

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 395 021**

51 Int. Cl.:

G21C 7/00 (2006.01)

G21C 3/07 (2006.01)

C22C 16/00 (2006.01)

C22F 1/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.06.2004 E 04767221 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la solicitud europea: **14.02.2007 EP 1751774**

54 Título: **Procedimiento de explotación de un reactor nuclear y utilización de una aleación específica de vaina para barra de combustible para reducir el daño por interacción pastillas/vaina**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
07.02.2013

73 Titular/es:

**AREVA NP (100.0%)
TOUR AREVA 1 PLACE DE LA COUPOLE
92400 COURBEVOIE, FR**

72 Inventor/es:

**DELAFOY, CHRISTINE y
JULIEN, BRUNO**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 395 021 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

Procedimiento de explotación de un reactor nuclear y utilización de una aleación específica de vaina para barra de combustible para reducir el daño por interacción pastillas/vaina.

La presente invención se refiere a un procedimiento de explotación de un reactor nuclear para producir electricidad, comprendiendo el reactor un núcleo cargado con unos ensamblajes que comprenden unas barras de combustible nuclear, siendo por lo menos una barra del tipo que comprende:

- una vaina de aleación a base de circonio, y
- unas pastillas de combustible nuclear a base de óxido de uranio, estando las pastillas apiladas en el interior de la vaina.

La invención se aplica, por ejemplo, pero no exclusivamente, a los reactores de agua presurizada (REP).

El documento WO 02/45096 describe una barra de combustible del tipo citado anteriormente. Este documento describe en particular la utilización de óxido de cromo Cr_2O_3 como aditivo en las pastillas de combustible para favorecer su fluencia térmica y limitar los riesgos de daño de la vaina por el fenómeno de interacción pastilla/vaina.

La vaina de la barra es la primera barrera de confinamiento de los productos de fisión, estando las otras barreras constituidas por la vasija del reactor y su cámara de hormigón.

En funcionamiento normal (situaciones denominadas de clase 1) e incidental (situaciones denominadas de clase 2), se debe garantizar, por lo tanto, la estanqueidad de la vaina frente a los productos de fisión.

Durante un transitorio de potencia que corresponde a una situación de clase 2, la potencia alcanzada localmente en el combustible puede ser de dos a tres veces superior a la potencia nominal. Este aumento rápido de potencia provoca una dilatación importante de las pastillas. Prevalciendo la dilatación térmica de las pastillas sobre la de la vaina, resulta de ello una puesta en tracción de la vaina por las pastillas y un aumento de las tensiones en la superficie interna de la vaina. Estas tensiones se relajan progresivamente por fluencia. Por otra parte, esta sollicitación mecánica tiene lugar en presencia de un entorno químico agresivo debido a los productos de fisión, tales como el yodo, liberados por el combustible durante el transitorio de potencia.

Se habla entonces de interacción pastilla-vaina (IPG), fenómeno que puede conducir a la ruptura de la vaina.

Ahora bien, dicha ruptura de la vaina no se admite por razones de seguridad, ya que podría conducir a la liberación de productos de fisión en el circuito primario del reactor.

Como lo demuestra la inmensa mayoría de los exámenes de barras de combustible partidos por IPG en reactores de ensayo, el riesgo de ruptura está innegablemente localizado: radialmente (en la superficie interna de la vaina), axialmente (en los planos inter-pastillas) y azimutalmente (frente a las fisuras radiales primarias de las pastillas de combustible).

En efecto, a potencia fuerte, la diferencia de desplazamiento diametral entre el combustible y la vaina, así como el sobre-desplazamiento diametral de la pastilla, son exacerbados en los extremos de la pastilla (deformación en diábolo de la pastilla generada por el gradiente térmico radial en el combustible). Se produce un nivel de tensión elevado en la superficie interna de la vaina, nivel que puede superar el límite elástico del material que constituye la vaina, generalmente Zircaloy-4, que provoca así el daño de la vaina.

Esta carga mecánica es aún más importante a nivel de los planos inter-pastillas y en los puntos de contacto entre la vaina y el borde de las fisuras radiales primarias generadas por la fragmentación de las pastillas de combustible durante la radiación en funcionamiento normal. Por otra parte, el nivel de temperatura elevado en las pastillas favorece la liberación de productos de fisión, como el yodo, que se condensará en la superficie interna de la vaina, preferentemente a nivel de los planos inter-pastillas (zonas menos calientes) y frente a las fisuras radiales primarias del combustible (camino privilegiado para la evacuación de los gases de fisión).

Durante una ruptura de la vaina por IPG, la vaina se agrieta y los gases de fisión pueden contaminar el circuito primario.

La utilización de Cr_2O_3 como aditivo dopante en unas pastillas de combustible, cargadas en unas vainas de Zircaloy-4, resultó ser útil frente a la IPG.

Sin embargo, los riesgos de ruptura por IPG no son aún lo bastante reducidos, si bien la flexibilidad de explotación de los reactores que utilizan dichas barras sigue siendo demasiado baja.

Los documentos FR 276 821, US nº 5.838.753, US nº 5.844.959 y WO 01/24193 describen unas aleaciones de vaina de barras de combustible nuclear.

Un objetivo de la invención es, por lo tanto, resolver este problema permitiendo una explotación más flexible de un reactor nuclear.

Para ello, la invención tiene por objeto un procedimiento de explotación de un reactor nuclear según la reivindicación 1.

Según unos modos particulares de realización, el procedimiento puede comprender una o varias de las características de las reivindicaciones 2 a 18.

La invención tiene asimismo por objeto una utilización según la reivindicación 19.

La invención se pondrá más claramente de manifiesto a partir de la lectura de la descripción siguiente, dada únicamente a título de ejemplo y realizada haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 es una vista esquemática lateral de un ensamblaje de combustible nuclear que permite la realización de un procedimiento de explotación según la invención,
- la figura 2 es una vista esquemática en sección longitudinal de una barra del ensamblaje de la figura 1,
- la figura 3 es una vista esquemática, parcial y ampliada, que ilustra la forma de una pastilla de la barra de la figura 2,
- la figura 4 es un gráfico que ilustra el dominio de estabilidad del óxido Cr_2O_3 ,
- la figura 5 es una vista esquemática de un reactor nuclear que utiliza un procedimiento de explotación según la invención, y
- la figura 6 es un diagrama que representa unos campos de funcionamiento del reactor de la figura 5.
- la variación de potencia lineal de la barra de combustible nuclear se mantiene inferior a una variación límite, siendo la variación límite superior a 180 W/cm.

Según unos modos particulares de realización, el procedimiento puede comprender una o varias de las características siguientes, considerada(s) aisladamente o según todas las combinaciones técnicamente posibles:

- la potencia lineal límite es superior a 440 W/cm,
- la variación límite es superior a 200 W/cm,
- la variación límite es superior a 220 W/cm,
- la aleación comprende, en masa, entre 5 y 35 ppm de azufre,
- la aleación comprende entre 0,03 y 0,25% en total de hierro y de cromo y/o de vanadio,
- la aleación se ha sometido a unos recocidos a unas temperaturas inferiores a 600°C,
- las pastillas comprenden por lo menos un óxido metálico de aumento de deformación térmica de las pastillas y la potencia lineal límite es superior a 590 W/cm,
- la potencia lineal límite es superior a 600 W/cm,
- la potencia lineal límite es superior a 610 W/cm,
- la potencia lineal límite es superior a 620 W/cm,
- la variación límite es superior a 430 W/cm,
- la variación límite es superior a 440 W/cm,
- la variación límite es superior a 450 W/cm,
- el óxido metálico es Cr_2O_3 ,

- las pastillas comprenden entre 1200 y 2000 ppm en masa de Cr_2O_3 ,
- las pastillas comprenden entre 1450 y 1750 ppm en masa de Cr_2O_3 ,
- el interior de la vaina ha sido presurizado, antes de la utilización, a una presión inferior a 20 bares.

La invención tiene asimismo por objeto una utilización:

- en una barra de combustible que comprende un apilamiento de pastillas de combustible nuclear a base de uranio,
- de una vaina de aleación totalmente recristalizada a base de circonio que tiene en masa:
 - * 0,8 a 1,3% de niobio,
 - * 1000 a 17000 ppm de oxígeno,
 - * entre 0 y 35 ppm de azufre,
 - * entre 0 y 7000 ppm en total de hierro y de cromo y/o de vanadio,
 - * entre 0 y 2% de estaño,
 - * entre 0 y 70 ppm de níquel,
 - * entre 0 y 100 ppm de carbono, y
 - * entre 0 y 50 ppm de silicio,
- estando el resto constituido por circonio, con la excepción de las impurezas inevitables, conteniendo la vaina las pastillas de combustible,
- para reducir el daño de la vaina por el fenómeno de interacción pastillas/vaina.

La invención se pondrá más claramente de manifiesto a partir de la lectura de la descripción siguiente, dada únicamente a título de ejemplo y realizada haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 es una vista esquemática lateral de un ensamblaje de combustible nuclear que permite la realización de un procedimiento de explotación según la invención,
- la figura 2 es una vista esquemática en sección longitudinal de una barra del ensamblaje de la figura 1,
- la figura 3 es una vista esquemática, parcial y ampliada, que ilustra la forma de una pastilla del lápiz de la figura 2,
- la figura 4 es un gráfico que ilustra el dominio de estabilidad del óxido Cr_2O_3 ,
- la figura 5 es una vista esquemática de un reactor nuclear que utiliza un procedimiento de explotación según la invención, y
- la figura 6 es un diagrama que representa unos campos de funcionamiento del reactor de la figura 5.

La figura 1 representa esquemáticamente un ensamblaje 1 de combustible nuclear para reactor de agua presurizada. El agua asegura por lo tanto una función de refrigeración y de moderación, es decir de ralentización de los neutrones producidos por el combustible nuclear.

El ensamblaje 1 se extiende verticalmente y de manera rectilínea a lo largo de una dirección longitudinal A.

De manera clásica, el ensamblaje 1 comprende principalmente unas barras 3 de combustible nuclear y una estructura o esqueleto 5 de soporte de las barras 3.

El esqueleto de soporte 5 comprende:

- un terminal inferior 7 y un terminal superior 9 dispuestos en los extremos longitudinales del ensamblaje 1,
- unos tubos-guías 11 destinados a recibir las barras de un grupo no representado de mando y de parada del reactor nuclear, y
- unas rejillas 13 de mantenimiento de las barras 3.

Los terminales 7 y 9 están unidos a los extremos longitudinales de los tubos guías 11.

Las barras 3 se extienden verticalmente entre los terminales 7 y 9. Las barras 3 están dispuestas en los nudos de una red sustancialmente regular de base cuadrada en los que están mantenidos mediante las rejillas 13. Algunos nudos de la red están ocupados por los tubos-guías 11 y eventualmente por un tubo de instrumentación.

- 5 Como se ilustra en la figura 2, cada barra 3 comprende una vaina exterior 17 cerrada por un tapón inferior 19 y un tapón superior 21, y que contiene el combustible nuclear.

Se trata en este caso de pastillas de combustible 23 apiladas, apoyándose las pastillas 23 sobre el tapón inferior 19.

- 10 Un resorte helicoidal de mantenimiento 25 está dispuesto en la vaina 17, entre la pastilla 23 superior y el tapón superior 21.

- 15 Tal como se ilustra en la figura 3, cada pastilla 23 tiene una forma sustancialmente cilíndrica con unos chaflanes 26 entre sus caras extremas y su cara lateral. Un vaciado 27 en casquete esférico está practicado en cada cara extrema, sustancialmente en el centro de ésta.

La relación altura/diámetro H/D puede ser cualquiera, por ejemplo de aproximadamente 1,6, pero puede también ser más baja, por ejemplo de aproximadamente 0,5.

- 20 Un juego diametral j, comprendido por ejemplo entre 100 y 300 μm , está previsto entre las pastillas 23 y la vaina 17.

- 25 Para garantizar un buen intercambio térmico en la barra 3 antes de la entrada en contacto de las pastillas 23 y de la vaina 17, la barra de combustible 3 está además llena de un gas térmicamente conductor, tal como helio. La presión de este gas contribuye también a diferir en el tiempo la entrada en contacto de las pastillas 23 y de la vaina 17, entrada en contacto que marca el principio de la interacción pastilla/vaina.

- 30 La presión de este gas antes de la utilización del ensamblaje 1 estará comprendida generalmente entre 10 y 30 bares. En un ejemplo de realización, la barra de combustible 3 estará presurizada a 25 bares de helio. En algunas variantes, la presión interna de la barra 3 será inferior a 20 bares.

El combustible de las pastillas 23 es, por ejemplo, óxido de uranio (UO_2) enriquecido en isótopo 235.

- 35 Como variante, el combustible puede estar constituido también por óxido mixto uranio-plutonio, o por uranio-torio, o también por uranio-veneno neutrónico a base de tierras raras (gadolinio, erbio). En particular, unas barras 3 del mismo ensamblaje 1 pueden poseer unos combustibles nucleares diferentes.

Un óxido metálico se ha añadido en baja cantidad con el fin de mejorar las propiedades viscoplásticas del combustible y reducir así las consecuencias del fenómeno de LPG.

- 40 En este caso, la mejora de las propiedades viscoplásticas del combustible se ha obtenido mediante adición de óxido de cromo Cr_2O_3 .

- 45 La adición del polvo de óxido de cromo Cr_2O_3 al del óxido de uranio se puede realizar, por ejemplo, mediante mezcla mecánica, de manera que la distribución del dopante Cr_2O_3 sea homogénea sobre el conjunto de la masa de mezcla. Esta mezcla se puede someter después a diversas operaciones (precompactación, granulación, esferoidización, lubricación) que prevén mejorar su colabilidad y su sinterizabilidad. Se puede conducir la etapa de lubricación con un producto orgánico que contiene, llegado el caso, un compuesto metálico, tal como el zinc o el aluminio.

La mezcla se comprime a continuación en frío para formar las pastillas 23.

- 50 Para promover el desarrollo del crecimiento cristalino, la sinterización de las pastillas se realiza en unas condiciones termodinámicas tales que el dopante Cr_2O_3 no pueda ser reducido al estado metálico Cr.

Al final de la fabricación de las pastillas 23, no se habrá reducido por lo tanto el aditivo Cr_2O_3 .

- 55 La evolución del potencial de oxígeno (en kJ/mol) que corresponde al equilibrio Cr/ Cr_2O_3 en función de la temperatura se representa en la figura 4 mediante la línea recta 29. Puesto que el dominio de estabilidad de Cr_2O_3 se sitúa por encima de la línea recta 29 de equilibrio Cr/ Cr_2O_3 , se seleccionará en la práctica una atmósfera que permita garantizar el respeto de este dominio de estabilidad durante toda la sinterización. En la figura 4, las líneas rectas 31, 33, 35 y 37 corresponden a unas atmósferas de hidrógeno que contienen respectivamente 0,05; 1; 2,5 y 5% en volumen de H_2O . Para cada una de estas atmósferas, el potencial de oxígeno es por lo tanto la ordenada al punto de intersección entre la línea recta 31, 33, 35 ó 37 considerada y la línea recta 29.

- 65 Así, la utilización de una mezcla gaseosa de hidrógeno con un contenido en agua o entre 1,7 y 2,5% en volumen permitirá conservar la fase Cr_2O_3 cuando la sinterización se lleva hasta temperaturas de 1700 a 1800°C.

En estas condiciones de sinterización, el desarrollo del crecimiento cristalino en la matriz de UO_2 es directamente proporcional a la adición en Cr_2O_3 cuando su contenido en masa está comprendido entre 750 y 1500 ppm. Este aumento de los granos resulta directamente de la puesta en solución del óxido de cromo Cr_2O_3 en la matriz combustible. Más allá de 1500 ppm en masa, y debido a un defecto de solubilización del dopante en la matriz UO_2 , se precipita óxido de cromo en las juntas de granos que conduce a la activación de un segundo mecanismo de crecimiento cristalino que conduce a una variación casi exponencial del tamaño de los granos. La migración tan rápida de las juntas de granos conduce también a aislar unos precipitados de Cr_2O_3 no disueltos en los granos de la matriz UO_2 .

En función del contenido de óxido de cromo Cr_2O_3 utilizado, y por lo tanto del tipo de microestructura generada, se modifica el comportamiento en fluencia del combustible.

La puesta en solución de Cr_2O_3 en UO_2 provoca unas distorsiones de la red cristalina e induce un endurecimiento. Sin embargo, éste está compensado por el aumento del tamaño de los granos que favorece el desplazamiento de las dislocaciones. En efecto, cuanto más gruesos son los granos, mayor es el libre recorrido de las dislocaciones antes de que se encuentren con obstáculos, tales como las juntas de los granos. Por el contrario, cuando el exceso de dopante no solubilizado se vuelve importante, la matriz contiene unos precipitados esféricos y micrométricos de Cr_2O_3 , en los que se anclarán las dislocaciones. Resulta de ello un complemento de endurecimiento para el cual un aumento del tamaño de los granos no tiene efecto. De hecho, se observa una saturación de la velocidad de fluencia de los combustibles dopados más allá de 1750 ppm en masa de óxido de cromo.

En la práctica, el contenido óptimo para el dopaje con Cr_2O_3 estará comprendido entre 1200 y 2200 ppm en masa. Será ventajoso considerar un contenido de 1600 ± 150 ppm en masa que permite obtener unas características óptimas en comparación con un combustible estándar a base de uranio enriquecido, a saber un incremento muy significativo del tamaño de los granos (superior a $45 \mu\text{m}$) y unas propiedades en fluencia del combustible interesantes.

Este dopaje de las pastillas 23 en Cr_2O_3 aumenta por lo tanto su viscoplasticidad y favorece su fluencia a alta temperatura.

Ahora bien, durante un transitorio de clase 2, la temperatura de las pastillas 23 puede superar ampliamente 1200°C . Esta temperatura corresponde al dominio de activación de la fluencia térmica de los combustibles a base de uranio. Bajo el efecto de la temperatura, el material de las pastillas 23 tiende entonces a fluir hacia el centro de las pastillas 23 puestas en compresión, y por lo tanto a rellenar los vaciados 27. En consecuencia, disminuirán las tensiones sobre las superficies laterales de las pastillas 23, que comparativamente siguen frías (temperatura inferior a 1000°C), y se reducirá asimismo el empuje de las pastillas 23 sobre la vaina 17.

Durante el transitorio de potencia de clase 2, la vaina 17 impone una retroacción sobre las caras laterales de las pastillas 23. Debido al campo de temperatura que reina en el seno del combustible, estas caras laterales siguen estando relativamente frías y permanecen por lo tanto frágiles y susceptibles de microfisurarse bajo el efecto de la retroacción impuesta por la vaina 17.

La microfisuración estará más desarrollada por cuanto que la energía resultante de la retroacción de la vaina 17 deberá disiparse en un volumen reducido, es decir cuando la mejora de las propiedades viscoplásticas de las pastillas 23 interviene sobre un volumen importante en el seno del combustible. Este mecanismo de microfisuración radial periférica puede tener por efecto disminuir las concentraciones locales de tensiones en la vaina 17 por una menor amplitud de apertura de los labios de las fisuras.

Así, durante el transitorio, se pueden instaurar unas contra-reacciones de las pastillas 23 y de la vaina 17, oponiéndose ambas a los efectos instantáneos de los desplazamientos diferenciales de origen térmico.

Por todas estas razones, el dopaje citado anteriormente de las pastillas 23 reduce la componente mecánica del riesgo de ruptura por IPG.

Además, reduce la componente química de este tipo de ruptura, ya que las pastillas 23 tienen una mayor capacidad de retención de los gases de fisión tales como el yodo.

El aumento del tamaño de los granos del combustible dopado con óxido de cromo permite, en efecto, aumentar la capacidad de retención de los gases de fisión en la matriz de UO_2 . Para ser liberados fuera de la matriz combustible, los átomos de gas deben, en primer lugar, difundirse desde el interior de los granos de UO_2 hacia las juntas de granos en las que se acumulan para formar unas burbujas lenticulares. La interconexión de estas burbujas intergranulares permite que los gases se difundan a continuación fuera de la matriz combustible. En una estructura de granos gruesos, los caminos de difusión de los gases desde el interior de los granos hacia las juntas son alargados y provoca una reducción de la fracción de gas liberado. Este proceso es eficaz sólo si los coeficientes de difusión de los gases de fisión no están acelerados por la adición del producto dopante.

Desde este punto de vista, la utilización de un contenido de 1600 ppm en masa de Cr_2O_3 es particularmente ventajosa. Además, la difusión de los átomos gaseosos se realiza según una velocidad creciente con la temperatura, por lo tanto con la potencia. La utilización de un combustible de granos gruesos dopado con Cr_2O_3 , que asegura una mejor capacidad de retención de los gases de fisión en la matriz, permite disminuir la concentración de los productos de fisión agresivos sobre la superficie interna de la vaina 17, y por lo tanto reducir el riesgo de ruptura de la vaina 17 por IPG.

Asimismo, la difusión de los átomos gaseosos y su liberación se aceleran con el aumento del índice de combustión del combustible. La utilización de un combustible de granos gruesos dopado con Cr_2O_3 , que asegura una mejor capacidad de retención de los gases de fisión en la matriz, permite limitar la presión interna en las barras con altos índices de combustión, pudiendo dicho aumento de presión interna cuestionar la integridad de la vaina 17.

Así, las barras 3 presentan, debido a la naturaleza de las pastillas 23, un comportamiento satisfactorio frente a la IPG.

Con el fin de mejorar aún más la resistencia de las barras 3 frente a este fenómeno, las vainas 17 han sido realizadas en una aleación de circonio particular que ha resultado, de manera sorprendente, muy ventajosa para este fin.

Se trata en este caso de una aleación de circonio totalmente recristalizado que tiene en masa:

- entre 0,8 y 1,3% de niobio, y
- entre 1000 y 1700 ppm de oxígeno.

En unas variantes preferidas, esta aleación de circonio podrá comprender además entre 0 y 35 ppm de azufre, entre 0 y 7000 ppm en masa en total de hierro y de cromo y/o de vanadio, estaño con un contenido en masa comprendido entre 0 y 2%, níquel con un contenido en masa comprendido entre 0 y 70 ppm, carbono con un contenido en masa comprendido entre 0 y 100 ppm, y silicio con un contenido en masa comprendido entre 0 y 50 ppm.

En unas variantes aún más preferidas, la aleación puede comprender:

- entre 5 y 35 ppm en masa de azufre, y/o
- entre 0,03 y 0,25% en masa en total de hierro y de cromo y/o de vanadio.

Partiendo de esta aleación, las vainas 17 se han realizado por ejemplo mediante un procedimiento que comprende unas etapas de:

- realización de una barra de la aleación,
- remojo en agua después del calentamiento a una temperatura comprendida entre 1000 y 1200°C,
- hilado de una pieza en bruto después del calentamiento a una temperatura comprendida entre 600 y 800°C,
- laminado en frío, en por lo menos dos pasos, de la pieza en bruto para obtener un tubo, con unos recocidos entre 560 y 600°C, y
- recocido final de recristalización entre 560 y 600°C, siendo el conjunto de los tratamientos térmicos efectuado en atmósfera inerte o al vacío.

La utilización de recocidos a temperaturas inferiores a 600°C así como de un contenido en masa en niobio superior a 0,4%, permite garantizar la presencia de precipitados de β niobio, lo cual puede resultar ventajoso en algunas variantes.

Se ha podido constatar que las vainas 17 realizadas en la aleación descrita anteriormente presentan una muy buena resistencia a la fluencia bajo flujo de neutrones rápidos, retrasando así el primer instante de contacto entre las pastillas 23 y las vainas 17, es decir el principio del fenómeno de IPG.

Se cree que esta resistencia a la fluencia se debe a la presencia de niobio en un contenido superior a su límite de solubilidad de 0,4% en el estado recristalizado y a la presencia de oxígeno en disolución que impide el desplazamiento de las dislocaciones en la aleación.

Además, se ha constatado que las vainas 17 presentan una capacidad de relajación de tensiones importante debido a su comportamiento viscoplástico bajo tensiones muy fuertes.

En estos dos puntos, las aleaciones utilizadas habitualmente para formar las vainas, tales como el Zircaloy-4, tienen unas propiedades inferiores a las de la aleación descrita anteriormente.

Unos ensayos en reactores experimentales han permitido así determinar que la potencia lineal P_{max} más allá de la cual se puede constatar una ruptura por IPG de una barra 3, es de aproximadamente 444 W/cm, con una aleación según la invención, mientras que el valor para el Zircaloy-4 es de aproximadamente 425 W/cm. Asimismo, se ha podido constatar que las vainas 17 podían soportar unas variaciones de potencia lineal ΔP_{max} de aproximadamente 253 W/cm, mientras que en el caso del Zircaloy-4, la variación de potencia límite era de aproximadamente 170 W/cm.

Estos valores se han obtenido utilizando en las vainas 17 unas pastillas clásicas, es decir sin Cr_2O_3 .

Unos ensayos análogos llevados a cabo con unas vainas de Zircaloy-4 cargadas con pastillas 23 tales como se ha descrito anteriormente han permitido medir una potencia lineal máxima P_{max} de aproximadamente 530 W/cm, y una variación de potencia lineal máxima ΔP_{max} de aproximadamente 330 W/cm.

De manera sorprendente, los mismos ensayos llevados a cabo con las barras 3 descritas anteriormente, es decir con la aleación según la invención y las pastillas 23 dopadas con Cr_2O_3 han permitido obtener una potencia lineal máxima P_{max} de aproximadamente 620 W/cm, y una variación de potencia lineal máxima ΔP_{max} de aproximadamente 450 W/cm.

La utilización combinada de pastillas 23 dopadas y de vainas 17 realizadas en la aleación según la invención permite por lo tanto alcanzar una ganancia de potencia lineal máxima P_{max} y una variación de potencia lineal máxima ΔP_{max} que es superior a la suma de las ganancias obtenidas durante la utilización separada de la aleación según la invención y de pastillas 23 dopadas.

Se concibe por lo tanto que las barras 3 descritas anteriormente, con las vainas 17 y las pastillas 23 dopadas pueden soportar unos transitorios de potencia mucho más severos, lo cual permite incrementar la flexibilidad de explotación de los reactores en los que se cargan unos ensamblajes 1.

La figura 5 ilustra dicho reactor 31 de agua presurizada que comprende clásicamente:

- un núcleo 32 contenido en una vasija 48,
- un generador de vapor 33,
- una turbina 34 acoplada a un generador 35 de energía eléctrica, y
- un condensador 36.

El reactor 31 comprende un circuito primario 38 equipado con una bomba 39 y en el que circula agua a presión, según la trayectoria materializada por las flechas en la figura 5. Esta agua sube en particular a través del núcleo 32 para ser calentada en el mismo asegurando la refrigeración del núcleo 32.

El circuito primario 38 comprende además un presurizador 40 que permite poner a presión el agua que circula en el circuito primario 38.

Un circuito 41 de control volumétrico y químico, denominado generalmente circuito RCV, está conectado al circuito primario 38, en particular para asegurar la filtración y la purificación del agua que circula en el circuito primario 38.

El agua del circuito primario 38 alimenta el generador de vapor 33 en el que se enfría asegurando la vaporización de agua que circula en un circuito secundario 42.

El vapor producido por el generador 33 está canalizado por el circuito secundario 42 hacia la turbina y después hacia el condensador 36 en el que este vapor se condensa mediante intercambio de calor indirecto con agua de enfriamiento que circula en el condensador 36.

El circuito secundario 42 comprende aguas abajo del condensador 36 una bomba 43 y un calentador 44.

De manera clásica también, el núcleo 32 comprende unos ensamblajes combustibles 1 que están cargados en su vasija 48. Un único ensamblaje 1 está representado en la figura 5, pero el núcleo 32 comprende por ejemplo 157 ensamblajes 1.

El reactor 31 comprende unos grupos de control 50 que están dispuestos en la vasija 48 por encima de ciertos ensamblajes 1. Un único grupo 50 está representado en la figura 1, pero el núcleo 32 puede comprender por ejemplo aproximadamente 70 grupos 50.

Los grupos 50 pueden estar desplazados mediante unos mecanismos 52 bajo la acción de medios 54 de pilotaje para insertarse en los ensamblajes 1 sobre los que sobresalen.

Clásicamente, cada grupo de control 50 comprende unas barras de control de un material absorbente de neutrones.

Así, el desplazamiento vertical de cada grupo 50 permite regular la reactividad del reactor 31, en función de la penetración de los grupos 50 en los ensamblajes combustibles 1.

5 El reactor nuclear 31 proporciona, gracias al generador 35, electricidad a una red eléctrica.

Los medios 54 de pilotaje han sido regulados para controlar el funcionamiento del reactor 1 de manera que, en particular durante un transitorio de potencia en situación de clase 2, la potencia lineal P en las barras 3 de los ensamblajes 1 se mantiene por debajo de un valor límite PL, el cual es superior a 590 W/cm, preferentemente superior a 600 W/cm, más preferentemente superior a 610 W/cm o incluso superior a 620 W/cm.

Así, durante un transitorio de potencia, la potencia lineal P en algunas de las barras 3 puede ser efectivamente estrictamente superior a 535 W/cm, siendo al mismo tiempo inferior al límite Pmax determinado para las barras 3 según la invención.

15 La potencia lineal efectiva en las barras 3 se estima, a partir de mediciones de parámetros de funcionamiento proporcionadas por unos sensores 56, mediante unos programas de cálculo clásico almacenados en una memoria de los medios 54 de pilotaje.

20 Asimismo, los medios 54 de pilotaje han sido regulados de manera que, en particular durante un transitorio de potencia, la variación de la potencia lineal ΔP en las barras 3 sigue inferior a una variación límite ΔPL que es superior a 430 W/cm, preferentemente superior a 440 W/cm, y más preferentemente superior a 450 W/cm. Así, en ciertas condiciones de funcionamiento, la variación de potencia lineal ΔP sufrida por ciertas barras 3 puede ser efectivamente estrictamente superior a 330 W/cm, manteniéndose al mismo tiempo por debajo del límite ΔPmax determinado para las barras 3 según la invención.

Los medios 54 de pilotaje se han regulado así, por ejemplo, almacenando los valores límites citados anteriormente PL y ΔPL en una memoria. Efectúan su control, por ejemplo, comparando los valores efectivos de P y de ΔP con los valores umbral PL y ΔPL almacenados.

30 Cuando los medios 54 de pilotaje detectan un aumento de la potencia lineal P o de la variación de potencia lineal ΔP más allá de los valores límites PL y ΔPL, los medios 54 de pilotaje pueden, por ejemplo, iniciar una acción correctiva para detener el aumento de la potencia lineal y/o disparar una alarma.

35 Los valores PL y ΔPL son elevados de manera que el reactor 31 puede ser explotado de manera más flexible que tradicionalmente y responder así rápidamente a solicitudes instantáneas e importantes de la red eléctrica, a la que está conectado el generador 5, haciendo sufrir unos transitorios de potencia importantes a los ensamblajes 1 que contiene el núcleo 32.

40 Así, la combinación de la aleación utilizada para realizar las vainas 17 y las pastillas 23 dopadas en Cr₂O₃ ha permitido realizar unas barras 3 muy resistentes frente a la IPG, reduciendo así los riesgos de ruptura de las vainas 17, en particular durante los transitorios de potencia, sea cual sea su tipo.

45 Como variante, se podrían utilizar como aditivo en las pastillas 23, en lugar o además de Cr₂O₃, SiO₂, Nb₂O₅, Al₂O₃, V₂O₅ y MgO.

De manera general, se podrá utilizar una aleación tal como se ha descrito anteriormente en unas barras 3 para reducir el daño de la vaina por el fenómeno IPG, sin utilizar unas pastillas 23 que comprenden un óxido metálico de aumento de la deformación térmica de las pastillas. En efecto, como se ha expuesto anteriormente, la utilización de la aleación como tal permite mejorar el comportamiento frente a la IPG. En este caso, PL es superior a 430 W/cm, y preferentemente superior a 440 W/cm. ΔPL es entonces superior a 180 W/cm, preferentemente superior a 200 W/cm, de manera aún más preferida superior a 240 W/cm.

50 Para respetar los valores límites PL y ΔPL, los medios 54 de pilotaje pueden utilizar unos parámetros intermedios de cálculo.

Así, los valores límites PL y ΔPL han podido ser convertidos en una densidad de energía de deformación límite en las vainas 17, siendo esta densidad de energía definida por ejemplo mediante la fórmula:

$$60 \quad DED = \int \sigma_{\theta\theta} d\varepsilon_{\theta\theta}$$

en la que $\sigma_{\theta\theta}$ es la tensión tangencial en capa inerte de la vaina 17, y $\varepsilon_{\theta\theta}$ es la deformación tangencial en capa interna de la vaina 17.

Típicamente, el valor de densidad de energía de deformación límite DEDL así obtenido es de aproximadamente 3 MPa, lo cual representa una ganancia de aproximadamente 50% con respecto al Zircaloy-4.

5 La utilización de una densidad de energía de deformación resulta particularmente interesante ya que la gran viscoplasticidad de la aleación descrita induce a una saturación de las tensiones durante un transitorio de potencia. Por eso, la utilización de una densidad de energía de deformación como parámetro intermedio, más que de una tensión límite, resulta más pertinente.

10 El valor límite DEDL ha podido ser traducido en valores límites de parámetros de funcionamiento del reactor, tales como, por ejemplo, la potencia global efectiva PG expresada en porcentajes de la potencia nominal PN del reactor 31 y la diferencia ΔI de potencia entre la parte alta y la parte baja del reactor 31. Dicho método está por ejemplo descrito en la solicitud FR 2 846 139. Estos valores límites han conducido entonces a la definición de un dominio 60 autorizado para los transitorios de clase 2, tal como se ilustra en la figura 6.

15 Las fronteras 62 del dominio 60 corresponden a los umbrales de parada de emergencia del reactor 31. En cuanto un transitorio de clase 2 se sale del campo 60, se dispara la parada del reactor 31.

Para verificar que no se han superado los valores límites PL y ΔPL , se comparan por lo tanto los valores efectivos de los parámetros de funcionamiento PG y ΔI con los valores límites correspondientes.

20 El dominio 60 rodea un dominio 64 que corresponde a las situaciones de clase 1.

25 El riesgo de ruptura por IPG existe sólo durante un aumento significativo de la potencia lineal local disipada por las pastillas de combustible 23. Los transitorios accidentales de clase 2 que conducen a los aumentos más importantes de la potencia lineal local, por deformación de la distribución espacial de la potencia, se inician a partir de situaciones de clase 1 localizadas en el interior del campo de funcionamiento 64 de la figura 6. Estas situaciones se describen por ejemplo en la solicitud FR 2 846 139.

30 Para los modos habituales de funcionamiento del reactor 31 en clase 1 (funcionamiento en base, en regulación primaria, en regulación a distancia), los valores de ΔI están comprendidos, por ejemplo, entre -15 y +15%. Durante un transitorio de potencia iniciado a partir de estos modos de funcionamiento, los picos locales de potencia lineal siguen siendo de una amplitud moderada arriba y abajo del núcleo 32.

35 Sin embargo, cuando el reactor 31 funciona de manera prolongada a potencia intermedia ($PG < 92\% PN$ durante más de 8h por intervalos de 24h) para adaptarse a la demanda de electricidad de la red, el punto de funcionamiento se desplaza hacia las zonas externas del dominio 64 de la figura 6. Estas zonas están caracterizadas por unos valores de ΔI muy negativos o positivos, que pueden traducirse por unas variaciones de potencias lineales locales muy importantes en el caso de aparición ulterior de un transitorio de potencia de clase 2. Además, dicho funcionamiento prolongado a potencia intermedia tiene por efecto desacondicionar las barras de combustible 3. En efecto, si la potencia disminuye localmente, se produce una bajada de temperatura en las pastillas 23 y en la vaina 17 de cada barra 3, siendo la variación de temperatura en las pastillas 23 más importante que en la vaina 17. Teniendo en cuenta las características respectivas de dilatación térmica de la vaina 27 y de las pastillas 23 de la barra 3, el juego radial j, cerrado normalmente durante el funcionamiento del reactor, se reabre. En esta configuración, la vaina 17 fluye en compresión. De ello se desprende un aumento de su carga mecánica cuando aparece el transitorio accidental y por lo tanto un riesgo de ruptura por IPG. Este riesgo más importante por cuanto que el desacondicionamiento de la barra de combustible 3 es importante, y por lo tanto que la duración del funcionamiento a potencia intermedia se ha prolongado.

50 Las fronteras 62 del dominio de funcionamiento 60 de la figura 6 permiten eliminar los riesgos de ruptura por IPG durante dicho transitorio.

El aumento de los valores PL y ΔPL gracias a la utilización de las barras de combustible 3 descrito anteriormente permite también que reactor 31 sea explotado de manera más flexible que tradicionalmente permitiendo unas duraciones alargadas de funcionamiento a potencia intermedia.

55

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de explotación de un reactor nuclear (31) para producir electricidad, comprendiendo el reactor un núcleo (32) cargado con unos ensamblajes (1) que comprenden unas barras de combustible nuclear (3), siendo por lo menos una barra de combustible nuclear del tipo que comprende:

- una vaina (17) en aleación a base de circonio totalmente recristalizado que tiene en masa:

- * entre 0,8 y 1,3% de niobio,
- * entre 1000 y 17000 ppm de oxígeno,
- * entre 0 y 35 ppm de azufre,
- * entre 0 y 7000 ppm en total de hierro y de cromo y/o de vanadio,
- * entre 0 y 2% de estaño,
- * entre 0 y 70 ppm de níquel,
- * entre 0 y 100 ppm de carbono, y
- * entre 0 y 50 ppm de silicio,

estando el resto constituido por circonio, con la excepción de las impurezas inevitables, y

- unas pastillas (23) de combustible nuclear a base de óxido de uranio, estando las pastillas apiladas en el interior de la vaina (17),

procedimiento en el cual se controla el funcionamiento del reactor para que, durante un transitorio de potencia:

- la potencia lineal de la barra de combustible nuclear (3) permanezca inferior a una potencia lineal límite almacenada en una memoria, siendo la potencia lineal límite superior a 430 W/cm, y/o
- la variación de potencia lineal de la barra de combustible nuclear (3) permanezca inferior a una variación límite almacenada en una memoria, siendo la variación límite superior a 180 W/cm.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la potencia lineal límite es superior a 440 W/cm.

3. Procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, en el que la variación límite es superior a 200 W/cm.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que la variación límite es superior a 220 W/cm.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la aleación comprende en masa entre 5 y 35 ppm de azufre.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la aleación comprende entre 0,03 y 0,25% en total de hierro y de cromo y/o de vanadio.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la aleación ha sufrido unos recocidos a temperaturas inferiores a 600°C.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que las pastillas (23) comprenden por lo menos un óxido metálico de aumento de la fluencia térmica de las pastillas, y porque la potencia lineal límite es superior a 590 W/cm.

9. Procedimiento según la reivindicación 8, en el que la potencia lineal límite es superior a 600 W/cm.

10. Procedimiento según la reivindicación 9, en el que la potencia lineal límite es superior a 610 W/cm.

11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que la potencia lineal límite es superior a 620 W/cm.

12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 8 a 11, en el que la variación límite es superior a 430 W/cm.

13. Procedimiento según la reivindicación 12, en el que la variación límite es superior a 440 W/cm.

14. Procedimiento según la reivindicación 13, en el que la variación límite es superior a 450 W/cm.

15. Procedimiento según una de las reivindicaciones 8 a 14, en el que el óxido metálico es Cr_2O_3 .

16. Procedimiento según la reivindicación 15, en el que las pastillas (23) comprenden entre 1200 y 2000 ppm en masa de Cr_2O_3 .

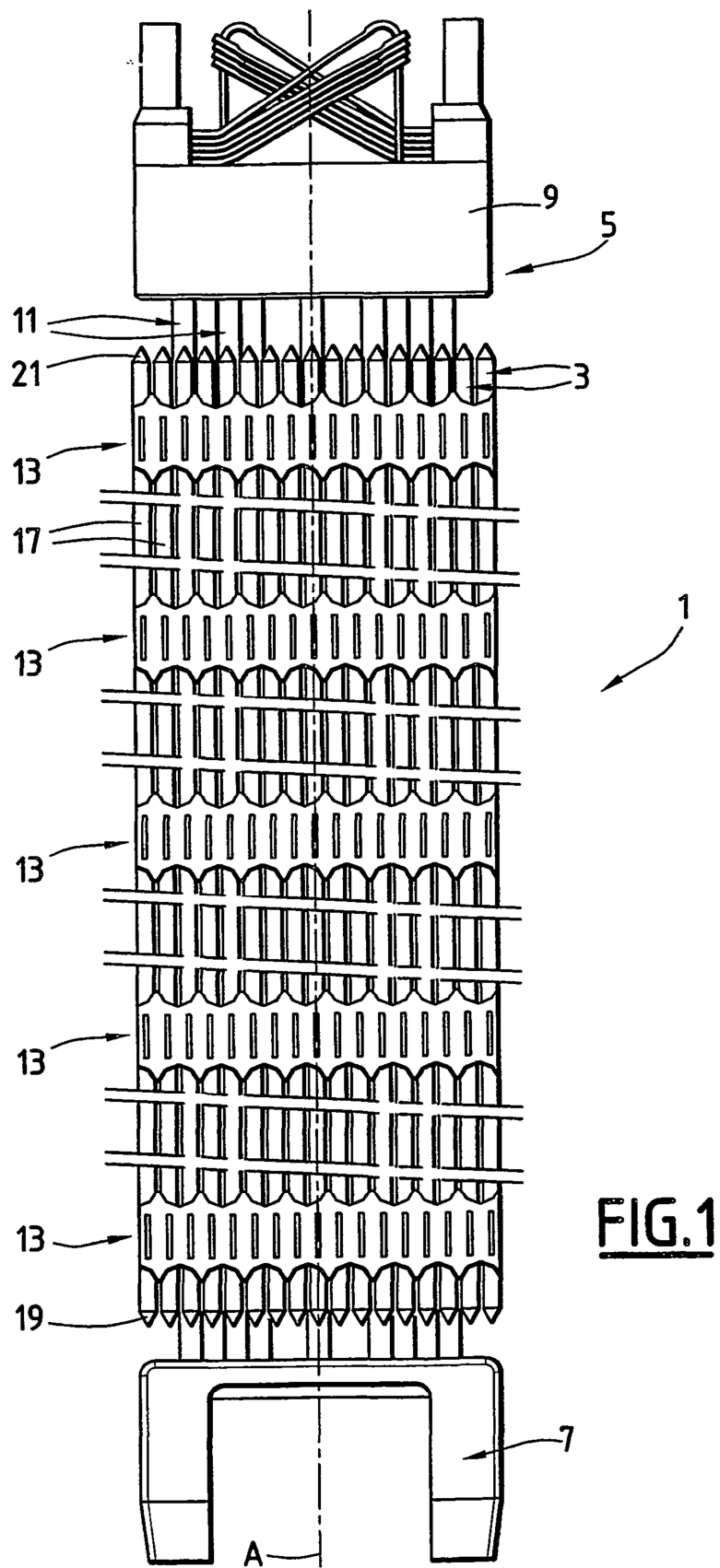
17. Procedimiento según la reivindicación 16, en el que las pastillas (23) comprenden entre 1450 y 1750 ppm en masa de Cr_2O_3 .

5 18. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el interior de la vaina (17) ha sido presurizado, antes de su uso, a una presión inferior a 20 bares.

10 19. Utilización, en una barra de combustible (3) que comprende un apilamiento de pastillas (23) de combustible nuclear a base de uranio, de una vaina en aleación totalmente recristalizada a base de circonio para reducir el daño de la vaina (17) por el fenómeno de interacción pastillas/vaina, teniendo esta vaina en aleación, en masa:

- 10 * 0,8 a 1,3% de niobio,
- * 1000 a 17000 ppm de oxígeno,
- * entre 0 y 35 ppm de azufre,
- * entre 0 y 7000 ppm en total de hierro y de cromo y/o de vanadio,
- 15 * entre 0 y 2% de estaño,
- * entre 0 y 70 ppm de níquel,
- * entre 0 y 100 ppm de carbono, y
- * entre 0 y 50 ppm de silicio,

20 estando el resto constituido por circonio, con la excepción de las impurezas inevitables, conteniendo la vaina las pastillas de combustible.



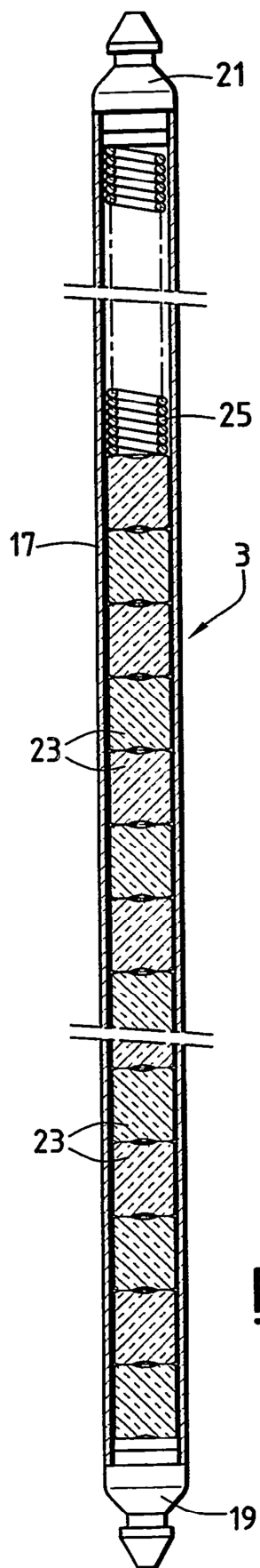


FIG. 2

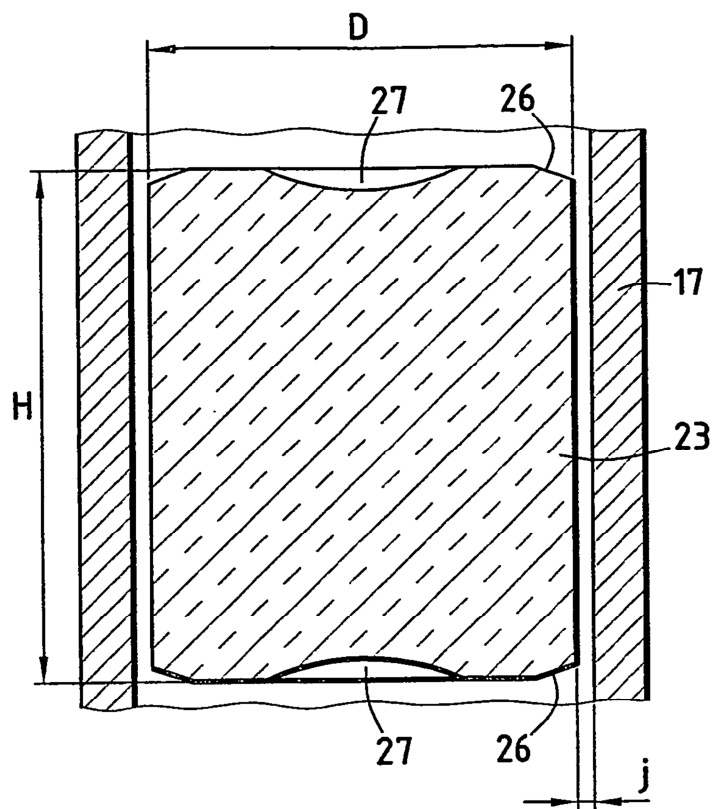


FIG. 3

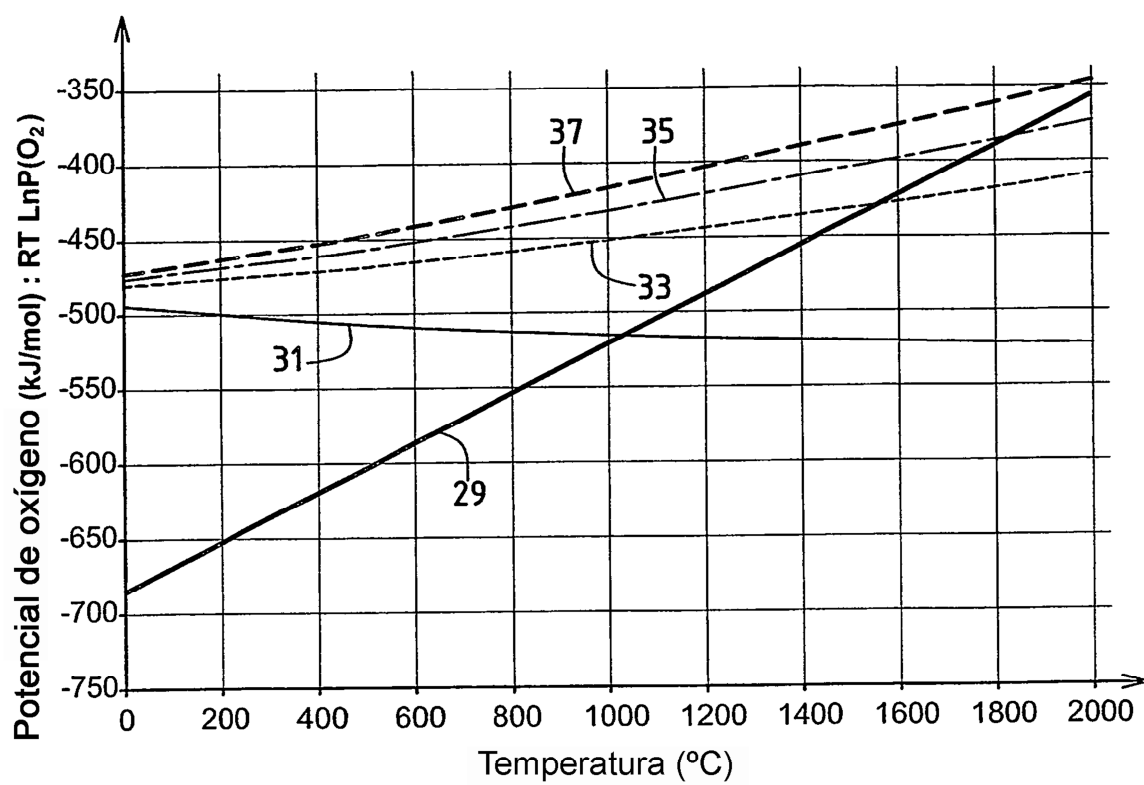


FIG.4

