



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 321 540**

51 Int. Cl.:

G21C 3/62 (2006.01)

G21C 3/64 (2006.01)

G21C 21/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06012599 .4**

96 Fecha de presentación : **27.11.2001**

97 Número de publicación de la solicitud: **1713086**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **18.10.2006**

54 Título: **Pastilla de óxido de combustible nuclear y procedimiento de fabricación correspondiente.**

30 Prioridad: **30.11.2000 FR 00 15506**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
08.06.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
08.06.2009

73 Titular/es: **Areva NP**
Tour Areva - 1 place de la Coupole
92400 Courbevoie, FR

72 Inventor/es: **Delafoy, Christine y**
Deydier, Pascal

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

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

Pastilla de óxido de combustible nuclear y procedimiento de fabricación correspondiente.

La invención se refiere al combustible nuclear utilizado en los reactores refrigerados y moderados con agua.

El combustible nuclear se presenta en los reactores de este tipo en forma de pastillas sinterizadas de forma aproximadamente cilíndrica, a base de óxido de uranio enriquecido en el isótopo 235 y/o en plutonio. El combustible puede comprender también un veneno neutrónico y/o un porcentaje reducido de metales u óxidos destinados a provocar un crecimiento de los granos durante la sinterización y a aumentar la retención de los gases de fisión (documento WO-A-94 29874). El combustible se utiliza en forma de apilamiento de pastillas en vainas de aleación a base de zirconio para constituir barras o elementos combustibles. Estas barras se montan en un armazón para constituir un conjunto combustible. En general, este armazón está constituido por dos conteras unidas por tubos que llevan rejillas de retención de las barras en los nodos de una red regular. Se describen conjuntos de este tipo, por ejemplo, en las patentes US 5 844 958 y 4 804 516 a las que se podrá hacer referencia.

La seguridad es un imperativo en el diseño de pastillas y barras. Por motivos económicos, se busca prologar lo máximo posible el tiempo de permanencia de las barras de combustible en el reactor y reducir el coste de fabricación de las pastillas. Un factor importante que limita la flexibilidad de explotación del reactor es el aumento del riesgo de ruptura de la vaina por la sollicitación mecánica provocada por la interacción pastillas-vaina, designada con la abreviatura IPG.

Hasta ahora, se han adoptado de forma casi universal pastillas cuasicilíndricas que tienen una altura superior a su diámetro. A modo de ejemplo, en la actualidad se utilizan ampliamente pastillas que tienen un diámetro D de aproximadamente 8,2 mm y una altura H de 13,4 mm, que corresponden a una razón H/D de 1,6 aproximadamente. Está prevista una holgura diametral relativamente importante, del orden de 170 μm , entre las pastillas y la vaina, para reducir la IPG, y se disponen huecos en las caras de extremo de las pastillas y esas caras terminales presentan un bisel.

También se proponen (documento JP-A-54 07 4985) barras de combustible nuclear en las que las pastillas y la vaina están dimensionadas de modo que las pastillas tengan una razón altura/diámetro inferior a 0,7 y simultáneamente que la diagonal de la pastilla sea inferior a la suma del diámetro y de la holgura radial, lo que se traduce en una holgura radial importante, que es un obstáculo para las transferencias térmicas.

La invención pretende especialmente proporcionar barras que contienen un apilamiento de pastillas de combustible nuclear que responden mejor a las exigencias de la práctica que las conocidas anteriormente, especialmente porque las tensiones circunferenciales debidas a la IPG se reducen considerablemente, incluso para un mismo valor de la holgura diametral inicial entre las pastillas y la vaina.

Con este objetivo, la invención propone especialmente una barra de combustible nuclear que comprende una vaina de aleación a base de zirconio y un apilamiento de pastillas de combustible nuclear en las que la razón H/D entre la altura y el diámetro está comprendida entre 0,4 y 0,6, preferiblemente de aproximadamente 0,5, no superando la holgura diametral inicial entre las pastillas y la vaina los 200 μm .

No se superarán los 200 μm puesto que se degradarían las transferencias térmicas, particularmente al comienzo de la irradiación, y habría un aumento de la liberación de gases de fisión.

La holgura mínima admisible puede ser más reducida que en el caso de pastillas "largas" debido a la ganancia que proporcionan las pastillas "cortas" en tensión en la vaina. Teniendo en cuenta tolerancias inevitables, puede estimarse que una holgura nominal de 135 μm constituye un mínimo.

Se ha constatado que una barra de este tipo permite reducir de modo muy considerable las tensiones circunferenciales en la vaina por las potencias elevadas.

Un estudio sistemático ha demostrado que las tensiones circunferenciales, siendo todo lo demás igual, continúan disminuyendo para razones H/D inferiores a 0,4 y que el aumento de tensión de Tresca (tensión circunferencial menos tensión radial) continúa creciendo. Pero se prevén dificultades en la aplicación industrial cuando la razón H/D es inferior a 0,4.

Al menos en los reactores con agua a presión, las pastillas presentan huecos, en general en forma de cúpula esférica, para compensar los efectos de dilatación diferencial que aparecen en el radio de la pastilla durante los transitorios.

Los diámetros de los huecos de las caras de extremo podrían seguir siendo los mismos que los de las pastillas "largas". El diámetro del hueco debe dejar que subsista una superficie de contacto suficiente entre dos pastillas apiladas. Para una pastilla de 8,192 mm de diámetro, podrá utilizarse un diámetro de hueco de 4,72 mm, cuando la pastilla presenta un bisel en una longitud de 0,42 mm. Una reducción de la profundidad de los huecos en proporción estricta a la reducción de altura no es favorable para las razones H/D entre 0,4 y 0,6. Será ventajoso aumentar la profundidad para una razón H/D entre 0,4 y 0,6.

ES 2 321 540 T3

En ciertos casos, podrá incluso eximirse de rectificar la pastilla, lo que representa una ventaja económica importante, especialmente por la supresión de los lodos de rectificación y la simplificación de la fabricación.

5 La holgura inicial, que no supera los 200 μm , tiene en cuenta las transferencias térmicas entre las pastillas y la vaina. El diámetro nominal inicial de las pastillas puede ser el previsto comúnmente en la actualidad, del orden de 8,192 mm. Puede admitirse una holgura inicial reducida si las pastillas se rectifican, lo que reduce la dispersión entre los diámetros medios de diferentes pastillas y la diferencia entre los diámetros máximo y mínimo de una misma pastilla.

10 Se facilita la carga si existen biseles en la periferia de las caras de extremo. Por último, parece que el paso de una pastilla que tiene una altura muy superior a su diámetro a una pastilla de altura próxima a la mitad del diámetro no se traduce en una fragilización redhibitoria.

15 De modo general, parece que el empleo de pastillas cortas con la holgura máxima indicada anteriormente reduce la interacción pastilla-vaina, o IPG, especialmente debido a una disminución instantánea de la dilatación de las pastillas durante los transitorios de potencia (reducción de la deformación en diábolo) incluso para transitorios a muy alta velocidad. Reduciéndose la diferencia de geometría entre el plano medio y el plano entre las pastillas, se deriva una disminución de la deformación radial de la vaina, es decir, una reducción de las tensiones y las consecuencias de la IPG. Por tanto, se obtiene una barra con márgenes de manejabilidad aumentados. El efecto sólo depende en primera
20 instancia de la variación de temperatura del combustible durante el transitorio (inducido por la variación de potencia) y no de la temperatura media de las pastillas durante el transitorio.

En un modo de realización ventajoso, las pastillas contienen un aditivo constituido por un óxido metálico que activa el crecimiento cristalino y que aumenta la viscoplasticidad, favoreciendo la fluencia a alta temperatura y la
25 retención de gases de fisión. Las pastillas de este tipo pueden utilizarse sea cual sea la razón H/D, y especialmente si está comprendida entre 0,5 y 1,6.

Entre los aditivos que pueden utilizarse, pueden citarse especialmente Cr_2O_3 , SiO_2 , Nb_2O_5 y Al_2O_3 , aisladamente o en combinación.

30 SiO_2 , a un contenido de 100 a 300 ppm, mejora la fluencia mediante la formación de una fase viscosa que facilita el deslizamiento en los límites de grano, pero SiO_2 no tiene un efecto favorable sobre el tamaño de los granos, que se busca aumentar para ralentizar la liberación de gas de fisión. Además, utilizado solo, debilita las pastillas. Asociado a un contenido de 1200 a 2000 ppm de Cr_2O_3 , SiO_2 , a un contenido que va hasta 200 ppm, tiene un efecto favorable.
35 ble.

Al_2O_3 sólo puede utilizarse con un contenido reducido, del orden de 75 ppm, correspondiente a su límite de solubilidad en UO_2 a la temperatura de sinterización. Así tiene un efecto favorable sobre la velocidad de fluencia. Pero la necesidad de un control preciso del contenido complica la fabricación. Puede añadirse Al_2O_3 a un contenido de
40 hasta 100 ppm, a un contenido de 1200 a 2000 ppm de Cr_2O_3 .

Los estudios efectuados han demostrado que la introducción de Cr_2O_3 en el polvo de UO_2 , (que comprende eventualmente una fracción de PuO_2), a un contenido inicial que conduce a un contenido comprendido entre 1250 ppm y 2000 ppm en las pastillas sinterizadas, presenta un interés muy particular por el aumento de la fluencia a las tempe-
45 raturas y los niveles de tensión que se encuentran en funcionamiento en las barras de combustible y por aumentar la viscoplasticidad del producto sinterizado, reduciendo así el empuje de las pastillas sobre la vaina durante los transitorios de potencia.

La adición de ciertos óxidos o ciertos metales permite obtener un crecimiento de los granos.

50 En particular, Cr_2O_3 provoca, para contenidos superiores a 750 ppm, un aumento del tamaño de los granos. Más allá de 1500 ppm, el tamaño de los granos aumenta de modo casi exponencial. El contenido final se elegirá entre 1200 ppm y 2000 ppm. Será ventajoso adoptar un contenido final de 1600 ± 150 ppm, puesto que por debajo, el crecimiento de los granos es limitado y, más allá de 1750 ppm de contenido inicial, se produce una fuerte evaporación del dopante
55 en el horno de sinterización y no hay un aumento apreciable sobre el comportamiento en fluencia.

En la práctica, se utilizará un contenido de aproximadamente 1600 ppm, que es favorable a la vez para la mejora de la fluencia y para el aumento del tamaño de los granos.

60 Para obtener características óptimas cuando las pastillas contienen un aditivo dopante, y especialmente Cr_2O_3 , es deseable efectuar la sinterización en condiciones que no pongan en riesgo llevar el Cr_2O_3 al estado metálico, a pesar del hecho de que los hornos de sinterización habituales no admiten una atmósfera oxidante. En la práctica, un tratamiento de pastillas verdes comprenderá generalmente una presinterización a una temperatura en una atmósfera de hidrógeno seca o que comprende una fracción de vapor de agua muy reducida y una sinterización a una temperatura máxima
65 comprendida entre 1700°C y 1750°C, en una atmósfera de hidrógeno que tiene del 1,9% al 2,5% en volumen de vapor de agua, en la zona de sinterización, lo que puede conducir hasta aproximadamente el 3% de vapor de agua a la entrada del horno continuo de sinterización.

ES 2 321 540 T3

En un modo de realización, la pastilla sinterizada presenta una forma sensiblemente cilíndrica con huecos y biseles. No obstante, puede adoptar una forma de barril dando a la pastilla un diámetro, en su plano medio, superior en varias decenas de micras al diámetro de las caras terminales, para contrarrestar la deformación en diábolo. También puede utilizarse una forma muy ligeramente cónica cuando hay variaciones de densidad a lo largo de la pastilla.

Las caras terminales comprenden ventajosamente huecos, en forma de cúpula esférica y/o biseles.

Las características anteriores, así como otras, se pondrán de manifiesto mejor con la lectura de la descripción que sigue de modos de realización particulares, facilitados a modo de ejemplos no limitativos. La descripción se refiere a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1, en la que no se respeta la escala para una mayor claridad, es una vista en sección que muestra los parámetros dimensionales de una pastilla de combustible nuclear y de una vaina;

- la figura 2 es una vista esquemática en sección de un tramo de la barra;

- la figura 3 muestra la variación de la tensión de Tresca en función de la razón H/D para pastillas con el mismo hueco en una vaina cargada con pastillas de tipo corriente y con pastillas rectificadas según la invención;

- la figura 4 muestra un perfil típico de variación de temperatura en un horno de desplazamiento;

- la figura 5 muestra un perfil típico de humedad en función de la temperatura, a respetar en un horno.

Las pastillas 10 que han sido el objeto de los estudios estaban constituidas por óxido de uranio débilmente enriquecido; estaban destinadas a introducirse en vainas 12 de aleación a base de zirconio, que tenían un grosor de 0,57 mm y un diámetro interno nominal de 8,36 mm; se utilizaron especialmente vainas 12 de la clase mostrada en la figura 2, cerradas por tapones 13 que presentaban cada uno una contera de extremo troncocónico y una ranura de sujeción. En un conjunto combustible, las barras así constituidas se mantienen generalmente mediante rejillas 15 que pertenecen al armazón y dotadas de salientes y/o de resortes de retención de la barra. Un fragmento de una rejilla de este tipo está representado esquemáticamente en la figura 2.

La comparación que se realizará posteriormente corresponde al caso de pastillas rectificadas. Todas las pastillas tenían un diámetro D medio de 8,192 mm. Se recuerda que las pastillas convencionales tienen una razón $H/D = 1,64$. Las irregularidades de diámetro (inferiores a $30\text{ }\mu\text{m}$) observadas en pastillas no rectificadas no tienen una influencia notable sobre el interés del concepto de pastilla muy corta.

Los dos últimos valores sólo se han tenido en cuenta para las pastillas según la invención que tienen un valor $H/D = 0,5$. Para las pastillas convencionales, sólo se ha conservado el valor habitual.

La mayor parte de las pastillas se han comprimido y sinterizado, después se han rectificado en condiciones que les proporcionan una forma cilíndrica; también es posible utilizar el procedimiento descrito en la solicitud de patente francesa número EN 00 15 507 para "Procédé de fabrication des pastilles de combustible nucléaire oxyde" ("Procedimiento de fabricación de pastillas de óxido de combustible nuclear"), a la que se podrá hacer referencia.

Se ha efectuado una comparación entre las tensiones circunferenciales y radiales, calculadas por simulación, en la zona de la vaina que es generalmente crítica, es decir, en el plano interno de la vaina, en el plano entre pastillas. Una serie de ensayos ha conducido a la curva facilitada en la figura 3. Esta curva representa el aumento sobre la tensión de Tresca en función de la razón H/D para una potencia disipada de 424 W por centímetro de longitud de la barra, en comparación con pastillas cilíndricas de tipo corriente, que tienen una razón $H/D = 1,64$, teniendo todas el mismo hueco de 0,32 mm.

Se constata que el aumento de tensión puede ser cercano a 50 MPa para $H/D = 0,5$, lo que permite aumentar la potencia admisible en transitorio sin por ello alcanzar el valor, comprendido entre 460 MPa y 495 MPa, que se considera generalmente como un límite de tensión que no ha de superarse en la vaina. Puede mejorarse así la flexibilidad de explotación de reactores comerciales y responder rápidamente a cualquier demanda de electricidad instantánea de la red.

En resumen, y aunque la tensión circunferencial continúe disminuyendo por debajo de un valor H/D de 0,5, este valor de 0,5 parece estar próximo al óptimo, si se tienen en cuenta otros parámetros, como la fragilidad de las pastillas y el riesgo de fraccionamiento.

También se ha estudiado una forma de diábolo. Se ha constatado que no tiene una influencia notable. La presencia de una fracción cilíndrica en los extremos permite reducir el ángulo de apoyo contra la vaina. Sobre pastillas que tienen una razón $H/D = 0,5$, para la misma profundidad de hueco, no debe superarse en general una diferencia de aproximadamente $20\text{ }\mu\text{m}$ entre el radio de las caras de extremo y el radio mínimo.

Las variabilidades de diámetro observadas ($< 30\text{ }\mu\text{m}$) en las pastillas no rectificadas no tienen una influencia notable sobre el interés de este concepto de pastillas.

ES 2 321 540 T3

Del conjunto de los resultados obtenidos, pueden extraerse las siguientes conclusiones.

La disminución de la razón H/D aporta un aumento notable desde el punto de vista de las tensiones, a consecuencia de diversos fenómenos y especialmente debido al hecho de que esta disminución reduce la deformación geométrica en diábolo provocada por la diferencia de temperatura entre el centro de la pastilla y su periferia. Un valor H/D = 0,5 representa, para pastillas de dióxido de uranio que tienen un diámetro próximo al valor habitual de 8,192 mm, un compromiso satisfactorio entre la reducción de las tensiones, las posibilidades de fabricación y la fragilización; a menudo permite, debido a la reducción de las tensiones, utilizar pastillas no rectificadas, por tanto, más económicas.

La profundidad p de los huecos estará comprendida en general entre 0,013 H y 0,052 H. Es posible conservar el valor p = 0,32 mm utilizado comúnmente en la actualidad para D = 8,192 mm.

Como se indicó anteriormente, la presencia de aditivos dopantes, y especialmente de óxido de cromo Cr₂O₃, en las pastillas verdes, combinado con un modo de sinterización que favorece un crecimiento de los granos, permite aumentar la fluencia de las pastillas sinterizadas y la plasticidad y por tanto, disminuir la IPG.

En la práctica, la influencia de Cr₂O₃ sobre el comportamiento en fluencia y el aumento del tamaño de los granos de UO₂ en el transcurso de la sinterización pone en práctica diferentes mecanismos que han debido identificarse para llegar a un resultado óptimo.

- El comportamiento en fluencia, estudiado a temperaturas que van de 1400°C a 1600°C bajo tensiones que van de 30 MPa a 60 MPa ha mostrado una fuerte incidencia de la forma de Cr₂O₃ en la matriz de UO₂ y del tamaño de los granos, con un aumento en todos los casos que puede llegar hasta un factor de 10, y en general un aumento de la fluencia que es óptimo para los valores cercanos a 1500 ppm cuando se utiliza Cr₂O₃ solo.

- El crecimiento de los granos señala, para contenidos de hasta 1500 ppm, una solubilización casi completa de Cr₂O₃ en UO₂, y una activación del crecimiento cristalino correspondiente a un aumento del coeficiente de difusión de U⁴⁺ en UO₂ que permite llegar a un tamaño de los granos de aproximadamente 40 μm para condiciones de sinterización óptimas, con una temperatura máxima de aproximadamente 1750°C. Para contenidos superiores, el aumento de la movilidad de los límites de grano, para un incremento de la cantidad de Cr₂O₃ intergranular, proporciona una evolución rápida del tamaño de los granos que conduce a un tamaño superior a 40 μm.

La búsqueda de un valor óptimo de concentración desde el punto de vista del tamaño de los granos y de las capacidades de retención de gases de fisión debe tener en cuenta, sin embargo, la tecnología de los hornos de sinterización industriales y el hecho de que el valor óptimo no es forzosamente el mismo que el relativo a la fluencia. En la actualidad, los hornos utilizan atmósferas reductoras, puesto que comprenden elementos oxidables. Por tanto, se efectuará la sinterización en una atmósfera de hidrógeno, pero asociada a la de vapor de agua para aumentar el potencial de oxígeno de la atmósfera y favorecer la acción del dopante. Un contenido del 5% máximo en volumen de vapor de agua, admisible en los hornos, permite obtener a un potencial de oxígeno de aproximadamente -500 kJ/mol en frío, que puede llegar a -350 kJ/mol a 2000°C.

Una comparación con el potencial de oxígeno correspondiente al equilibrio Cr/Cr₂O₃ hace que parezca que Cr₂O₃ puede reducirse para dar cromo a partir de 1000°C bajo una atmósfera de hidrógeno con un 0,005% de vapor de agua, pero solamente a partir de 1500°C bajo una atmósfera de hidrógeno y a partir del 1% de vapor de agua, y que Cr₂O₃ se estabiliza a 1700°C-1750°C más allá del 2,5% de vapor de agua.

Por otro lado, más allá de 1750 ppm de Cr₂O₃ en las pastillas verdes, se produce en el transcurso de la sinterización una fuerte evaporación que hace que sea difícil superar un contenido global final de 1800 ppm en la pastilla sinterizada.

La sinterización, para ser satisfactoria, exige alcanzar localmente (en un horno en desplazamiento) 1750°C aproximadamente. Como se indicó anteriormente, la atmósfera, que varía forzosamente a lo largo del horno, no debe reducir el Cr₂O₃ al estado metálico que no tiene un efecto beneficioso.

En un horno que comprende cinco zonas de calentamiento sucesivas, se ha constatado que el ciclo de sinterización mostrado en la figura 4 proporcionaba buenos resultados.

Las dos primeras están destinadas a la presinterización y a la eliminación de adyuvantes (especialmente orgánicos) añadidos al polvo de UO₂ para mejorar las características del producto final (solidez, aspecto, estructura). El aumento de la temperatura de 1500°C a 1750°C se ralentiza (por ejemplo, aproximadamente 80°C/h) para favorecer el crecimiento de los granos.

Al introducirse habitualmente el gas humidificado en el horno solamente en la zona de sinterización, la composición de la atmósfera varía a lo largo del horno. Un perfil de variación de la humedad del tipo mostrado en la figura 5 proporciona buenos resultados durante la sinterización propiamente dicha, la tasa de humidificación de la atmósfera es en promedio del 1,9% en volumen de H₂O.

ES 2 321 540 T3

También se han efectuado ensayos con concentraciones de dopantes aumentadas o con una combinación de dopantes, añadiendo SiO_2 y/o Al_2O_3 a Cr_2O_3 , especialmente:

2000 ppm de Cr_2O_3

2000 ppm de Cr_2O_3 + de 50 a 200 ppm de SiO_2

2000 ppm de Cr_2O_3 + 100 ppm de SiO_2 + hasta 100 ppm de Al_2O_3

1000 ppm de Cr_2O_3 + de 50 a 200 ppm de SiO_2

1800 ppm de Cr_2O_3 + de 50 a 200 ppm de SiO_2

1500 ppm de Cr_2O_3 + 100 ppm de SiO_2 .

Estos ensayos han confirmado que un contenido en Cr_2O_3 que supera las 1750 ppm no aporta ventajas suficientes para compensar las dificultades relacionadas con la evaporación y que Si_2O_3 y Al_2O_3 a un contenido muy reducido permiten completar la acción de Cr_2O_3 .

De modo general, el dopado de las pastillas permite proyectar la fluencia del material hacia los huecos, tanto más cuando se encuentra en situaciones de transitorios a potencias muy altas y para las tensiones más elevadas. Esta fluencia también permite disminuir el empuje de la pastilla sobre la vaina en los planos entre pastillas, reduciendo así las tensiones en la vaina y proporciona más márgenes con respecto a las tensiones IPG. De forma global, las pastillas constituyen un remedio contra la IPG y permiten así cubrir un amplio campo de situaciones. El dopado en particular con un 0,16% en masa de Cr_2O_3 , confiere una microestructura de granos gruesos propicia para una mejor retención de gases de fisión, lo que permite una mayor flexibilidad en el dimensionamiento de una barra de combustible para gestiones con tasas altas.

REIVINDICACIONES

1. Pastilla (10) sinterizada de óxido de combustible nuclear, siendo la pastilla sensiblemente cilíndrica y a base de óxido de uranio enriquecido, **caracterizada** porque comprende entre 1200 ppm y 1750 ppm en masa de Cr_2O_3 , que no se ha reducido durante la sinterización de la pastilla.

2. Pastilla según la reivindicación 1, teniendo la pastilla granos de un tamaño superior a $40\ \mu\text{m}$.

3. Pastilla según la reivindicación 1 ó 2, comprendiendo la pastilla más de 1250 ppm en masa de Cr_2O_3 .

4. Pastilla según la reivindicación 3, comprendiendo la pastilla más de 1450 ppm en masa de Cr_2O_3 .

5. Pastilla según la reivindicación 4, comprendiendo la pastilla más de 1500 ppm en masa de Cr_2O_3 .

6. Barra de combustible nuclear que comprende una vaina (12) de aleación a base de zirconio y un apilamiento de pastillas (10) sinterizadas de óxido de combustible nuclear, siendo las pastillas sensiblemente cilíndricas y a base de óxido de uranio enriquecido, **caracterizada** porque las pastillas son pastillas según una de las reivindicaciones anteriores.

7. Procedimiento de fabricación de pastillas según una de las reivindicaciones 1 a 6, comprendiendo el procedimiento una etapa de sinterización de pastillas durante la cual no se reduce el Cr_2O_3 , comprendiendo las pastillas sinterizadas entre 1200 ppm y 1750 ppm en masa de Cr_2O_3 .

8. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que las pastillas sinterizadas tienen granos de un tamaño superior a $40\ \mu\text{m}$.

9. Procedimiento según la reivindicación 7 ó 8, en el que las pastillas sinterizadas comprenden más de 1250 ppm en masa de Cr_2O_3 .

10. Procedimiento según la reivindicación 9, en el que las pastillas sinterizadas comprenden más de 1450 ppm en masa de Cr_2O_3 .

11. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que las pastillas sinterizadas comprenden más de 1500 ppm en masa de Cr_2O_3 .

12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 11, en el que la etapa de sinterización se efectúa a una temperatura superior a 1700°C .

13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 12, en el que la etapa de sinterización se realiza a una temperatura inferior a 1750°C .

14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 7 a 13, en el que la etapa de sinterización se realiza en una atmósfera de hidrógeno que contiene vapor de agua con un contenido máximo en volumen del 5% de vapor de agua.

15. Procedimiento según la reivindicación 14, en el que la etapa de sinterización se efectúa en una atmósfera de hidrógeno que tiene del 1,9 al 2,5% en volumen de vapor de agua.

FIG.1.

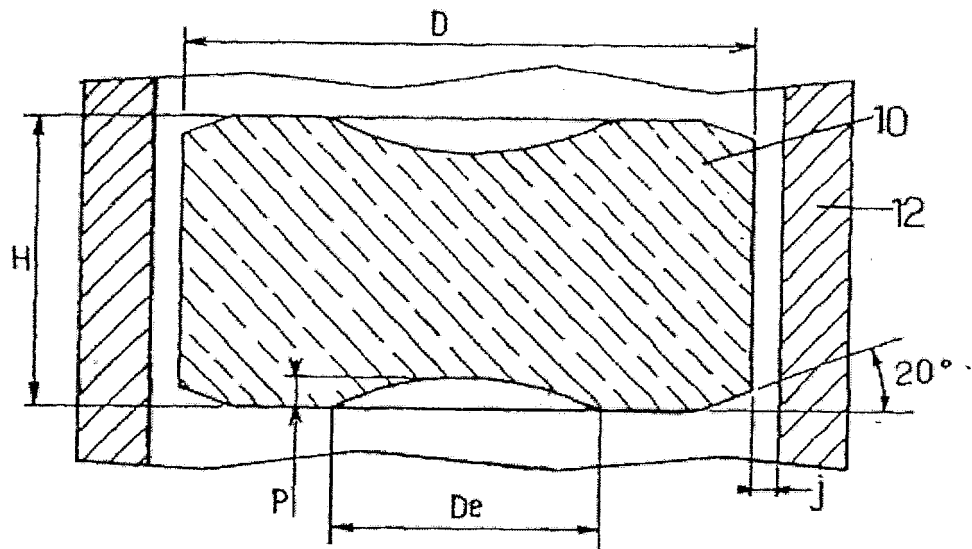
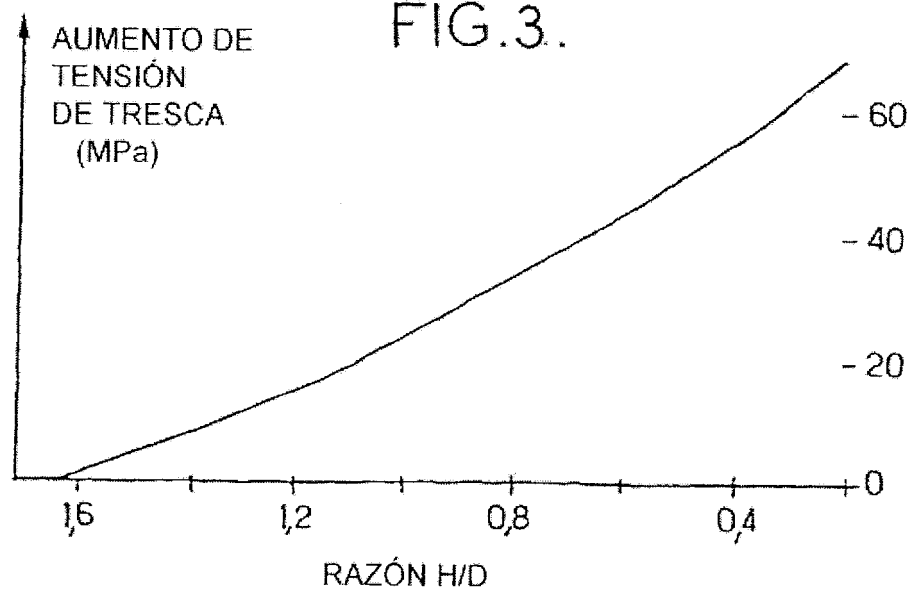


FIG.3.



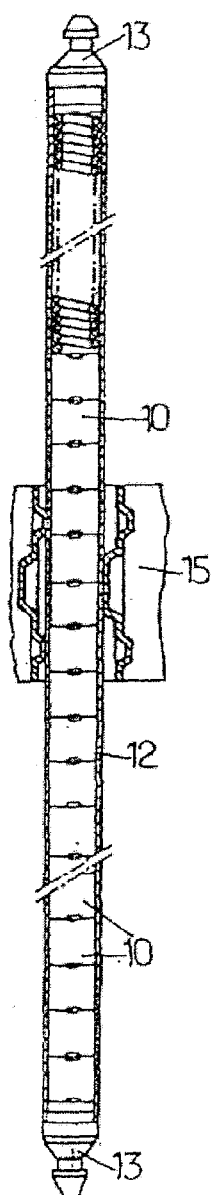


FIG.2.

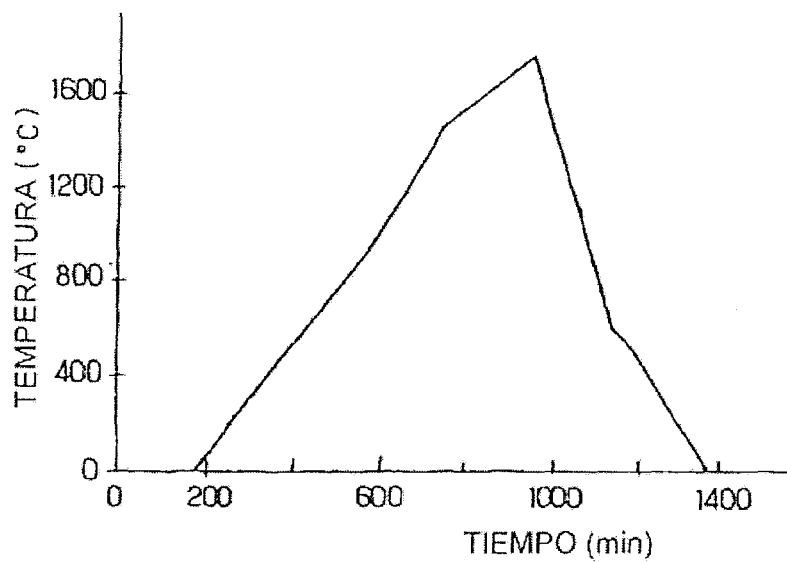


FIG.4.

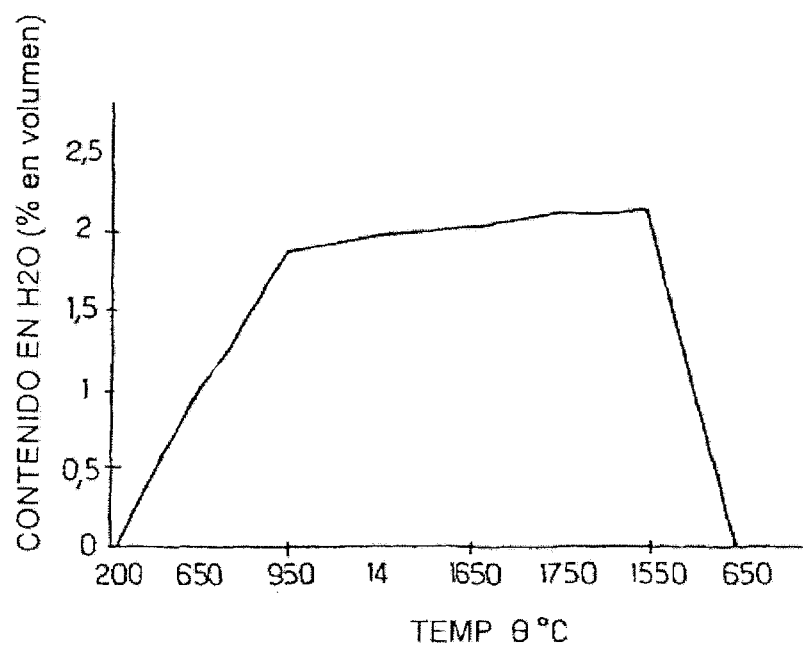


FIG.5.