuarto subgrupo: la proporción es tal que la relación $\text{Th}/(\text{Th}+\text{U})$, con respecto al peso, es 0,05-0,14, por ejemplo 0,09.

40 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, en todas las barras de combustible de cada subgrupo, el enriquecimiento de ^{235}U en el U está dentro del intervalo de 4,00-6,00%, preferentemente dentro del intervalo de 4,50-5,00%. Tal grado de enriquecimiento permite una alta reactividad. Además, es ventajoso que el enriquecimiento varíe solamente en una pequeña medida, o nada en absoluto, entre las diferentes barras de combustible en dichos subgrupos.

45 Por lo tanto, el intervalo definido de enriquecimiento, según esta realización, es el que se da para al menos el primer y segundo subgrupo de barras de combustible, preferentemente también para el tercer subgrupo de barras de combustible, más preferente para todos los subgrupos de barras de combustible.

50 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, las barras de combustible de dichos subgrupos tienen el mismo enriquecimiento de ^{235}U en el U, o al menos sustancialmente el mismo enriquecimiento, preferentemente el 4,95%. Al tener el mismo alto enriquecimiento en las barras de combustible, se obtiene una alta reactividad y se simplifica la producción de las barras de combustible nuclear. Con la presente invención, todavía se obtiene una distribución de energía uniforme, incluso sin la variación en el enriquecimiento en dichas barras de combustible, debido a la variación en la proporción entre Th y U.

55 Con "sustancialmente el mismo" se entiende aquí que el enriquecimiento podría variar ligeramente, por ejemplo debido a tolerancias de producción.

60 De este modo, el mismo enriquecimiento definido, o al menos sustancialmente el mismo enriquecimiento, es, según esta realización, el que se da para al menos el primer y el segundo subgrupo de barras de combustible, preferentemente también para el tercer subgrupo de barras de combustible, más preferente para todos los subgrupos de barras de combustible.

65 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, dichos subgrupos de barras de combustible están situados en el elemento combustible de tal manera que las barras de combustible con una proporción más alta, con respecto al peso, entre Th y U estén situadas donde haya más moderador, cuando el

elemento combustible esté en uso en el reactor nuclear de agua en ebullición, que donde se sitúen las barras de combustible de un subgrupo con una proporción más baja, con respecto al peso, entre Th y U. Puede utilizarse por tanto la variación en dicha proporción, en lugar de la variación del enriquecimiento en U.

- 5 Las barras de combustible de los diferentes subgrupos están situadas de tal manera que se consiga una distribución de energía más uniforme en el elemento combustible nuclear cuando se utiliza en el reactor nuclear de agua en ebullición y de tal manera que se reduzcan los picos de energía interna en el elemento combustible.

10 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, entre el 25% y el 80%, preferentemente entre el 35% y el 70% de las barras de combustible en dicho elemento combustible pertenecen a dicho primer grupo de barras de combustible. Al tener tal número de barras de combustible en dicho primer grupo, los objetos y ventajas descritos anteriormente se obtienen de una manera eficaz.

15 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, cada una de entre el 20% y el 90% de las barras de combustible, más preferentemente entre el 25% y el 75% de las barras de combustible, pertenece a un segundo grupo de barras de combustible, en el que cada barra de combustible en este segundo grupo comprende U enriquecido en ^{235}U , pero no comprende nada de Th ni nada absorbente consumible, o al menos ninguna cantidad sustancial de Th o absorbente consumible, en el que el enriquecimiento de ^{235}U en el U en el segundo grupo se encuentra dentro del intervalo del 4,00-6,00%, preferentemente dentro del intervalo del 4,50-5,00%, lo más preferente el 4,95%. Mediante el uso de tal número de barras de combustible sin cantidades sustanciales de Th o absorbentes consumibles en el material de combustible nuclear se obtiene una reactividad elevada.

25 La expresión "ninguna cantidad significativa" significa que pueden existir cantidades insignificantes muy bajas, por ejemplo debido a las impurezas.

30 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, cada una de entre el 3% y el 20% de las barras de combustible, más preferentemente entre el 5% y el 15% de las barras de combustible, pertenece a un tercer grupo de barras de combustible, en el que cada barra de combustible de este tercer grupo comprende U enriquecido en ^{235}U y también al menos un tipo de absorbente consumible. El absorbente consumible puede ser, por ejemplo, Gd, Er o B. Es ventajoso utilizar absorbentes consumibles en el material de combustible nuclear en algunas barras de combustible para reducir la reactividad en los elementos combustibles nuevos. Sin embargo, con la presente invención solamente se necesitan utilizar muy pocas (o ninguna en absoluto) de tales barras de combustible que incluyen absorbentes consumibles.

35 La cantidad de absorbente consumible, con respecto al peso, en el material de combustible nuclear en cada barra de combustible en dicho tercer grupo puede estar, por ejemplo, entre el 1,0% y el 10%, preferentemente entre el 3,0% y el 5,0%. Preferentemente, cada barra de combustible en dicho tercer grupo no comprende nada de Th, o al menos ninguna cantidad sustancial de Th. Se puede utilizar cualquier tipo de absorbente consumible adecuado.

40 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, en cada barra de combustible de dicho segundo grupo, el enriquecimiento de ^{235}U en el U es el mismo, o al menos sustancialmente el mismo, que el enriquecimiento de ^{235}U en el U en las barras de combustible de dichos subgrupos. Al tener tantas barras de combustible con el mismo enriquecimiento en el U, la fabricación del combustible nuclear se simplifica adicionalmente, al tiempo que se puede conseguir una alta reactividad.

45 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, cada una de entre el 2% y el 10% de las barras de combustible, más preferentemente entre el 4% y el 8% de las barras de combustible, pertenece a un cuarto grupo de barras de combustible, en el que cada barra de combustible de este cuarto grupo comprende U enriquecido en ^{235}U , pero no comprende nada de Th ni nada absorbente consumible, o al menos ninguna cantidad sustancial de Th o absorbente consumible, en el que el enriquecimiento de ^{235}U en el U en el cuarto grupo es inferior al 4,00%, preferentemente dentro del intervalo del 1,50-3,00%. Parece ser ventajoso utilizar unas cuantas barras de combustible con un menor enriquecimiento en el U para evitar una conversión excesiva de ^{232}Th a ^{233}U en barras de combustible adecuadamente moderadas, lo que conduciría a una energía desproporcionadamente alta en estas barras de combustible hacia el final de la vida útil del elemento combustible. Con la presente invención, solamente se necesitan utilizar muy pocas (o ninguna en absoluto) de tales barras de combustible.

50 En el elemento combustible según la invención, el U en el material de combustible nuclear en dichas barras de combustible está presente en forma de UO_2 y el Th está presente en forma de ThO_2 . Se sabe que tales compuestos son ventajosos para su uso como combustible nuclear.

60 Según una realización adicional del elemento combustible según la invención, el material de combustible nuclear en dichas barras de combustible es en forma de pastillas dispuestas una encima de otra de tal manera que formen una pila de pastillas de combustible nuclear en los tubos de revestimiento, en el que las diferentes pastillas de combustible con material de combustible nuclear dentro de una misma barra de combustible tienen la misma composición. Se sabe que el uso de tales pastillas es ventajoso para el combustible nuclear. Puesto que las diferentes pastillas de combustible dentro de una misma barra de combustible tienen la misma composición, se

facilita la fabricación del elemento combustible nuclear.

Otro objetivo de la invención consiste en proporcionar un reactor nuclear de agua en ebullición con propiedades ventajosas. Este objetivo se consigue mediante un reactor nuclear de agua en ebullición que comprende un núcleo, en el que se disponen en dicho núcleo una pluralidad de elementos combustibles nucleares según una cualquiera de las realizaciones anteriores. Con un reactor nuclear de agua en ebullición de este tipo se implementan las ventajas descritas anteriormente en un reactor nuclear.

Un objetivo adicional de la invención consiste en proporcionar una manera ventajosa de hacer funcionar un reactor nuclear de agua en ebullición. Este objetivo se consigue mediante una manera de hacer funcionar un reactor nuclear de agua en ebullición en una central nuclear, que comprende:

disponer una pluralidad de elementos combustibles nucleares según una cualquiera de las realizaciones anteriores en el núcleo del reactor nuclear,

hacer funcionar dicho reactor nuclear de tal manera que se produzca energía.

Con esta manera de hacer funcionar un reactor nuclear de agua en ebullición se consiguen las ventajas mencionadas anteriormente.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 muestra esquemáticamente un reactor nuclear de agua en ebullición de una central nuclear.

La figura 2 muestra esquemáticamente un elemento combustible para un reactor de agua en ebullición.

La figura 3 muestra esquemáticamente una sección transversal de una realización de un elemento combustible según la invención.

La figura 4 muestra esquemáticamente una barra de combustible.

Descripción de una realización de la invención

Ahora se describirá una realización según la invención con referencia a las figuras.

Así, la figura 1 muestra esquemáticamente una central nuclear con un reactor nuclear de agua en ebullición (BWR). La central comprende una vasija del reactor 10. En el núcleo de la vasija del reactor 10 se disponen un gran número de elementos combustibles 12. En la vasija del reactor 10 hay también barras de control 13, que pueden insertarse entre los elementos combustibles 12 con el fin de controlar el funcionamiento del reactor nuclear. El vapor de la vasija del reactor 10 se conduce a través de un conducto 14 hacia una turbina 15. Con la ayuda de la turbina 15 se genera energía eléctrica mediante un generador eléctrico 16. El vapor de la turbina 15 es conducido hacia un condensador de vapor 17. El condensador de vapor 17 se refrigera mediante agua fría que es transportada en un conducto 18. El agua del condensador 17 es devuelta a la vasija del reactor 10 a través de un conducto 19.

La figura 2 muestra esquemáticamente un elemento combustible 12 según una realización de la presente invención para un BWR. El elemento combustible puede tener aproximadamente 4 m de longitud y define una dirección longitudinal L. La figura 2 muestra una parte superior y una parte inferior del elemento combustible. El elemento combustible 12 tiene un elemento de conexión 20 en la parte inferior del elemento combustible. En la parte superior del elemento combustible 12 hay un asa 22. El elemento combustible 12 comprende una serie de barras de combustible 23. Un canal de combustible 25 rodea las barras de combustible 23. Según esta realización, el canal de combustible 25 tiene una forma generalmente cuadrada (véase también la figura 3) y por lo tanto tiene cuatro esquinas. Una esquina está marcada con 24 en la figura 2. Debe observarse que en la figura 2 se ha eliminado parte del canal de combustible 25 para mostrar las barras de combustible 23 dentro del canal de combustible 25.

Cuando el elemento combustible 12 está en uso en un BWR nuclear, el agua entra en el canal de combustible 25 por la parte inferior a través del elemento de conexión 20 y el vapor producido sale por la parte superior del canal de combustible 25.

Según una realización de la presente invención, cada barra de combustible 23 comprende un tubo de revestimiento 52 (véase la figura 4) y material de combustible nuclear en forma de pastillas 50 dispuestas de tal manera que formen una pila en el tubo de revestimiento 52. Las pastillas 50 de combustible nuclear comprenden material de combustible nuclear en forma de UO_2 . El U está enriquecido en ^{235}U .

La figura 3 muestra esquemáticamente una sección transversal de un elemento combustible 12 según una realización de la presente invención.

Todos los pequeños círculos de la figura 3 son barras de combustible 23 (véase también la figura 2). Las barras de

combustible están rodeadas por el canal de combustible 25 descrito anteriormente. El elemento combustible también comprende dos canales de agua 28. Durante el uso fluye agua no en ebullición a través de estos canales de agua 28. El agua en los canales de agua 28 funciona como un moderador de neutrones.

5 Cuando se utiliza el elemento combustible 12 en un BWR nuclear, dos de los lados del elemento combustible 12 (el lado a la izquierda de la figura 3 y el lado en la parte superior de la figura 3) se situarán junto a un espacio en el que pueden insertarse aletas de barras de control. La esquina 24 apunta al centro transversal de una barra de control cruciforme. Dado que el diseño de tales barras de control es conocido por un experto en la materia, la barra de control no se describirá con más detalle en el documento.

10 Las barras de combustible marcadas con 41, 32, 26 y 9 en la figura 3 constituyen juntas un primer grupo de barras de combustible. El material de combustible nuclear en cada barra de combustible de este primer grupo comprende, además del mencionado UO_2 , también ThO_2 .

15 El primer grupo de barras de combustible 41, 32, 26, 9 comprende un primer, un segundo, un tercer y un cuarto subgrupo de barras de combustible. Las proporciones, con respecto al peso, entre Th y U en las barras de combustible de los diferentes subgrupos difieren entre sí.

20 En la realización mostrada, el primer subgrupo tiene seis barras de combustible marcadas con 41. La proporción entre Th y U en cada barra de combustible de este subgrupo es tal que la relación $\text{Th}/(\text{Th}+\text{U})$, con respecto al peso, es aproximadamente 0,41.

25 Las barras de combustible del segundo subgrupo están marcadas con 32. En la realización mostrada hay siete barras de combustible de este tipo. La proporción entre Th y U en cada barra de combustible de este segundo subgrupo es tal que la relación $\text{Th}/(\text{Th}+\text{U})$, con respecto al peso, es de aproximadamente 0,32.

30 Las barras de combustible del tercer subgrupo están marcadas con 26. Hay dieciocho barras de combustible de este tipo en la realización mostrada. La proporción entre Th y U en cada barra de combustible de este tercer subgrupo es tal que la relación $\text{Th}/(\text{Th}+\text{U})$, con respecto al peso, es de aproximadamente 0,26.

35 Las barras de combustible en el cuarto subgrupo están marcadas con 9. Hay catorce barras de combustible de este tipo en la realización mostrada. La proporción entre Th y U en cada barra de combustible en el cuarto subgrupo es tal que la relación $\text{Th}/(\text{Th}+\text{U})$, con respecto al peso, es de aproximadamente 0,09.

40 Las barras de combustible que no están marcadas en la figura 3 (pequeños círculos vacíos) constituyen un segundo grupo de barras de combustible. Estas barras de combustible comprenden material de combustible nuclear en forma de UO_2 , pero no comprenden nada de Th ni nada de absorbente consumible. En la realización mostrada hay treinta y dos barras de combustible de este tipo.

45 Para cada una de las barras de combustible descritas hasta ahora (es decir, las barras de combustible marcadas con 41, 32, 26, 9 y los pequeños círculos vacíos), el enriquecimiento de ^{235}U en el U es del 4,95%.

50 En la figura 3, nueve barras de combustible están marcadas con Gd. Estas barras de combustible constituyen un tercer grupo de barras de combustible. Cada barra de combustible de este tipo comprende, además del UO_2 , también un absorbente consumible. Según esta realización, el material de combustible nuclear de cada una de estas barras de combustible contiene aproximadamente un 3,5%, con respecto al peso, de Gd_2O_3 como absorbente consumible. El enriquecimiento de ^{235}U puede ser algo menor en estas barras de combustible que en las barras de combustible de dicho primer grupo y dicho segundo grupo.

55 Las barras de combustible marcadas con una cruz en la figura 3 constituyen un cuarto grupo de barras de combustible. El material de combustible nuclear en cada barra de combustible de este grupo de barras de combustible comprende U enriquecido en ^{235}U , pero no comprende nada de Th ni nada de absorbente consumible. Además, el enriquecimiento de ^{235}U en el U en este cuarto grupo de barras de combustible es inferior al 3,00%. Según esta realización, cinco tales barras de combustible 29 tienen el enriquecimiento del 2,08% y una barra de combustible 30 tiene el enriquecimiento del 1,88%. La barra de combustible 30 está situada en la esquina 24 que está destinada a situarse junto al centro transversal de una barra de control cruciforme.

60 Debe observarse que, con respecto a los mencionados subgrupos de barras de combustible 41, 32, 26, 9, las barras de combustible con una proporción mayor, con respecto al peso, entre Th y U se sitúan generalmente donde haya más moderador (más agua) cuando el elemento combustible esté en uso en el BWR nuclear, que donde se sitúen las barras de combustible de un subgrupo con una proporción más baja. Se puede observar que en un elemento combustible para un BWR, generalmente habrá más moderador cerca de las esquinas del elemento combustible. Además de los materiales descritos anteriormente en esta realización, el material de combustible nuclear en barras de combustible puede contener pequeñas cantidades de otros aditivos, como es conocido por un experto en la técnica.

65

En cada barra de combustible 13, el material de combustible nuclear está dispuesto en forma de pastillas 50 de la manera descrita en relación con la figura 4. Las diferentes pastillas 50 de combustible nuclear dentro de una misma barra de combustible 23 tienen la misma composición.

5 La figura 1 ilustra también una realización de un reactor nuclear de agua en ebullición según la presente invención, cuando se ha cargado el núcleo del reactor, dentro de la vasija del reactor 10, con una pluralidad de elementos combustibles 12 nucleares según la realización descrita anteriormente.

10 Según la presente invención, una manera de hacer funcionar un reactor nuclear de agua en ebullición de una central nuclear comprende:

15 disponer una pluralidad de elementos combustibles 12 nucleares según la realización descrita anteriormente en el núcleo del reactor nuclear, y hacer funcionar el reactor nuclear de tal manera que se produzca energía, por ejemplo con la ayuda de un generador eléctrico 16 como se muestra en la figura 1.

La presente invención no se limita a los ejemplos descritos en el presente documento, sino que puede variarse y modificarse dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

20

REIVINDICACIONES

1. Un elemento combustible (12) para un reactor nuclear de agua en ebullición, que comprende:

- 5 una pluralidad de barras de combustible (23), comprendiendo cada una un tubo de revestimiento (52) y un material de combustible nuclear situado en el tubo de revestimiento, un canal de combustible (25) que rodea dicha pluralidad de barras de combustible, en el que cada una de al menos el 95% de las barras de combustible (23) comprende material de combustible nuclear en forma de U enriquecido en ^{235}U ,
- 10 en el que cada una de al menos el 20% de las barras de combustible pertenece a un primer grupo de barras de combustible (41, 32, 26, 9), en el que cada barra de combustible en este primer grupo comprende tanto U enriquecido en ^{235}U como Th, caracterizado por que dicho primer grupo de barras de combustible comprende al menos un primer y un segundo subgrupo de barras de combustible (41, 32), en el que la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible (41) de dicho primer subgrupo, es superior a la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible (32) de dicho segundo subgrupo, en el que el U en el material de combustible nuclear en dichas barras de combustible (23) está presente en forma de UO_2 y el Th está presente en forma de ThO_2 .
- 20 2. Un elemento combustible (12) según la reivindicación 1, en el que dicho primer grupo de barras de combustible (41, 32, 26, 9) comprende también un tercer subgrupo de barras de combustible (26), en el que la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible (26) de dicho tercer subgrupo, es inferior a la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible (32) de dicho segundo subgrupo.
- 25 3. Un elemento combustible (12) según la reivindicación 2, en el que dicho primer grupo de barras de combustible (41, 32, 26, 9) comprende también un cuarto subgrupo de barras de combustible (9), en el que la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible (9) de dicho cuarto subgrupo, es inferior a la proporción, con respecto al peso, entre Th y U, en cada barra de combustible (26) de dicho tercer subgrupo.
- 30 4. Un elemento combustible (12) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que en todas las barras de combustible (41, 32, 26, 9) de cada subgrupo, el enriquecimiento de ^{235}U en el U está dentro del intervalo del 4,00-6,00%, preferentemente dentro del intervalo del 4,50-5,00%.
- 35 5. Un elemento combustible (12) según la reivindicación 4, en el que las barras de combustible (41, 32, 26, 9) de dichos subgrupos tienen el mismo enriquecimiento de ^{235}U en el U, o al menos sustancialmente el mismo enriquecimiento, preferentemente el 4,95%.
- 40 6. Un elemento combustible (12) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos subgrupos de barras de combustible están situados en el elemento combustible de tal manera que las barras de combustible con una proporción superior, con respecto al peso, entre Th y U estén situadas donde haya más moderador, cuando el elemento combustible esté en uso en el reactor nuclear de agua en ebullición, que donde se sitúen las barras de combustible de un subgrupo con una proporción más baja, con respecto al peso, entre Th y U.
- 45 7. Un elemento combustible (12) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que entre el 25% y el 80%, preferentemente entre el 35% y el 70% de las barras de combustible (23) en dicho elemento combustible pertenecen a dicho primer grupo de barras de combustible (41, 32, 26, 9).
- 50 8. Un elemento combustible (12) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada una de entre el 20% y el 90% de las barras de combustible, más preferentemente entre el 25% y el 75% de las barras de combustible, pertenece a un segundo grupo de barras de combustible (pequeños círculos vacíos en la figura 3), en el que cada barra de combustible en este segundo grupo comprende U enriquecido en ^{235}U , pero no comprende nada de Th ni nada de absorbente consumible, o al menos ninguna cantidad sustancial de Th o absorbente consumible, en el que el enriquecimiento de ^{235}U en el U en el segundo grupo está dentro del intervalo del 4,00-6,00%, preferentemente dentro del intervalo del 4,50-5,00%, más preferentemente el 4,95%.
- 55 9. Un elemento combustible (12) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada una de entre el 3% y el 20% de las barras de combustible, más preferentemente entre el 5% y el 15% de las barras de combustible, pertenece a un tercer grupo de barras de combustible (Gd), en el que cada barra de combustible en este tercer grupo comprende U enriquecido en ^{235}U y también al menos un tipo de absorbente consumible.
- 60 10. Un elemento combustible (12) según la reivindicación 8 o 9, en el que, en cada barra de combustible (pequeños círculos vacíos) de dicho segundo grupo, el enriquecimiento de ^{235}U en el U es el mismo, o al menos sustancialmente el mismo, que el enriquecimiento de ^{235}U en el U en las barras de combustible (41, 32, 26, 9) de dichos subgrupos.
- 65 11. Un elemento combustible (12) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada uno de

- entre el 2% y el 10% de las barras de combustible, más preferentemente entre el 4% y el 8% de las barras de combustible, pertenece a un cuarto grupo de barras de combustible (29, 30), en el que cada barra de combustible (29, 30) de este cuarto grupo comprende U enriquecido en ^{235}U , pero no comprende nada de Th ni nada de absorbente consumible, o al menos ninguna cantidad sustancial de Th o absorbente consumible, en el que el enriquecimiento de ^{235}U en el U en el cuarto grupo es menor del 4,00%, preferentemente dentro del intervalo del 1,50-3,00%.
- 5
12. Un elemento combustible (12) según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el material de combustible nuclear en dichas barras de combustible es en forma de pastillas (50) dispuestas una encima de otra de tal manera que formen una pila de pastillas de combustible nuclear en los tubos de revestimiento (52), en el que las diferentes pastillas de combustible con material de combustible nuclear dentro de una misma barra de combustible (23) tienen la misma composición.
- 10
13. Un reactor nuclear de agua en ebullición, que comprende un núcleo, en el que una pluralidad de elementos combustibles (12) nucleares según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores están dispuestos en dicho núcleo.
- 15
14. Una manera de operar un reactor nuclear de agua en ebullición en una central nuclear, que comprende:
- 20
- disponer una pluralidad de elementos combustibles (12) nucleares según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el núcleo del reactor nuclear,
operar dicho reactor nuclear de tal manera que se produzca energía.
- 25

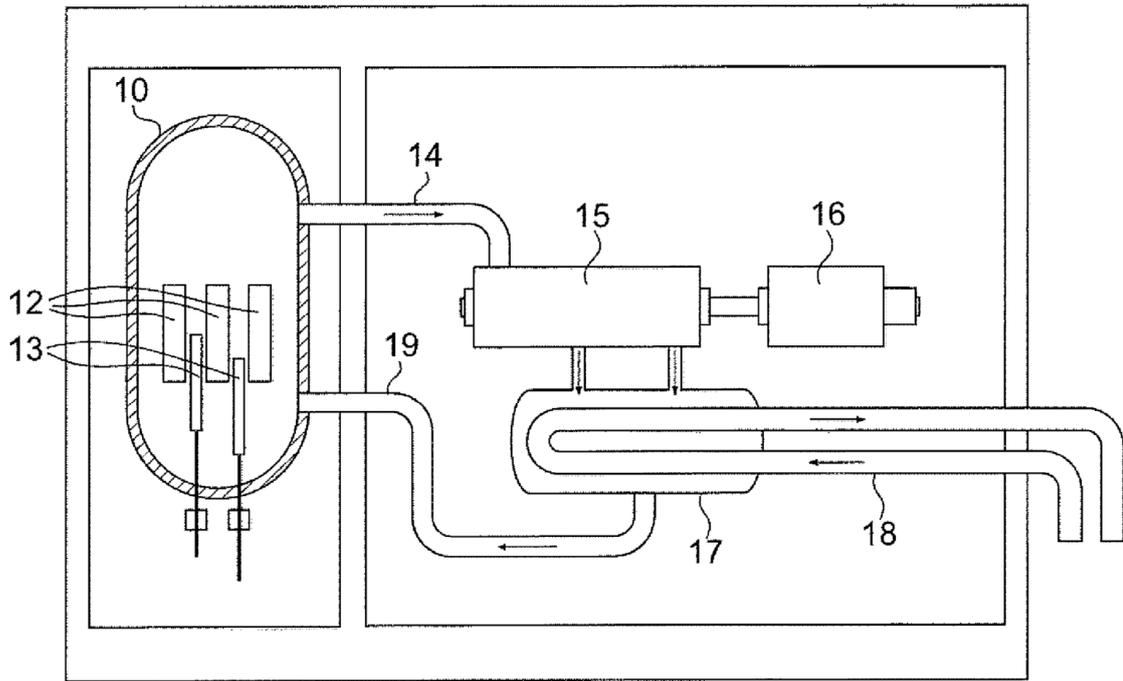


Fig. 1

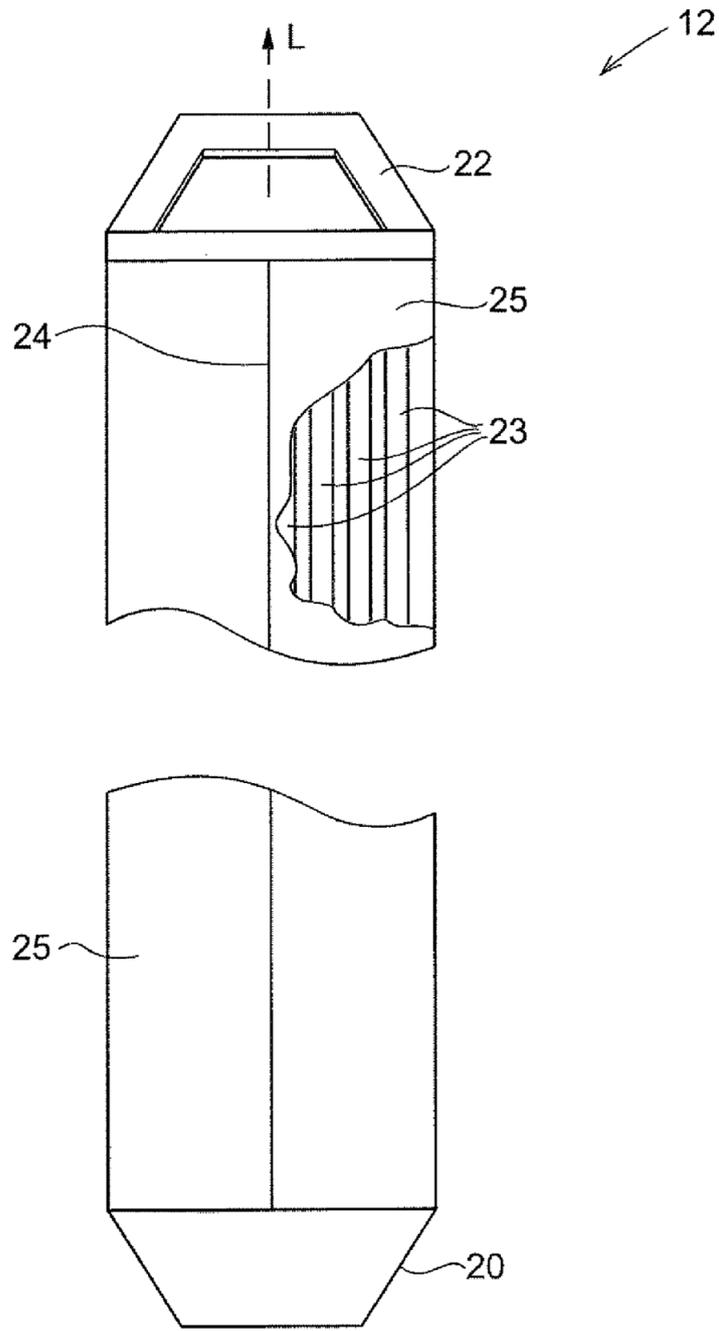


Fig. 2

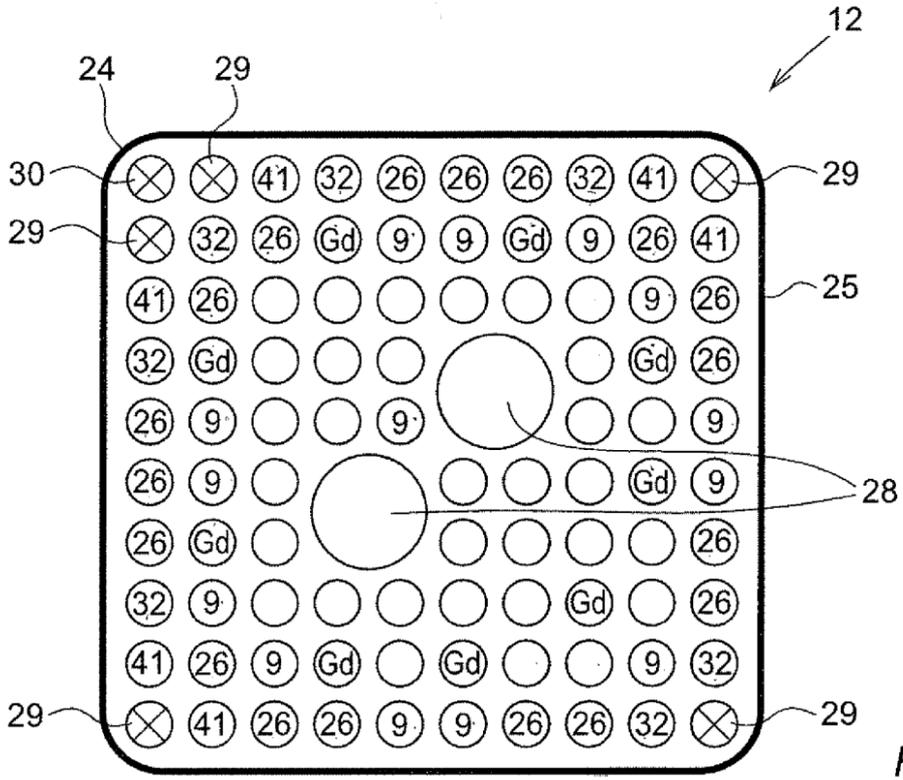


Fig. 3

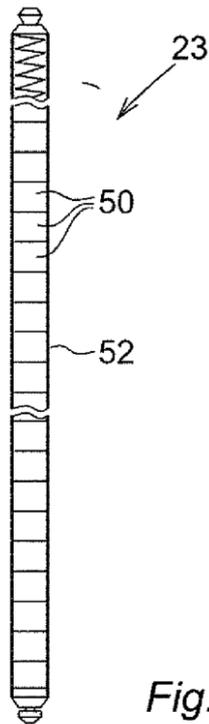


Fig. 4